

01149



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

**“DISEÑO OPTOMECANICO DEL BARRIL PARA
LA CAMARA OSIRIS”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
P R E S E N T A
ALEJANDRO FARAH SIMON

DIRECTOR DE TESIS: DR. ELFEGO RUIZ SCHNEIDER



MEXICO, D.F.

2004

0331742



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Alejandro Farah
Simón

FECHA: 17-V-2004

FIRMA: 

“Diseño Optomecánico del Barril para la cámara OSIRIS”

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Breve historia de la óptica	2
I.2 Lentes y cámaras en los telescopios	7
II. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	11
II.1 Telescopio Infrarrojo Mexicano (<i>TIM</i>)	12
II.2 Proyecto del Gran Telescopio Canarias	15
IV.3 ¿Por qué los astrónomos mexicanos requieren del uso de un telescopio como el GTC?	17
IV.4 Instrumentos astronómicos	18
IV.5 Derrama tecnológica	19
IV.6 Aspectos novedosos	19
IV.7 Justificación	20
III. MARCO TEÓRICO	23
III.1 La naturaleza de la luz	23
III.1.1 Principio de Huygens	24
III.1.2 La ley de Snell	26
III.2 Birrefringencia	28
III.2.1 Esfuerzo de birrefringencia	30
III.3 Sistemas actuales de sujeción	31
III.4 Tensor de esfuerzos y deformación	32
IV. DISEÑO CONCEPTUAL	37
IV.1 Descripción general del instrumento OSIRIS	37
IV.2 Especificaciones y requerimientos	39

IV.3	Criterios de diseño, parámetros e indicadores	39
IV.4	Barril de la cámara OSIRIS: Diseño Conceptual	40
IV.4.1	Posición nominal del sistema óptico	41
IV.5	Atermalización: Unidad Pasiva de Desplazamiento (UPD)	56
IV.6	Unidad de Enfoque	63
IV.7	Generalidades	64
V.	DISEÑO PRELIMINAR	67
V.1	Descripción general del BC	67
V.2	Barril 1; Celda 1, Doblete 1 y Unidad de Enfoque	70
V.3	Barril 2	71
V.4	Materiales y peso estimado	73
V.5	Proceso de maquinado	74
V.6	Ensamble y desensamble (herramientas)	75
V.7	Componentes totales	76
VI.	CÁLCULOS MECÁNICOS	79
VI.1	Soporte radial: Modelo G optimizado	79
VI.2	Posicionado axial de los lentes	83
VI.3	Unidad de enfoque	85
VI.4	Unidad Pasiva de Desplazamiento	87
VI.5	Barril: acción gravitatoria sobre el barril ensamblado	89
VI.6	Presupuestos de error	89
VII.	CONCLUSIONES	95
	APÉNDICE A	
	APÉNDICE B	
	APÉNDICE C	

I. INTRODUCCIÓN

La experiencia adquirida por el Instituto de Astronomía de la UNAM en el diseño conceptual del Telescopio Infrarrojo Mexicano (*TIM*), y la colaboración en proyectos de grandes telescopios muestra la importancia que existe entre la ingeniería y la ciencia.

El desarrollo de un instrumento científico con fines astronómicos involucra áreas de la ingeniería tales como: Diseño Conceptual que es la primer propuesta sobre como se resuelve cada uno de los requerimientos, ya sea basadas en conceptos ya existentes o en ideas originales; Diseño Preliminar, en el cual se hace una descripción detallada de cada componente, una matriz de verificación de las especificaciones así como se establece un presupuesto de errores de cada sistema; Diseño Crítico o Diseño de Detalle que es la parte final antes de pasar a la fabricación y donde cada una de las especificaciones se deberá demostrar por medios analíticos o por simulaciones de computadora; y finalmente la Aceptación en Fábrica que permite al grupo científico verificar que las especificaciones sean satisfechas por el instrumento. Cada etapa antes descrita debe ser documentada y debe seguir con lineamientos estrictos preestablecidos bajo cierta normatividad.

El objetivo de la participación mexicana en el proyecto del Gran Telescopio Canarias (*GTC*) es que los astrónomos mexicanos tengan tiempo de observación en el telescopio. Parte de la colaboración del Instituto de Astronomía de la UNAM es el desarrollo, diseño y fabricación de instrumentos científicos para este telescopio. En este trabajo se presentan el Diseño Conceptual, Preliminar y Crítico del Barril de la Cámara del Instrumento Científico OSIRIS para el *GTC*.

Proyectos licitados internacionalmente, como son los instrumentos para el *GTC*, son desarrollados por primera vez en la historia de nuestra *alma mater*. El proceso de licitación implica trabajo organizado y bajo estándares estrictos de gestión, diseño, fabricación y aceptación.

I.1. Breve historia de la óptica

La historia del desarrollo óptico es una de las mejores registradas y ricas de la ciencia [REF iii]. Se tienen registros de todas partes del mundo y un sin fin de ejemplos de aplicación que marcaron la pauta a seguir tanto de la tecnología como del entendimiento humano. Incluso, la óptica misma, ha ayudado a derribar creencias y mitos sociales; tal es el caso de Galileo Galilei (1564-1642) al afirmar que la Tierra no era el centro del universo. Como parte de esta breve introducción se muestra un cuadro sinóptico de la historia de la óptica y algunas referencias a diversos textos.

Los orígenes de la tecnología óptica datan de la remota antigüedad. Los primeros espejos se hicieron de cobre pulido, bronce, y más tarde de *speculum*, una aleación de cobre rica en estaño. Algunos especímenes del antiguo Egipto han sobrevivido - un espejo en perfectas condiciones fue desenterrado junto con algunas herramientas del cuartel de trabajadores cerca de la pirámide de Sesostris 11 (ca. 1900 a.C.) en el valle del Nilo. Los filósofos griegos, Pitágoras., Demócrito, Empédocles. Platón, Aristóteles y otros desarrollaron varias teorías de la naturaleza de la luz. La propagación rectilínea de la luz era conocida, como lo era la ley de la reflexión enunciada por Euclides (300 a.C.) en su libro *Catóptrica*. Hero de Alejandría trató de explicar ambos de estos fenómenos afirmando que la luz viaja a lo largo del camino más corto entre dos puntos. Aristófanes en su sátira «Las nubes» (424 a.C.) aludía al vidrio quemador (una lente positiva). El doblamiento aparente de los objetos parcialmente sumergidos en agua se menciona en La república de Platón [REF i].

La refracción fue estudiada por Cleomedes (50 d.C.) y más tarde por Claudio Tolomeo (130 d.C.) de Alejandría, quien tabuló medidas muy precisas de los ángulos de incidencia y refracción para varios medios. Es claro, según los escritos del historiador Plinio (23-79 d.C.), que los romanos también poseían vidrios quemadores. Varias esferas de vidrio y cristal que probablemente fueron usadas para comenzar fuegos han sido encontradas entre las ruinas romanas y se recuperó una lente plano-convexa en Pompeya. El filósofo romano Séneca (3 a.C.-65 d.C.) notó que un globo de vidrio lleno de agua se podía usar con el fin de aumentar. Es ciertamente posible que algunos artesanos romanos hayan podido usar vidrios de aumento para facilitar el trabajo con detalle muy fino.

Después de la caída del Imperio Romano Occidental (475 d.C.), que marca aproximadamente el comienzo de la Edad Media, no se produjo casi ningún progreso científico en Europa durante largo tiempo. El dominio de la cultura greco-romano-cristiana en las tierras que abarca el Mediterráneo, pronto cedió por la conquista del régimen de Alá. Alejandría cayó ante los musulmanes en 642 d.C. y a finales del siglo séptimo las tierras del Islam se extendían desde Persia a través de la costa sur del Mediterráneo hasta España. El centro de estudios se corrió al mundo árabe donde los tesoros filosóficos y científicos del pasado fueron traducidos y preservados. Aunque

adormilada, la óptica, en vez de permanecer estática, se desarrolló gracias a Alhazen (1000 d.C.), quien trabajó en la ley de reflexión, poniendo los ángulos de incidencia y reflexión en el mismo plano normal a la internase estudió los espejos esféricos y parabólicos y dio una descripción detallada del ojo humano.

Por la última parte del siglo trece, Europa estaba solamente comenzando a levantarse de su estupor intelectual. Los trabajos de Alhazen fueron traducidos al latín y tuvieron un gran efecto en los escritos de Robert Grosseteste (1175-1253), obispo de Lincoln, y en el matemático polaco Vitello (o Witelo) quienes influyeron en la reiniciación del estudio de la óptica. Sus trabajos fueron conocidos por el franciscano Roger Bacon (1215-1294) quien es considerado por muchos como el primer científico en el sentido moderno. Parece que Bacon inició la idea de usar lentes para corregir la vista y aún sugirió la posibilidad de combinar lentes para formar un telescopio. Bacon también poseía algún conocimiento de la forma en la cual los rayos atraviesan una lente. Después de su muerte, la óptica languideció de nuevo.

Sin embargo, a mediados del siglo XIII, las pinturas europeas mostraban monjes con anteojos. Por su parte, los alquimistas habían logrado una amalgama líquida de estaño y mercurio que se frotaba en la parte posterior de placas de vidrio para hacer espejos. Leonardo da Vinci (1452-1519) describió la *cámara obscura*, más tarde popularizada por el trabajo de Giovanni Battista della Porta (1535-1615). Porta discutió los espejos múltiples y las combinaciones de lentes positivas y negativas en su *Magia naturalis* (1589).

Esta sucesión de acontecimientos modestos, en su mayor parte constituyen lo que se podría llamar el primer período de la óptica. Era sin lugar a duda un comienzo triste, pero en su conjunto fue más un tiempo dedicado a aprender que a lograr avances. El torbellino de logros y la excitación vendría más tarde, en el siglo diecisiete¹.

A continuación se muestra un cuadro sinóptico del desarrollo de la óptica a partir del siglo XVII (véase Tabla 1.1):

¹ Véase Hecht Zajac, Óptica, 1986, referencia *i*.

Tabla 1.1 Cuadro sinóptico de la historia de la óptica a partir del Siglo XVII

Desarrollo histórico de la óptica del Siglo XVII al XIX:

Personaje	Hecho histórico	Año	Lugar
Hans Lippershey (1587-1619)	Primer diseño oficial de un telescopio refractor	1608	Holanda
Galileo Galilei (1564-1642)	Primera observación astronómica por medio de un telescopio. Galileo descubre las lunas de Júpiter.	1610	Italia
Zacharias Janssen (1588-1632)	Primer microscopio		Holanda
Johannes Kepler (1571-1630)	Posterior a Galileo observa los anillos de saturno y publica su obra <i>Dioptricie</i> (véase Nota 1).	1611	Italia
Willebrord Snell (1591-1626)	Postulado de la ley de la refracción.	1621	Holanda
René Descartes (1596-1650)	Leyes complementarias (véase Nota 2).	1637	Francia
Pierre de Fermat (1601-1665)	Nueva ley de la refracción, principio de tiempo mínimo.	1657	Francia
Robert Hooke (1635-1703)	Primero en estudiar patrones de interferencia.	1665	Inglaterra
Isaac Newton (1642-1727)	Teorías ondulatorio y corpuscular de la luz (véase Nota 3).	1665	Inglaterra
	Primer telescopio reflector con 30 aumentos.	1668	
Christiaan Huygens (1629-1695)	Descubre el cambio de la velocidad de la luz al pasar de un medio a otro.	1667	Inglaterra
Leonhard Euler (1707-1783)	Primero en proponer los lentes acromáticos.		
John Dollond (1706-1761)	Construye el primer acroático.	1758	Inglaterra
Thomas Young (1773-1829)	Principio de interferencia (véase Nota 5).	1801	Inglaterra
Jean Fresnel (1788-1827)	Sintetizó la teoría ondulatoria (véase Nota 6).		Normandía
Michael Faraday (1791-1867)	Relación entre el electromagnetismo y la luz.	1845	
Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896)	Primera medición de la velocidad de la luz (37km/s).	1849	Francia
J. Bernar Léon Foucault (1819-1868)	Tesis doctoral acerca de la velocidad de la luz.		Francia
James Clerk Maxwell (1831-1879)	Leyes del electromagnetismo.		
George Biddell Airy (1801-1892)	Estudio sobre las aberraciones ópticas.	1871	Inglaterra
A. Abraham Michelson (1852-1931)	Medición de la velocidad de la luz (67000 millas/h).		Polonia
Edward Williams Morley (1838-1923)	Junto con Michelson proponen la velocidad de la luz constante e independiente del medio.	1881	EUA
Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)	Verificó la existencia de ondas electromagnéticas.	1888	Hamburgo

Nota 1: En una carta a Kepler, Galileo escribió:

¿Por qué no está usted aquí? ¡Qué gritos de risa debemos tener en esta gloriosa locura! Y oír al profesor de filosofía en Pisa trabajando ante el Gran Duque con argumentos lógicos, como si con encantos mágicos borrara del cielo los nuevos planetas.

Nota 2: Fragmento de La Dioptrique de René Descartes:

... recordando la naturaleza que yo he atribuido a la luz, cuando dije que no es otra cosa que un cierto movimiento o una acción concebida en una materia muy sutil, la cual llena los poros de todos los otros cuerpos...

Nota 3: Texto del trabajo de Newton:

Yo me procuré un prisma triangular de vidrio para probar con él el celebrado fenómeno de los colores.

Nota 4: Texto del trabajo de Huygens

Como hay dos diferentes refracciones, yo concebí también que hay dos diferentes emanaciones de las ondas de luz...

Nota 5: Del trabajo del Dr. Thomas Young.

Cuando dos ondulaciones de diferentes orígenes coinciden perfectamente en dirección o casi coinciden, su efecto conjunto es una combinación de los movimientos que pertenecen a cada uno.

Nota 6: En las palabras de Fresnel:

Las vibraciones de una onda luminosa en cualquiera de sus puntos se pueden considerar como la suma de los movimientos elementales que le llegan en el mismo instante, por la acción separada de todas las porciones de la onda no obstruida considerada en una de sus posiciones anteriores.

El desarrollo de la óptica durante el siglo XX fue vertiginoso, a continuación se hace una breve reseña. Jules Henri Poincaré (1854-1912) fue quizá el primero en percatarse del significado de la incapacidad experimentada para observar cualquier efecto del movimiento relativo al éter – *medio que se creía que estaba presente en todo el universo*. En 1899 comenzó a hacer sus conocidas observaciones y en 1900 dijo:

¿Nuestro éter, realmente existe? Yo no creo que observaciones más precisas nos puedan revelar algo más que desplazamientos relativos.

En 1905 Albert Einstein (1879-1955) introdujo su teoría especial de la relatividad en la cual él también, muy independientemente, rechazó la hipótesis del éter:

La luz se propaga en el espacio siempre con la velocidad c la cual es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor.

Los experimentos de Fizeau, Airy y Michelson-Morley fueron entonces explicados de manera muy natural dentro del marco de la cinemática relativista de Einstein. Despojados del éter, los físicos tuvieron simplemente que acostumbrarse a la idea de que las ondas electromagnéticas se podían propagar a través del espacio libre: no había otra alternativa.

La luz era ahora visualizada como una onda auto-sustentada con el énfasis conceptual al pasar del éter al campo. La onda electromagnética quedó como una entidad en sí misma.

El 19 de octubre de 1900, Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) leyó un artículo ante la German Physical Society en el cual introdujo los comienzos de lo que sería otra gran revolución en el pensamiento científico: la mecánica cuántica, una teoría que abarca los fenómenos submicroscópicos. En 1905, basándose en estas ideas, Einstein propuso una nueva forma de teoría corpuscular en la cual aseguraba que la luz consistía de globos o estelar«partículas» de energía. Cada uno de tales cuantos de energía radiante o fotones, como se les habría de llamar, tenían una energía proporcional a su frecuencia ν , es decir; $P = h\nu$; donde h es conocida como la constante de Planck. Al final de la década del veinte, a través de los esfuerzos de hombres tales como Bohr, Born, Heisenberg, Schrödinger, De Broglie, Pauli, Dirac y varios otros, la mecánica cuántica quedó como una estructura bien establecida. Gradualmente se hizo evidente que los conceptos de partícula y de onda, que en el mundo macroscópico parecen ser mutuamente excluyentes, deben juntarse en el dominio submicroscópico. La imagen mental de una tal partícula atómica (electrones, neutrones, etc.) como un trozo localizado de materia, ya no satisface.

En efecto, se encontró que estas «partículas» podían generar patrones de interferencia y de difracción precisamente en la misma forma que la luz. Entonces los fotones, los protones, los electrones, los neutrones, etc., todos ellos, tienen ambas manifestaciones de partículas y de ondas. La relatividad liberó a la luz del éter y mostró la afinidad entre masa y energía. Las que parecían ser dos cantidades casi antitéticas ahora se hicieron intercambiables. La mecánica cuántica siguió adelante para establecer que una partícula de momento p , tiene una longitud de onda asociada λ tal que $p = h/\lambda$ (tenga o no tenga masa en reposo). El neutrino o partícula neutra con masa en reposo igual a cero, fue postulado por razones teóricas en 1930 por Wolfgang Pauli (1900-1958) y verificada experimentalmente más tarde en la década del cincuenta. Las imágenes sencillas de trozos de materia submicroscópicos se hicieron insostenibles y la dicotomía onda-partícula se disolvió en una dualidad.

La mecánica cuántica también trata la manera en la cual la luz es absorbida y emitida por los átomos. Supongamos que hacemos que un gas brille calentándolo o pasando una descarga eléctrica a través de él. La luz emitida es característica de la estructura de los átomos que constituyen el gas. La espectroscopía, que es una rama de la óptica que tiene que ver con el análisis espectral, se desarrolló a partir de las investigaciones de Newton. William Hyde Wollaston (1766-1828) hizo las primeras observaciones de las líneas oscuras del espectro solar (1802). Debido a la forma de rendija de la abertura generalmente usada en los espectroscopios, la salida consistía en bandas angostas y coloreadas de luz, las llamadas líneas espectrales. Independientemente, Joseph Fraunhofer (1787-1826) amplió mucho el tema. Después de descubrir accidentalmente la línea doble del sodio, comenzó a estudiar la luz solar e hizo las primeras determinaciones de longitudes de onda usando redes de difracción. Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887)

y Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899), trabajando conjuntamente en Heidelberg, establecieron que cada tipo de átomo tenía su propia firma en un arreglo característico de líneas espectrales. En 1913 Nicis David Bohr (1885-1962) expuso una teoría cuántica precursora del átomo de hidrógeno, que podía, sin embargo, predecir las longitudes de onda de su espectro de emisión.

Ahora se entiende que la luz emitida por un átomo se debe a sus electrones exteriores. Un átomo que de alguna manera absorbe energía (ejemplo, vía colisiones) pasa de su configuración usual, conocida como el estado estacionario, a lo que se llama un estado excitado. Después de algún tiempo finito se relaja para volver al estado estacionario y los electrones vuelven a su configuración original con respecto al núcleo, liberando el exceso de energía a menudo en la forma de luz. El proceso es del dominio de la teoría cuántica moderna que describe los detalles más pequeños con increíble precisión y belleza.

El florecimiento de la óptica aplicada en lo que ha transcurrido de la segunda mitad del siglo veinte, representa un renacimiento en sí mismo. En la década del 50 varios investigadores comenzaron a mezclar la óptica con técnicas matemáticas y los puntos de vista de la teoría las comunicaciones. Justamente como la idea del momo lineal provee otra dimensión con la cual visualizar aspectos de la mecánica, el concepto de frecuencia espacial es una forma nueva y rica de apreciar un amplio rango de fenómenos ópticos. Unidos por el formalismo matemático del análisis de Fourier, este énfasis contemporánea tenido gran trascendencia. De interés particular es la te de la formación y evaluación de imágenes, las función de transferencia y la idea de filtrado espacial [i].

El advenimiento de las computadoras digitales en tiempos recientes, ha permitido que el estudio de la óptica se haya movido al frente del pensamiento científico y tecnológico con un torbellino de actividad, una serie notable de logros y una promesa casi deslumbradora de cosas por venir. La antigua y venerable ciencia, construida en la estructura magnífica de la teoría electromagnética, nunca ha perdido su atractivo general ni su aplicabilidad. Aun así, estamos en medio de una excitante metamorfosis teórica y técnica [del prefacio de la referencia i].

I.2. Lentes y cámaras en los telescopios

Cualquier instrumento científico que se utilice para observar algún objeto celeste utiliza lentes para adquirir la información necesaria para realizar el estudio. Un lente, como se ha descrito durante el tema anterior, es un medio a través del cual pasa la luz y sufre sutiles cambios. Por ejemplo, una lupa que sirve para dar aumento a una pequeña marca en un mapa topológico; o bien que sirve para concentrar la luz del Sol para quemar una hoja de árbol.

El telescopio utiliza una gran variedad de lentes, en diferentes arreglos, que le permiten concentrar la luz en cierta posición específica y con una inclinación adecuada para recabar la información que la luz trae consigo misma, los fotones.

Un sistema conformado por un solo lente, puede no ser suficiente para lograr la calidad de imagen deseada para cierta investigación; por ejemplo, para observar el número de lunas que tiene Júpiter o una nebulosa distante (véase Figura 1.1). Esto es debido principalmente a dos causas; errores de manufactura y a las aberraciones. Pocas veces nos detenemos a pensar en las superficies ópticas que transforman un simple vidrio en una lente, y aún menos común es imaginar que la rugosidad inherente de las mismas provoca que la luz no se concentre correctamente. También es muy importante el radio de curvatura de estas superficies, ya que si no es el adecuado la posición de observación varía generando que la imagen se vea borrosa, entre muchos otros defectos [REF ii]. La aberración por si misma es un problema natural de la física de los lentes, que provoca que la luz, compuesta de un campo electromagnético, se desfase y no toda la energía converja al mismo lugar; por ejemplo, la luz roja y la luz azul.

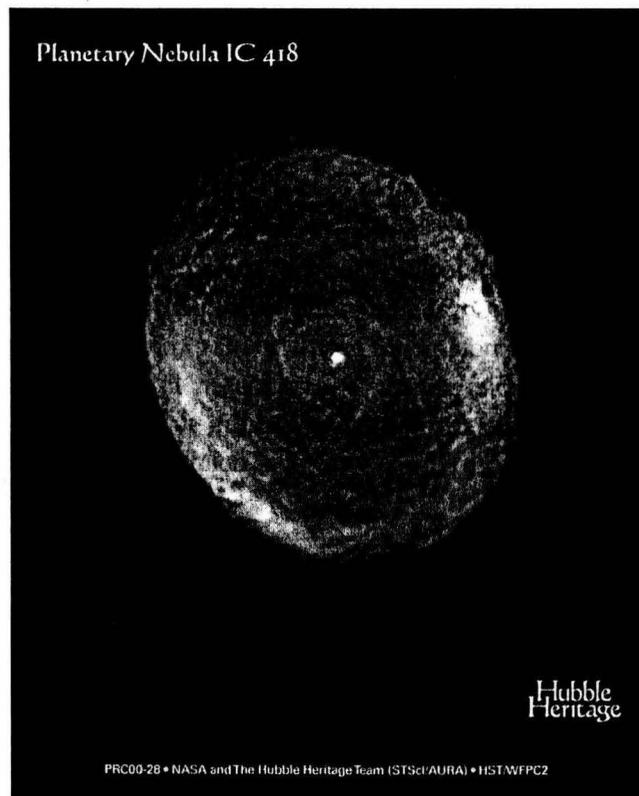


Figura 1.1 Nebulosa del Espirógrafo (NASA).

Los grandes y modernos telescopios que se usan hoy día para explorar el universo definen su capacidad en función de los instrumentos que tienen. Por ejemplo, el conjunto de telescopios *VLT* (Very Large Telescope), que son cuatro telescopios con un espejo primario de 8.4 m, y que actualmente son los mejor equipados del mundo solo tienen 10 instrumentos astronómicos. Esto es debido al gran costo que implica cada uno y a la dificultad técnica de elaborarlos. En la Tabla 1.2 se muestra un resumen de los principales y más modernos telescopios del mundo y el número de instrumentos científicos que tienen para operar.

TABLA 1.2 Instrumentos de los principales telescopios del mundo

Telescopio (número)	Número de Instrumentos	País
KECK (2)	9	EUA
HET	3	EUA
SUBARU	7	Japón
VLT (4)	10	CE*
Gemini	12	EUA
Magellan	6	EUA
MMT	12	EUA

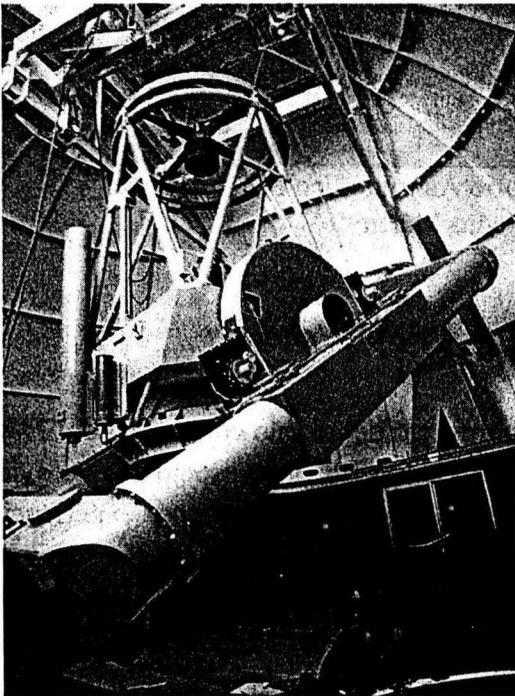
* Comunidad Europea

Referencias

-
- i Hecht Eugene, *Óptica*, Editorial Addison Wesley, EUA 1986.
 - ii Yoder Paul, *Mounting Optics in Optical Instruments*, Editorial SPIE Press, EUA 2002.
 - iii Galindo, Jesús, *Lajas celestes*, CONACULTA – INAH, México 2003
 - iv Malacara Daniel, *Telescopios y Estrellas*, Editorial Fondo de Cultura Económica, México 1988.

II. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El origen del Instituto de Astronomía de la UNAM se remonta a 1867 con motivo de la creación del Observatorio Astronómico Nacional (OAN), que se inició como un pequeño observatorio en la azotea del Palacio Nacional en el centro de la Ciudad de México. Como consecuencia del crecimiento de la ciudad, este observatorio fue trasladado primero al Castillo de Chapultepec (1878) y posteriormente al edificio conocido como el Observatorio de Tacubaya, inaugurado en 1908. En 1929 cuando se expide el decreto de autonomía de la UNAM, el OAN es incorporado a la Universidad Nacional Autónoma de México. En 1951 se funda la estación del OAN (UNAM) en Tonantzintla, Puebla, contigua al Observatorio Astrofísico Nacional de la Secretaría de Educación Pública y en 1961 la UNAM inaugura el telescopio de 1 m de diámetro en su óptica principal en Tonantzintla (véase referencia *i*).



En 1967, se le reconoce su categoría de Instituto de Investigación al OAN, por lo que se crea el Instituto de Astronomía de la UNAM (IAUNAM). Por la contaminación luminosa de la Ciudad de Puebla a 12 km del observatorio, en la segunda mitad de la década de los 60's, se inician las investigaciones para la selección de un sitio con propiedades climatológicas óptimas para la instalación de nuevos telescopios en el país. Se encontró que la Sierra San Pedro Mártir, en la parte norte de Baja California es una de las regiones del mundo con la mejor calidad de cielo para realizar observaciones (otras regiones se localizan en Hawái, en la Isla de la Palma en España y en el norte de Chile).

Figura 1. Telescopio de 2.12 m del Observatorio Astronómico Nacional

En 1971 la UNAM instaló los telescopios de 1.5 m y de 84 cm de diámetro en el Parque Nacional de la Sierra de San Pedro Mártir (*SPM*), convirtiéndose así también en el principal y más constante guardián del mismo. En el año 1979 se inauguró el telescopio de 2.1 m diseñado y fabricado por la UNAM (véase Figura 1 y 2). Desde entonces se han adquirido, desarrollado e instalado numerosos instrumentos para los telescopios del OAN/SPM para realizar observaciones en diferentes regiones del espectro electromagnético. Observaciones realizadas con estos telescopios y sus instrumentos periféricos dieron lugar a un gran número de investigaciones con resultados astronómicos originales que han sido publicados en revistas especializadas del más alto nivel en el plano internacional.

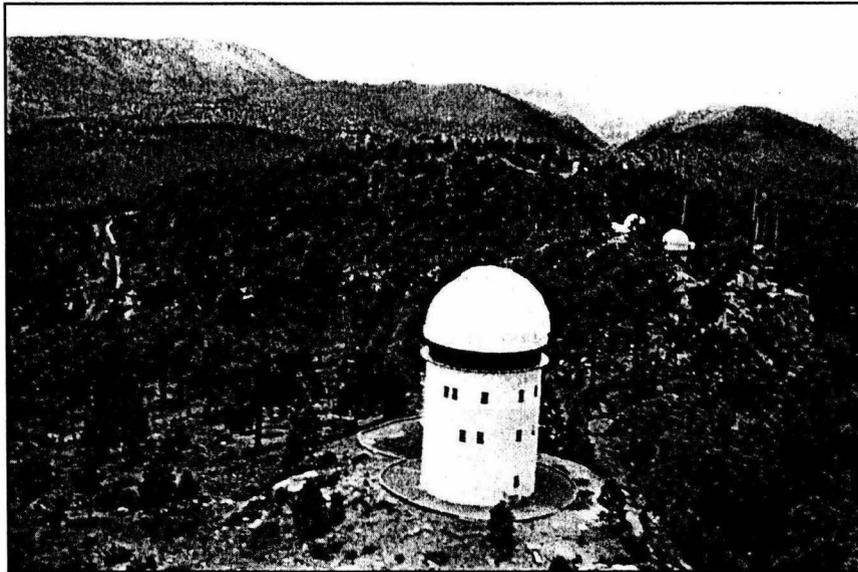


Figura 2. Fotografía del Observatorio Astronómico Nacional en la sierra de San Pedro Mártir

II.1. Telescopio Infrarrojo Mexicano (*TIM*)

En recientes fechas el instituto ha trabajado en el proyecto del diseño conceptual del *TIM*, el cual es un telescopio de aproximadamente 7 m de diámetro en su espejo primario del tipo segmentado (véase Figura 3 y 4). Este proyecto ha permitido obtener experiencia valiosa y aprender los requerimientos de un instrumento como este. Uno de los temas más interesantes desarrollados en este proyecto, es hacer que su óptica segmentada funcione como si fuera monolítica (véase referencia *ii*). Cada uno de los segmentos tiene seis grados de libertad, para controlarlos se requiere de actuadores y sensores precisos y exactos, las estructuras mecánicas que los soportan deben ser de alta rigidez. Como parte

del diseño se analizaron diferentes componentes del telescopio por el Método del Elemento Finito (*MEF*). En específico, el análisis estructural de la celda que sostiene el espejo primario del *TIM*, la cual es una de las partes más importantes de la estructura ya que sostiene directamente el espejo primario. Esta estructura se encuentra sometida a esfuerzos, causando deformaciones; estas deformaciones no deben ser mayores a 150 micrómetros, valor máximo de la tolerancia permisible (véase Figura 5 y 6). El propósito de este trabajo fue alcanzar estos requerimientos usando diseño asistido por computadora estudiando y aplicando las técnicas del Diseño Conceptual a más de 280 modelos.



Figura 3. Modelo virtual del concepto para el Telescopio Infrarrojo Mexicano

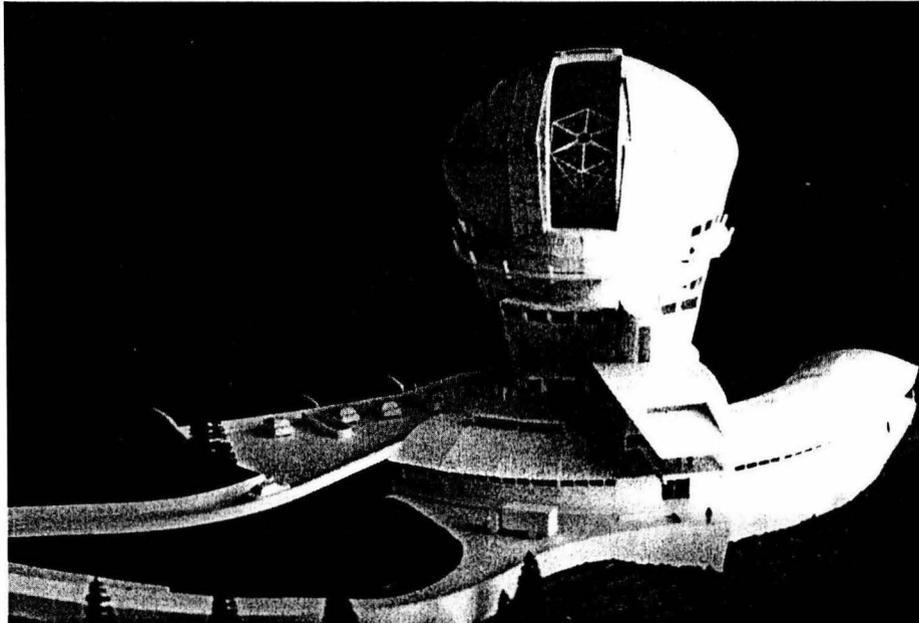


Figura 4. Maqueta conceptual del edificio del Telescopio Infrarrojo Mexicano

El diseño de un instrumento científico con fines astronómicos siempre se encuentra en un entorno poco favorable. Las dimensiones y el peso que tienen son del orden de metros y de toneladas, mientras que para que tengan un correcto funcionamiento sus especificaciones son de unas cuantas micras bajo condiciones ambientales poco favorables.

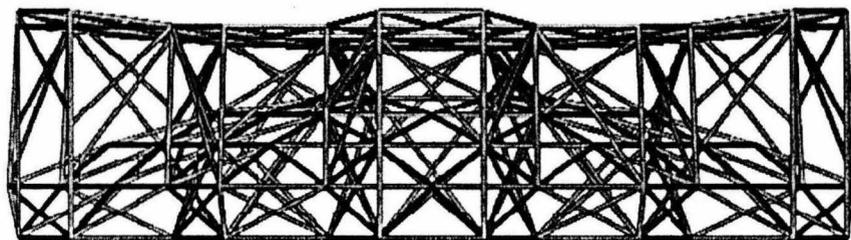


Figura 5. Modelo tridimensional de la celda para el espejo primario del Telescopio Infrarrojo Mexicano

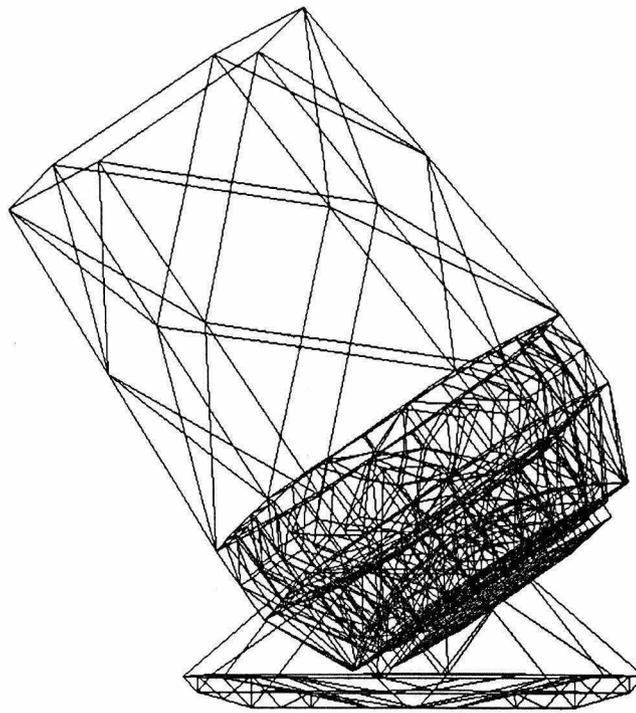


Figura 6. Modelo tridimensional en elementos finitos del Telescopio Infrarrojo Mexicano

II.2. Proyecto del Gran Telescopio Canarias

La investigación científica de frontera requiere cada vez de nuevos y más sofisticados instrumentos científicos. Tal es la motivación que impulsa el desarrollo del Gran Telescopio Canarias (GTC) con un espejo primario de 10.4 m de diámetro. La ubicación donde será instalado este instrumento es en uno de los mejores lugares del hemisferio norte para la observación astronómica, en la Isla Canaria de la Palma en España. La “primera luz”, el día en que el telescopio haga su primera observación, se espera que sea en el año 2004.

Las especificaciones y requerimientos utilizados en el proyecto TIM son del orden de magnitud de los requeridos por telescopios como el GTC. Por tanto, toda la experiencia adquirida es transferible directamente al proyecto GTC. El proyecto GTC es una iniciativa española que cuenta con la participación de México, a través del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM) y del

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Y Estados Unidos, a través de la Universidad de Florida¹.

Las funciones principales de las estructuras del telescopio serán las de soportar el sistema óptico y la instrumentación científica, mantener alineado el sistema con respecto a cualquier objeto astronómico que se observe, así como apuntar y seguirlo con extrema repetibilidad, resolución y precisión. El telescopio tendrá una montura altacimutal convencional, y está formado básicamente por la estructura del telescopio, los cojinetes, los accionamientos y los codificadores de los ejes de acimut y elevación, los rotadores de instrumentos y de cables. Debido a sus características ópticas la distancia focal que tendrá el telescopio es mayor a 30 m, por lo cual las dimensiones generales del telescopio son de 27 m de altura, 28.8 m entre las plataformas y 13 m de ancho. El peso de este coloso de acero será mayor a las 100 toneladas (véase Figura 7 y 8).

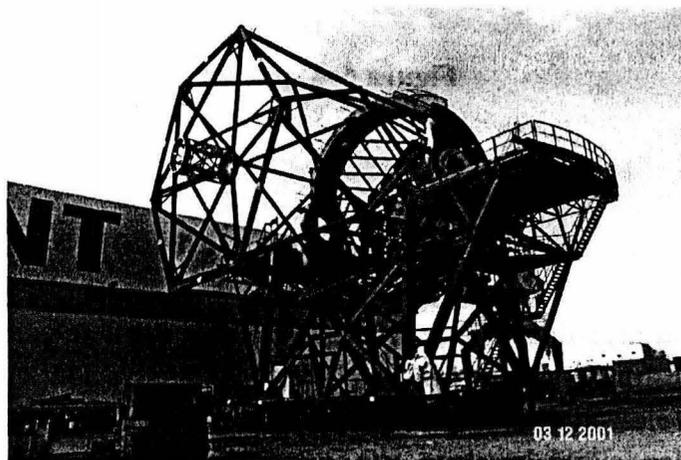
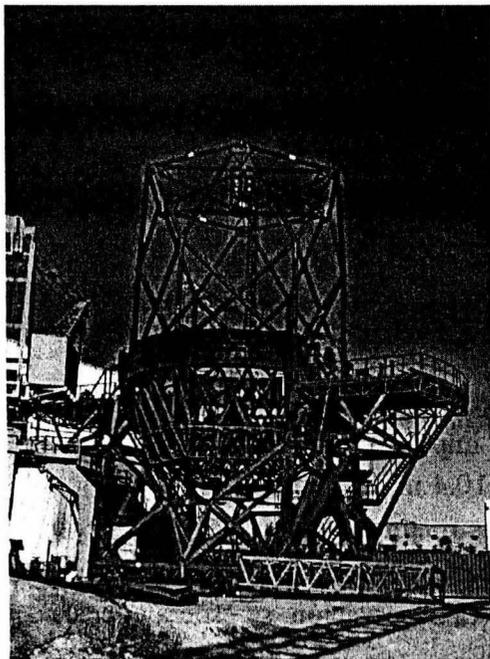


Figura 7. Estructura del telescopio *GTC* durante su proceso de fabricación

Por si lo anterior no fuera suficiente complicación, para alcanzar el desempeño óptimo del telescopio, sus 36 segmentos de su espejo primario deberán mantenerse alineados entre sí con una precisión nanométrica. Por tanto, las estructuras mecánicas de soporte

¹ Véase <http://www.gtc.iac.es/>

tienen el compromiso de ser lo más rígidas posibles con el mínimo peso y ser lo más estables frente a los cambios de las condiciones atmosféricas.

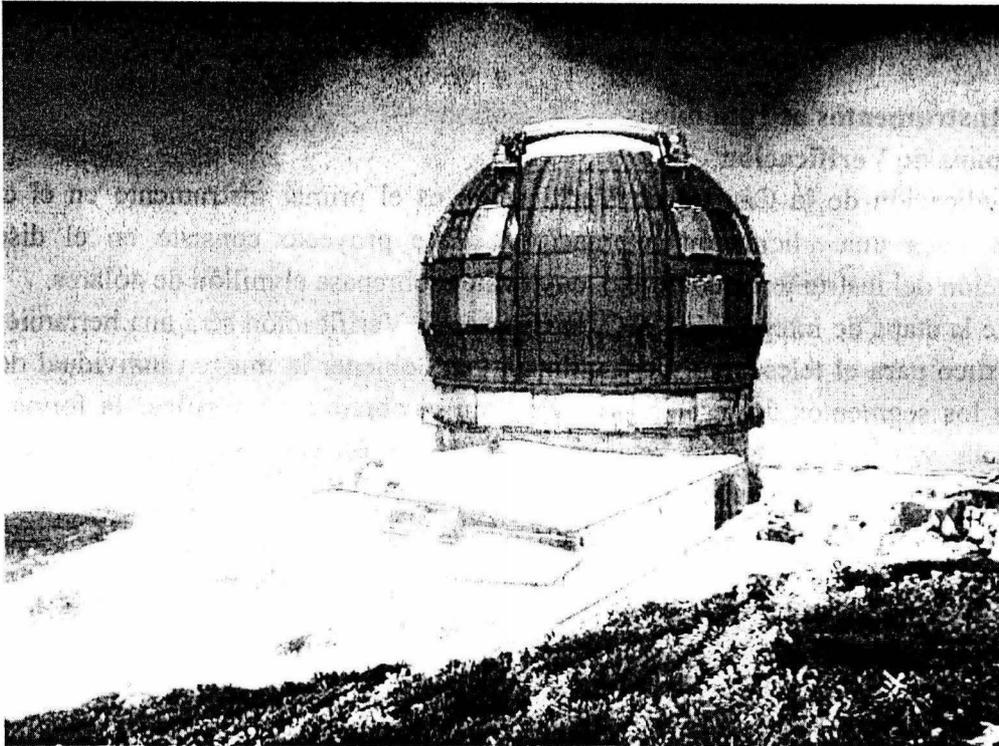


Figura 8. Cúpula para el telescopio *GTC* en la Isla de la Palma, España

IV.3. ¿Por qué los astrónomos mexicanos requieren del uso de un telescopio como el *GTC*?

La respuesta es simple, para que la astronomía de nuestro país continúe estando a la vanguardia, es necesario el uso de instrumentos más poderosos como es el caso del *GTC*. La historia de la astronomía mexicana comienza en tiempos prehispánicos y continúa hasta nuestros días con grandes logros. La colaboración internacional permite a los científicos del mundo avanzar más rápidamente y con mejor eficiencia, también permite compartir la inversión de los instrumentos científicos. Los astrónomos mexicanos han trabajado bajo este esquema varias décadas, y gracias a esta colaboración multidisciplinaria, los ingenieros que desarrollan instrumentos para telescopios tienen la oportunidad de conseguir, por medio del diseño de instrumentos, tiempo de observación en el *GTC*.

Este es el primer paso para que en un futuro no muy lejano y con el apoyo internacional construya un gran telescopio para el OAN. Por eso es de suma importancia la experiencia

que se está adquiriendo en este proyecto. La participación mexicana en el GTC, en específico del Instituto de Astronomía de la UNAM, es en el diseño de dos instrumentos, la Cámara de Verificación y OSIRIS.

IV.4. Instrumentos astronómicos

a) Cámara de Verificación

La adjudicación de la Cámara de Verificación es el primer instrumento en el cual la UNAM gana una licitación internacional. Este proyecto consiste en el diseño y fabricación del instrumento completo, cuyo valor sobrepasa el millón de dólares.

Durante la etapa de integración GTC, la Cámara de Verificación será una herramienta de diagnóstico para el telescopio. Será utilizada para obtener la imagen individual de cada uno de los segmentos del espejo primario, con el objetivo de verificar la forma de su superficie y su alineamiento relativo entre ellos. Es por esto que la Cámara de Verificación necesita una alta calidad de imagen para permitir identificar fuentes de error y correcciones iterativas. Se puede decir que es un calibrador del espejo segmentado (véase Figura 9).

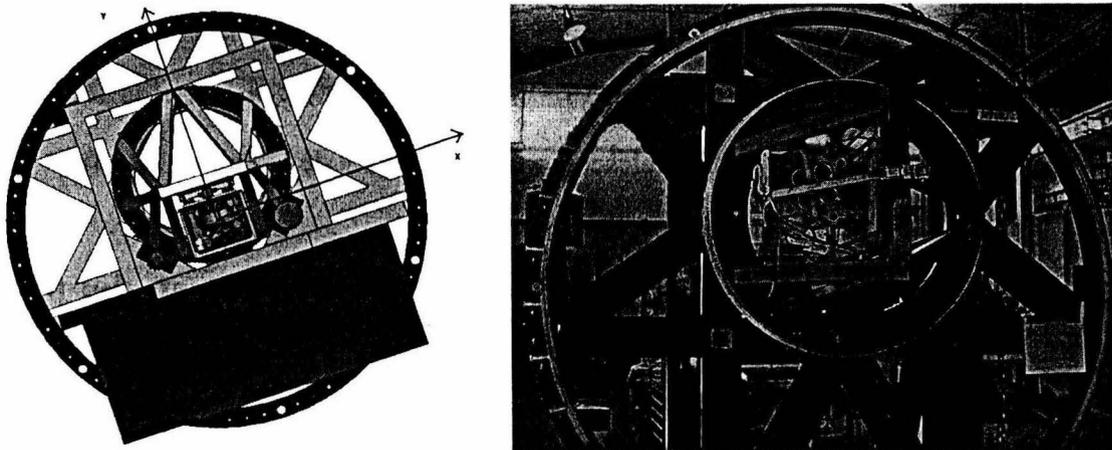


Figura 9. Cámara de verificación para el telescopio *GTC*, el diámetro máximo del instrumento es de 2 m.

El trabajo que se presenta como parte de este proyecto incluye el diseño de las estructuras mecánicas de soporte para el Instrumento.

b) Barril de la Cámara para OSIRIS

OSIRIS es un sistema óptico para adquisición de imágenes de baja resolución, este instrumento también puede funcionar como un espectrógrafo multiobjetos cubriendo las longitudes de onda en el intervalo de 0.365 a 1.0 μm . OSIRIS representa la nueva generación de técnicas instrumentales de observación astronómica, que incluye conceptos

tales como: rueda de filtros y acarreo de carga en el detector CCD (véase Referencia *i*). OSIRIS deberá operar el “día uno” de la puesta en funcionamiento del telescopio. Este instrumento deberá ser colocado en el rotador mecánico del GTC sin necesidad de soportes extras. La finalidad del instrumento científico OSIRIS es realizar investigación astronómica de punta.

La óptica principal de OSIRIS son 8 lentes de características muy especiales, con formas muy delicadas y de costos muy elevados. Este sistema óptico está contenido en el Barril de la Cámara.

IV.5. Derrama tecnológica

El Instituto de Astronomía cuenta con un equipo de físicos y diseñadores especializados en el desarrollo de instrumentos de alta precisión. Su capacidad teórica y práctica se ve consumada hasta el momento en que el cúmulo de información obtenida con los instrumentos desarrollados permite llegar a una conclusión acerca del universo. Sin embargo, existe un puente que une estos dos procesos creativos, la fabricación del instrumento. La infraestructura necesaria para este fin, por lo general, está fuera del alcance de una institución como el IA-UNAM, por lo que es necesario que la industria participe en la etapa de manufactura. Como se ha platicado anteriormente, las especificaciones y requerimientos para un instrumento de esta naturaleza son poco convencionales, y gracias a esto, la industria genera conocimiento (Know How) que después puede aplicar para el desarrollo de un nuevo producto o servicio; de otra manera, los recursos, el tiempo y los fines industriales hubieran impedido generar este conocimiento. La Cámara de Verificación y el Barril de la cámara para OSIRIS son un ejemplo de este proceso llamado derrama tecnológica. Cuyos diseños fueron realizados en el IA-UNAM y su fabricación fue hecha por diversas empresas de la industria mexicana e internacional.

IV.6. Aspectos novedosos

En la historia del IA-UNAM es la primera vez que se participa en el diseño y fabricación de instrumentos para un mega-telescopio (GTC). También es la primera vez que se gana en forma de concurso abierto y de licitación internacional el desarrollo de un proyecto.

El apego a normatividad internacional y a estándares de calidad son temas comunes en el ámbito industrial. Sin embargo, los proyectos académicos que siguen estas reglas son pocos. El desarrollo de los dos instrumentos (por tanto el trabajo de este proyecto) para el GTC son con estos criterios.

Las técnicas del diseño conceptual tienen poco tiempo que son aplicadas. En particular, dentro de este trabajo fueron útiles para buscar conceptos óptimos de estructuras para la Cámara de Verificación y de soportes para lentes, sistemas de enfoque, sistemas de corrección de imagen para el Barril de la cámara de OSIRIS.

Todas y cada una de las especificaciones establecidas para los instrumentos tuvieron que pasar por un proceso en el cual se demostró que cada concepto o idea previa a su fabricación; ya sea por cálculos analíticos, aproximados, o experimentación; era factible de alcanzar. Es importante mencionar que el cálculo por elementos finitos de esfuerzos para birrefringencia en componentes ópticos es un tema del que poco se conoce en el mundo y que gracias al trabajo elaborado para el sistema óptico de OSIRIS me motivó para realizar mi doctorado en esta área.

IV.7. Justificación

La historia de la ciencia en nuestro país es y ha sido rica. El desarrollo y beneficio social son influidos directamente por la ciencia que es capaz de generar y aplicar una nación. En la actualidad en una sociedad globalizada las decisiones que toma o deja de tomar un país afectan su economía. La información así como la rapidez del flujo de la misma son indicadores del nivel de vida que cada individuo puede alcanzar. La ciencia, como motor de nuestro desarrollo social, nos permite modificar estos indicadores de manera sustancial. En específico, la astronomía mexicana ha impulsado el crecimiento global gracias a la colaboración internacional de nuestros científicos, así como fue de las primeras gestoras de la comunicación remota de información digital en México (1987). Ambas semillas han tenido un impacto notorio en nuestra sociedad.

El Instituto de Astronomía (IA-UNAM) ha colaborado con un gran número de países en diversos proyectos científicos que han generado múltiples beneficios no tan solo a la ciencia sino también a la ingeniería. Hoy día la colaboración en el proyecto español del Gran Telescopio Canarias (GTC) es una gran oportunidad para astrónomos e ingenieros mexicanos de estar a la vanguardia. La investigación científica que permitirá hacer el GTC abarca desde agujeros negros hasta la búsqueda de planetas fuera de nuestro sistema solar pasando a través de formación, población y explosión estelar, galaxias activas y primigenias y cosmología.

El costo de observación por noche en un telescopio como el GTC es muy elevado (varios miles de dólares), y la instrumentación científica que requiere es sofisticada, de alto desempeño y de varios millones de dólares. La experiencia acumulada por el IA-UNAM en el desarrollo de instrumentos para los telescopios del Observatorio Astronómico

Nacional (OAN) y el trabajo de diseño en el proyecto del Telescopio Infrarrojo Mexicano (TIM) permiten que la participación mexicana en el proyecto GTC sea tanto científica como de ingeniería. Logrando así participar en la instrumentación astronómica para el telescopio español. Para los ingenieros mexicanos que hemos estado involucrados, directa o indirectamente, con el diseño de los instrumentos para este telescopio es una oportunidad para aplicar e incursionar en nuevas áreas del conocimiento. Se ha participado en el desarrollo de dos instrumentos: la Cámara de Verificación y en el Instrumento Científico OSIRIS. Los cuales han sido adjudicados a través de licitaciones y concursos internacionales (respectivamente), compitiendo con países como Francia, Suiza y España, con el seguimiento de “árbitros especializados” que califican la viabilidad y calidad de cada propuesta.

El desarrollo de los instrumentos ha sido siguiendo técnicas modernas de diseño (matrices de verificación, análisis por elementos finitos y numéricos, fabricación por control numérico,...) y normas estandarizadas internacionales, teniendo como consecuencia una derrama tecnológica a la industria del país. El valor del trabajo hecho en México será una inversión para que nuestros astrónomos puedan utilizar este telescopio de alta tecnología. La colaboración entre academia e industria ha plasmado beneficios mutuos en semillas que pronto germinarán.

Referencias

-
- i Galindo, Jesus, *Lajas celestes*, CONACULTA – INAH, México 2003
 - ii Cruz-González, Irene, *Proyecto del Telescopio Óptico-Infrarrojo Mexicano*, Instituto de Astronomía (UNAM), México 1998
 - iii A. Farah, J. Godoy, F. Velázquez, C. Espejo, S. Cuevas, UNAM; V. Bringas, A. Manzo, L. del Llano, J. L. Sánchez, A. Chavoya, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (México); N. Devaney, J. Castro, L. Cavaller, GRANTECAN (Spain), “*Finite Element Analysis of the GTC Commissioning Instrument Structure*”, SPIE Proceedings, Astronomical Telescopes and instrumentation, 2002.
 - iv A. Farah, “*Structure analysis of the primary mirror support for the New Technology Optical Infrared Telescope (TIM) using computer-aided finite element method*”, SPIE Proceedings, marzo 2000
 - v Rothbart, *Mechanical Design and Systems*, Handbook, 2^a edición, University of Cambridge, E.U.A., 1985.

III. MARCO TEÓRICO

III.1 La naturaleza de la luz

El trabajo de J.C. Maxwell y desarrollos posteriores mostraron que la luz tiene una naturaleza electromagnética. El punto de vista más moderno de la electrodinámica cuántica describe las interacciones electromagnéticas y el transporte de energía en términos de partículas elementales sin masa conocidas como *fotones* los cuales están localizados en cuantos o globos de energía. La naturaleza cuántica de la energía radiante no siempre se nota fácilmente, ni tampoco es siempre de interés práctico en óptica. Si la longitud de onda de la luz es pequeña en comparación con el tamaño del aparato con el cual se visualiza, uno puede usar como primera aproximación, las técnicas de la óptica geométrica¹. Un tratamiento bastante más preciso, que es aplicable también cuando las dimensiones del aparato son pequeñas, es el de la óptica física, donde la propiedad dominante de la luz es su naturaleza ondulatoria.

Para el diseño de componentes ópticos de cámaras en general, es necesario conocer la forma en que la luz se propaga a través de diversos medios materiales. La propagación de la luz sufre de dos fenómenos básicos, la refracción y la reflexión; en específico cuando la luz atraviesa de un medio a otro se le conoce como refracción. Supongamos, por el momento, que una onda llega a una interfase que separa a dos medios diferentes (por ejemplo una pieza de vidrio en aire). Como sabemos por nuestra experiencia diaria, una parte de la densidad del flujo (luz) incidente será devuelta en la forma de una onda reflejada, mientras que el resto será transmitido a través de la frontera como una onda refractada. El estudio de ambos fenómenos es factible describirlo a partir de las ecuaciones de Maxwell, sin embargo al ser esto muy complicado se utilizan los principios de la óptica geométrica.

¹ Donde todos los modelos matemáticos de la geometría tridimensional pueden aplicarse.

III.1.1 Principio de Huygens

Un frente de onda es una superficie sobre la cual un disturbio óptico tiene una fase constante, la Figura III.1 muestra la porción esférica de un pequeño frente de onda emanando de una fuente monocromática puntual en un medio homogéneo. De la imagen podemos concluir que, si el radio del frente de onda es r , algún tiempo más tarde t , será simplemente $r + vt$, donde v es la velocidad de fase de la onda.

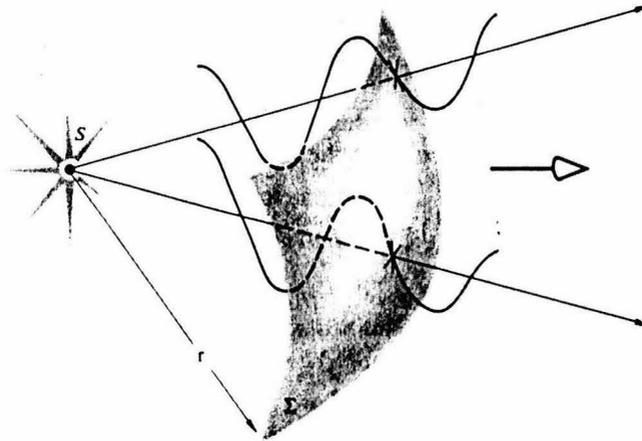


Figura III.1 Segmento de una onda esférica

Supongamos ahora que la luz pasa a través de una hoja de vidrio no uniforme (véase Figura III.2) de tal forma que el frente de onda mismo es distorsionado. Este problema fue resuelto por el holandés Christian Huygens en 1690, en su trabajo titulado “*Traité de la Lumière*”. Este principio se conoce como, el “*Principio de Huygens*”, que dice:

“Cada punto en un frente de onda primario sirve como fuente de ondas esféricas secundarias, de menor tamaño, tales que el frente de onda primario un momento más tarde es la envolvente de éstas ondas. Además, estas ondas avanzan con una rapidez y frecuencia igual a la de la onda primaria en cada punto del espacio.”

Si el medio es homogéneo, las ondas menores pueden construirse con un radio finito, mientras que si no lo es, las ondas tendrán que tener radios infinitesimales, la Figura III.3 muestra este principio. La vista del frente de onda, así como un número de ondas esféricas secundarias, que después de un tiempo t , se han extendido hasta un radio vt . Este proceso es análogo a las vibraciones mecánicas de un medio elástico. Podemos hacer uso de estas ideas en dos diferentes niveles:

- i) Al tratar la teoría de la difracción: por medio de una representación matemática de las ondas secundarias, usándolas para trazar el progreso de una

onda primaria pasando todo tipo de aberturas y obstáculos, sumando todas las contribuciones de las mismas matemáticamente.

ii) Aplicación gráficamente: que se conoce como la construcción de Huygens.

Es importante mencionar que este principio fue complementado poco más tarde por Fresnel y Kirchhoff.

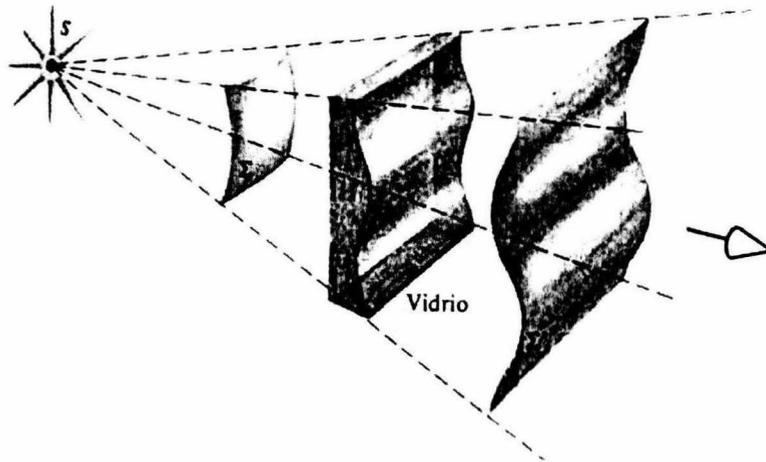


Figura III.2 Distorsión de una porción de un frente de onda al pasar a través de un material de grueso no uniforme

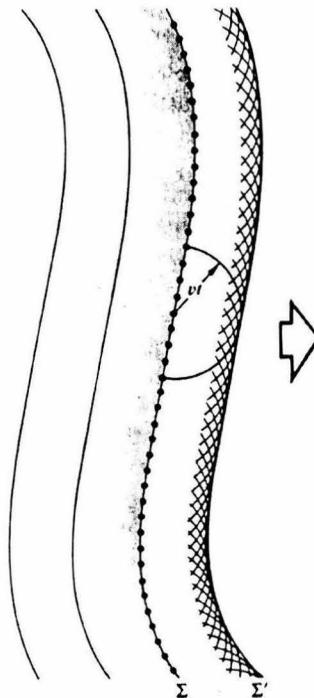


Figura III.3 Propagación de un frente de onda por medio del principio de Huygens

III.1.2 La ley de Snell

Imaginemos que tenemos una onda plana monocromática incidente en la interfase suave que separa dos medios transparentes diferentes como en la Figura III.4; si aplicamos el principio de Huygens podemos ver el comportamiento de las luz. El número de ondas que llegan a la interfase por segundo corresponde a la frecuencia de onda armónica incidente, es decir, ν . Entonces, es claro que las ondas reflejada y transmitida, y por consiguiente todas las ondas secundarias, tendrían la misma frecuencia; la frontera no puede alterar ν .

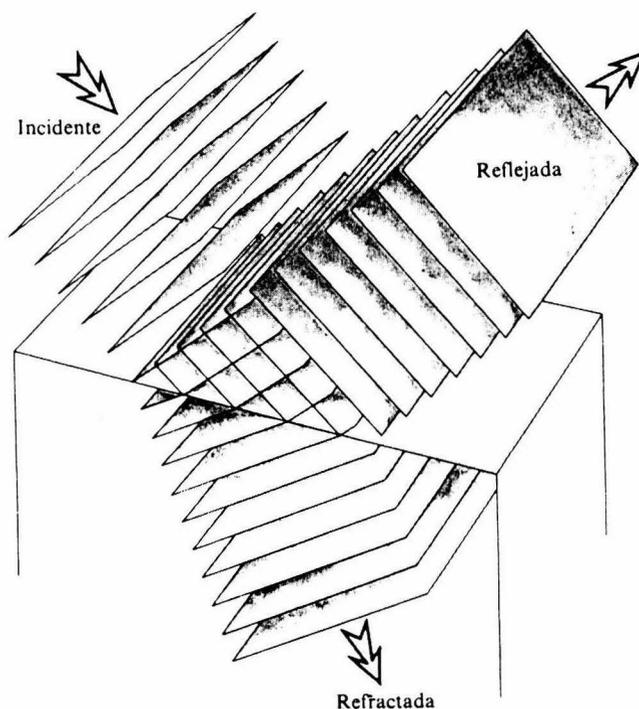


Figura III.4 Reflexión y transmisión de ondas planas

En la Figura III.5 se muestra la reflexión y refracción en una interfase por medio del principio de Huygens de una onda de luz. Obsérvese que;

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{BD} = \frac{\text{sen}\theta_r}{AC} = \frac{\text{sen}\theta_t}{AE} = \frac{1}{AD} \dots \text{(III.1)}$$

Por comparación con la Figura III.5 tenemos que;

$$BD = V_i t ; AC = V_r t ; AE = V_t t \dots \text{(III.2)}$$

substituyendo en las ecuaciones anteriores y anulando t , tenemos;

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{v_i} = \frac{\text{sen}\theta_r}{v_i} = \frac{\text{sen}\theta_t}{v_t} \dots \text{(III.3)}$$

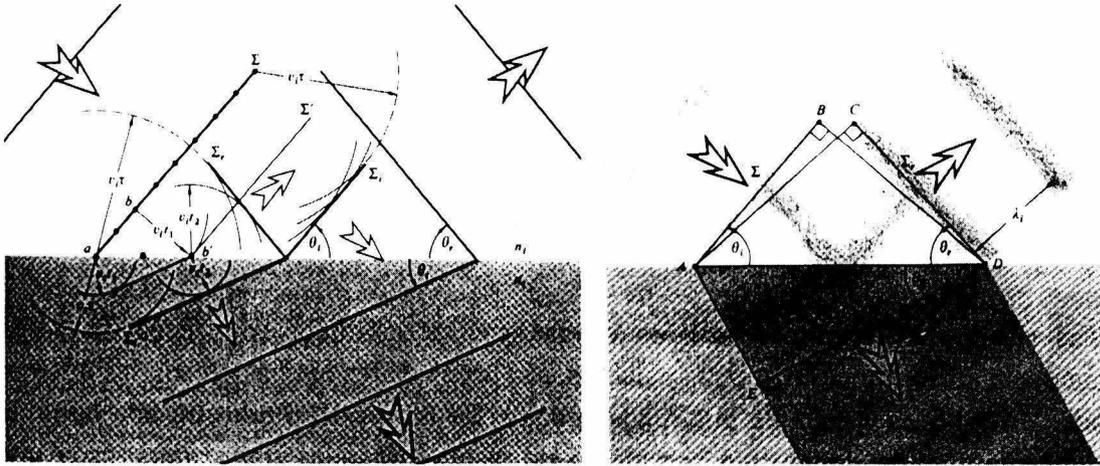


Figura III.5 Reflexión y transmisión en una interfase por medio del principio de Huygens en un instante dado

Se deduce entonces de los dos primeros términos que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, es decir

$$\theta_i = \theta_r \dots \text{(III.4)}$$

Conocida como la ley de la reflexión, ésta apareció por primera vez en el libro titulado *Catóptrica* que se supone fue escrito por Euclides.

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_t} = \frac{v_i}{v_t} = \frac{n_t}{n_i} \dots \text{(III.5)}$$

en su forma más conocida

$$n_i \text{sen}\theta_i = n_t \text{sen}\theta_t \dots \text{(III.6)}$$

donde n es conocido como el índice de refracción.

En este trabajo de tesis el uso de las leyes de reflexión y refracción es limitado, sin embargo su conocimiento y entendimiento son de total importancia ya que en cualquier cámara óptica se presentan ambos fenómenos. El diseño mecánico de soporte para un

sistema óptico que no contempla el comportamiento de la luz a través del mismo puede generar imágenes de baja calidad e imágenes falsas debidas a la reflexión y refracción².

El cambio térmico del medio ambiente en el cual opera un sistema óptico, influye directamente en las propiedades de los materiales que lo conforman. En específico para cámaras de instrumentos astronómicos es menester considerar los cambios en el índice de refracción debido a los esfuerzos inducidos por estos cambios de temperatura.

III.2 Birrefringencia

Muchas sustancias cristalinas (sólidos cuyos arreglos atómicos son repetitivos) son óptimamente anisotrópicas. En otras palabras, sus propiedades ópticas no son las mismas en todas direcciones dentro de una muestra dada. La Figura III.6 muestra una nube de electrones cargada análogamente por medio de resortes (bandas sombreadas), cada uno con una constante de rigidez diferente, simulando un medio anisotrópico. Un electrón que se desplaza del equilibrio a lo largo de una dirección paralela a un juego de “resortes” evidentemente oscilará con diferente frecuencia característica de aquella con la que lo haría si fuera desplazado en otra dirección. La luz se propaga a través de una sustancia transparente excitando a los electrones dentro del medio.

Los electrones son impulsados por el campo **E** (campo eléctrico) y ellos reirradian; ondas secundarias que se recombinan y la onda refractada resultante sigue adelante. La velocidad de la onda, y por consiguiente el índice de refracción está determinado por la diferencia entre la frecuencia del campo **E** y la frecuencia natural o característica de los electrones.

“Una anisotropía en la fuerza de enlace se manifestará por lo tanto en una anisotropía en el índice de refracción”.

Un material que presenta estas variaciones en su índice de refracción se conoce como *birrefringente*³. Si el cristal es tal que la frecuencia de la luz incidente aparece en la vecindad de w_d (véase Figura III.6) reside en la banda de absorción de $n_y(w)$, éste será fuertemente absorbente para una dirección (y) de la polarización y transparente para la otra (x). Un material birrefringente que absorbe uno de los estados ortogonales, dejando pasar el otro, es conocido como dicróico. Además, supongamos que la simetría del cristal es tal que las fuerzas de enlace en las direcciones x y y son idénticas, es decir, cada uno

² También conocidas como fantasmas.

³ La palabra *refringencia* se usaba mucho en lugar de nuestro término más común *refracción*. Viene del latín *refractus* por medio de una raíz etimológica que comienza con *frangere* que significa quebrar.

de estos resortes tiene la misma frecuencia natural y están igualmente estirados. El eje x define ahora la dirección del *eje óptico*. En vista de que un cristal se puede representar por un arreglo de estos osciladores anisotrópicos cargados y orientados, *el eje óptico es en realidad una dirección y no tan sólo una línea*. El modelo trabaja muy bien para cristales dicróicos ya que si la luz se propagara a lo largo del eje óptico (\mathbf{E} en el plano yz) sería fuertemente absorbido, mientras que si se moviera normal a ese eje, emergería linealmente polarizado.

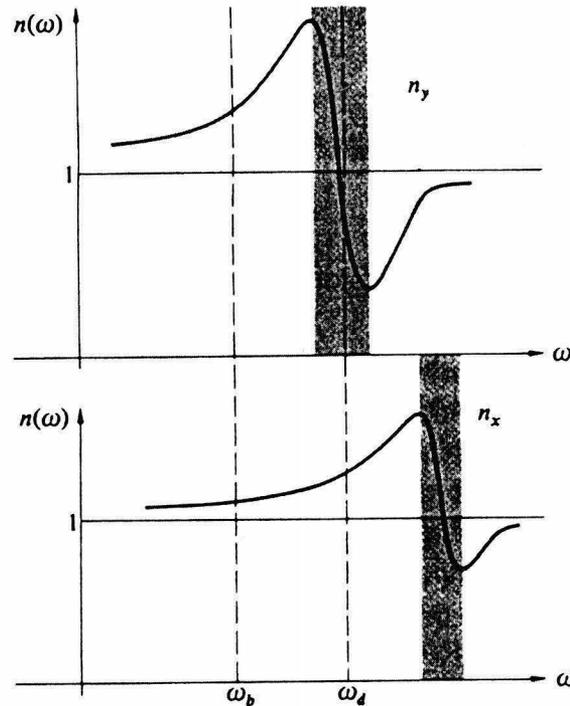


Figura III.6 Índice de refracción contra frecuencia a lo largo de dos ejes de un cristal

A menudo las frecuencias características de cristales birrefringentes están arriba del rango óptico y aparecen sin color. Esto se representa en la Figura III.6 donde la luz incidente se considera ahora que tiene frecuencias en la región de ω_b . Son evidentes dos índices diferentes pero la absorción para cualquier polarización es despreciable. Sabemos que el índice de refracción $n(\omega)$ varía inversamente con la frecuencia natural. Esto significa que una constante de resorte efectiva grande, es decir, enlace fuerte, corresponde a una polarizabilidad baja, una constante dieléctrica baja y un índice de refracción bajo.

III.2.1 Esfuerzo de birrefringencia

Existen un gran número de fenómenos físicos que involucran a la luz *polarizada* todos los cuales comparten la característica común de que han sido inducidos externamente de alguna manera. En estos casos uno ejerce una influencia externa (una fuerza mecánica, magnética o un campo eléctrico) en el medio óptico cambiando así la manera en la que transmite la luz. En 1861 Sir David Brewster descubrió que las sustancias transparentes normalmente isotrópicas se podían hacer óptimamente anisotrópicas por la aplicación de un esfuerzo mecánico. El efecto se conoce de varias maneras, como *birrefringencia mecánica*, *fotoelasticidad* o *esfuerzo de birrefringencia*. Bajo compresión o tensión, el material toma las propiedades de un cristal uniaxial negativo o positivo, respectivamente. En cualquier caso el eje óptico efectivo está en la dirección del esfuerzo y la birrefringencia inducida es proporcional al esfuerzo. Es claro entonces que si el esfuerzo no es uniforme sobre la muestra no lo serán tampoco ni la birrefringencia ni la retardancia impuesta en una onda transmitida.

La *fotoelasticidad* sirve como base de una técnica para estudiar los esfuerzos en estructuras mecánicas tanto transparentes como opacas (véase Figura III.7). Un vidrio inadecuadamente templado o montado sin cuidado, bien sea que sirva como parabrisas de un automóvil o como lente de telescopio, desarrollará esfuerzos internos que pueden ser fácilmente detectados. La información relativa al esfuerzo en superficies de objetos opacos se puede obtener pegando cubiertas *fotoelásticas* a las partes bajo estudio. Más comúnmente se hace un modelo transparente a escala de materiales *ópticamente sensibles a esfuerzos* tales como epoxy, glyptol, o resina poliéster modificado. El modelo se sujeta entonces a las fuerzas que la componente real experimentaría en el uso. Ya que la birrefringencia varía de punto a punto sobre la superficie del modelo, cuando se coloca entre polaroides cruzados, un patrón de franjas muy complicadas y variadas revelará los esfuerzos internos. Al examinar casi cualquier pieza de plástico claro o hasta un trozo de gelatina sin sabor entre dos polaroides, se observan los cambios en el patrón cuando se aplica un esfuerzo mecánico (véase Figura III.7).

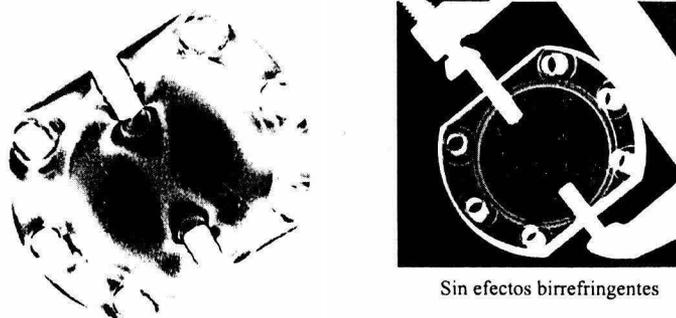


Figura III.7 Esfuerzo birrefringente en un plástico.

El diseño mecánico de la cámara de un instrumento astronómico debe incluir un estudio detallado de esfuerzos en las lentes, para tener la certeza de que los límites que provocan birrefringencia no son alcanzados. De esta manera la calidad de imagen que forma el sistema óptico no se degrada debido a los esfuerzos inducidos.

III.3 Sistemas actuales de sujeción

Por muchos años los diseñadores de lentes se han enfrentado con que el límite del desempeño de los sistemas ópticos no puede ser siempre atribuido a su capacidad en cálculos teóricos, sino también a su habilidad de tomar en cuenta las limitaciones impuestas por el diseño mecánico y sus capacidades de manufacturaⁱ. La tarea de un diseñador optomecánico empieza con el diseño proveído por el diseñador óptico, y después de una serie de iteraciones entre ellos, termina con un sistema mecánico que soporta componentes ópticos, tales como lentes, con un alineamiento axial y radial adecuadoⁱⁱ.

Los sistemas de sujeción, también conocidos como monturas (véase Figura III.8), ejercen precargas sobre los lentes que soportan. Las precargas aplicadas a las superficies de componentes ópticas producen esfuerzos elásticos en la estructura interna del material. Éstos son particularmente no deseables debido a que pueden generar distorsión en la imagen y en algunos casos, cuando el material es frágil, pueden provocar rupturas. Por otro lado, las monturas se encuentran bajo la acción de excitaciones externas que pueden generar que el sistema falle.

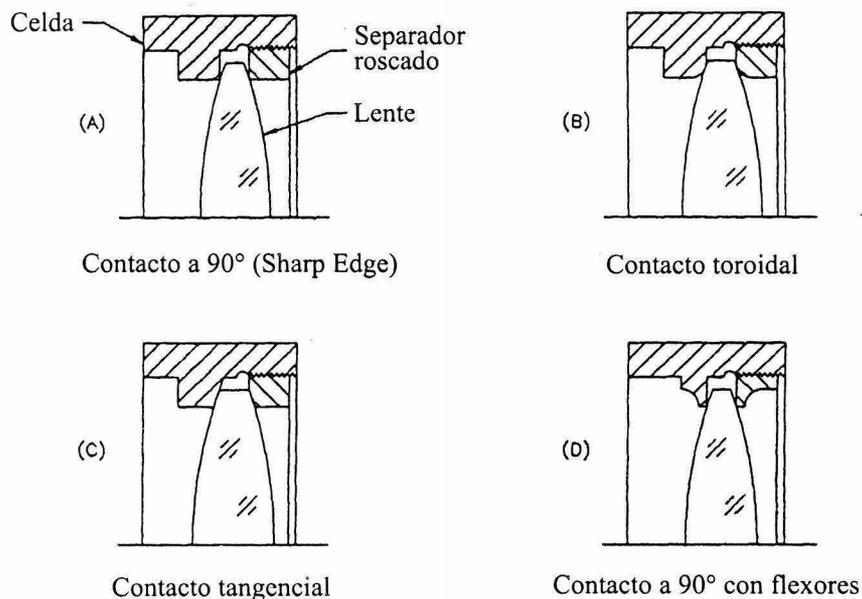


Figura III.8 Diversas monturas de soporte para lentes

En materiales ópticos isotrópicos las fuerzas aplicadas pueden introducir esfuerzos de birrefringencia (inhomogeneidad en el índice de refracción). La velocidad de propagación de las componentes paralela y perpendicular de la luz polarizada serían afectadas a través del material, así estas componentes estarían fuera de fase.

La magnitud de la birrefringencia por unidad de longitud en un material específico bajo cierto estado de esfuerzos depende del coeficiente óptico de esfuerzo de dicho material. Este coeficiente puede ser encontrado en los catálogos de fabricantes de vidrio e incluso en literatura especializada en vidrios. El estudio de la birrefringencia se vuelve de mayor importancia en el caso de sistemas ópticos que usan luz polarizada, tales como, polarímetros, interferómetros, muchos sistemas láser y cámaras de alto desempeño.

Incluso niveles bajos de fuerzas aplicadas pueden causar deformaciones en las superficies ópticas, en especial cuando las fuerzas no son aplicadas de forma simétrica. La importancia de una deformación dada, depende fuertemente del lugar donde se localice en la superficie óptica, de la posición de ésta en el sistema óptico, así como de los requerimientos generales del instrumentoⁱⁱⁱ.

Las tareas básicas que debe seguir un diseñador optomecánico para que el diseño de un barril⁴ tenga éxito son; selección de materiales, elementos de montaje y técnicas de ensamble. Durante todo el proceso es importante considerar las especificaciones y requerimientos de la cámara, así como las propiedades mecánicas de los vidrios que conforman su óptica, ya que de esto depende directamente la complejidad del barril mismo.

III.4 Tensor de esfuerzos y deformación

Cuando se analizan los esfuerzos de birrefringencia es típico calcular el nivel máximo de esfuerzo y aplicar la ecuación escalar de retardo de la onda de la diferencia óptica de la trayectoria (Optical Path Difference).

$$OPD = C * T * S \dots \text{(III.7)}$$

donde C = Coeficiente óptico de esfuerzo

T = Espesor del componente

S = Nivel máximo de esfuerzo

⁴ Sistema mecánico que soporta a la óptica de una cámara.

Esta ecuación nos lleva directamente al análisis del estado de esfuerzos y sus efectos ópticos que son producidos en los lentes por sus monturas. Se asume que la carga máxima en el lente es conocida y que el estado de esfuerzos y su magnitud en la estructura interna del lente deben ser predichos en el análisis de birrefringenciaⁱⁱⁱ.

Desde un punto de vista puramente mecánico, solamente el esfuerzo que puede provocar ruptura o deformación del lente son de interés, y estas cantidades pueden ser estimadas de manera muy aproximada de las soluciones analíticas^{iv}.

Por otro lado, desde una perspectiva óptica, la determinación del efectos de los esfuerzos en el desempeño óptico es una tarea más evasiva ya que el estado de esfuerzo tridimensional que se presenta en cada sección del lente deber ser determinado.

El tensor general del estado de esfuerzos en coordenadas polares para cada punto de un cuerpo está dado en la Ecuación III.8. Para cada punto existen tres planos perpendiculares para los cuales los términos cortantes desaparecen y solamente las componentes normales permanecen.

Estas tres componentes son conocidas como los esfuerzos principales, los cuales se muestran en la Ecuación III.9. Los esfuerzos principales del estado de esfuerzos es determinado a partir de transformaciones del tensor general de esfuerzos.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{\theta r} & \sigma_{\theta\theta} & \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} & \tau_{z\theta} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \dots \text{(III.8)} \quad [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \dots \text{(III.9)}$$

Una representación gráfica de esta transformación se muestra en la Figura III.9a y se conoce como elipsoide de esfuerzos de Lamé. El semi-eje de la elipse representa el esfuerzo principal y la superficie define el dominio de todos los posibles estados de esfuerzo en cada punto. Los esfuerzos secundarios principales, σ_1 y σ_2 , pueden ser definidos para cualquier valor de σ_{zz} que recae en el eje z (véase Figura III.9b).

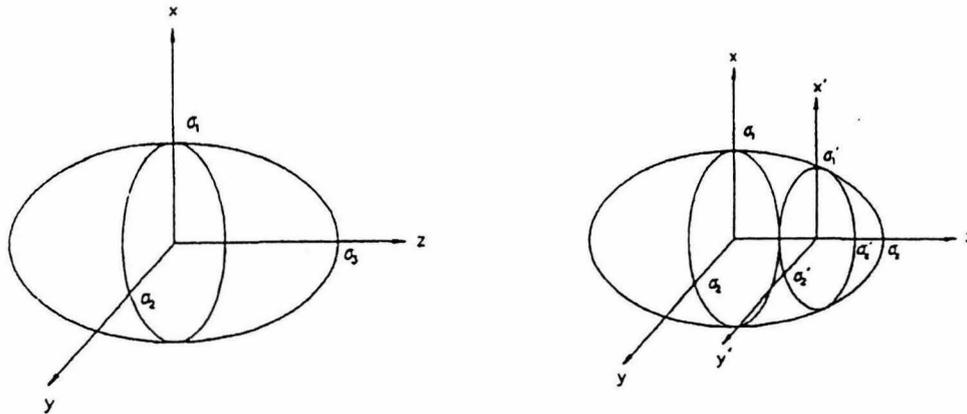


Figura III.9 Elipsoide de esfuerzos de Lamé y esfuerzos principales secundarios

Por ejemplo, en el caso de un anillo separador que hace contacto anular completo con una lente convexa, produce un estado de esfuerzos axisimétrico en el lente. Dejando que el eje z sea el eje óptico del lente, el tensor de esfuerzos para esta configuración en particular está dado por la Ecuación III.10, donde r y θ son las direcciones radial y tangencial respectivamente. El término σ_{zz} es debido principalmente al esfuerzo compresivo de Hertz (véase Referencia vii) y los componentes σ_{rr} y $\sigma_{\theta\theta}$ el resultado debido al efecto de Poisson al aplicar la línea de la carga Hertziana.

Utilizando el concepto de esfuerzos secundarios principales, el tensor axisimétrico puede ser representado como se muestra en la Ecuación III.11. En este caso, σ_1 y σ_2 son los esfuerzos secundarios principales que son perpendiculares a la propagación del haz del luz, mientras que las componentes normal y cortante, σ_{zz} y τ_{z1} , son paralelas a la dirección de propagación.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & 0 & \tau_{rz} \\ 0 & \sigma_{\theta\theta} & 0 \\ \tau_{zr} & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \dots \text{(III.10)} \quad [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \tau_{1z} \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ \tau_{z1} & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \dots \text{(III.11)}$$

Para el estado de esfuerzos en un material birrefringente las leyes ópticas relacionan el estado de esfuerzos en cada punto con el índice de refracción. La forma clásica de esta relación se muestra en la Ecuación III.12, donde n_1 , n_2 y n_3 son los índices principales de refracción, C es el coeficiente óptico de esfuerzos y σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales en cada punto.

$$n_1 - n_2 = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad n_1 - n_3 = C(\sigma_1 - \sigma_3) \quad n_2 - n_3 = C(\sigma_2 - \sigma_3) \dots \text{(III.12)}$$

Los índices de refracción de un material cristalino anisotrópico pueden ser representados de manera similar al elipsoide de Lamé. Esta construcción es conocida como *elipsoide de índices* para un cristal y se muestra en la Figura III.10a. La relación de esfuerzos ópticos es representada en la Figura III.10b y demuestra relación lineal entre esfuerzos principales e índices de refracción. Esta relación nos permite la determinación de los índices de refracción para cualquier punto una vez que el estado de esfuerzos es conocido.

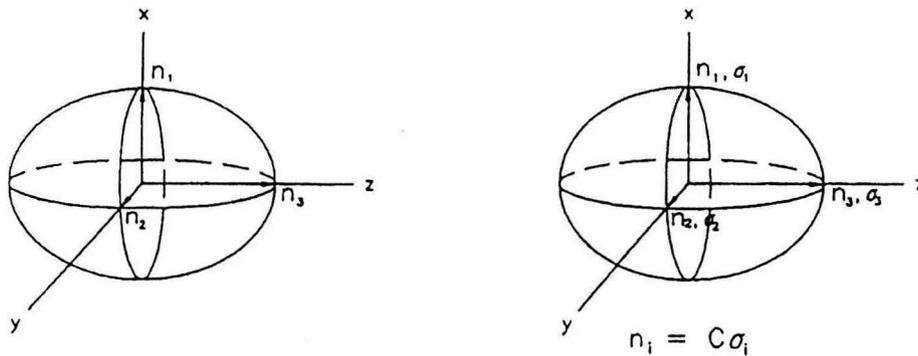


Figura III.10 (a) Elipsoide de índices y (b) relación con el esfuerzo óptico

Una forma más práctica para calcular el cambio del índice de refracción en un punto como función del índice nominal, el coeficiente de óptico de esfuerzo y los esfuerzos principales secundarios se muestra en la Ecuación III.13^v.

$$\Delta n = -0.5 * n_0^3 * [C * (\sigma_1 - \sigma_2)] \quad \Delta n = -0.5 * n_0^3 * [C * \tau_{12}] \dots \text{(III.13)}$$

Es importante hacer notar que solamente las componentes perpendiculares a la propagación de la luz afecta el índice de refracción para ese particular haz de luz. La componente en z, la cual es el esfuerzo de compresión de Hertz no tiene efecto en la propagación de dicho haz.

El ejemplo anterior solamente ilustra el modelado matemático de un arillo separador para un lente, ahora imaginemos el estudio del sistema completo de retención de un lente. Conocer las componentes del tensor de esfuerzos para cada punto de este lente sería una

tarea muy difícil, y en algunos casos imposible, si se hace por medio de modelos analíticos o por medio de experimentación. La forma más eficiente para hacer esto es por medio de simulaciones con Elementos Finitos para conocer dicho estado de esfuerzos.

Otra manera de hacer un cálculo de los esfuerzos aproximados en superficies ópticas es a partir de ecuaciones empíricas; en la Referencia *iii* se proponen varias opciones para éstos. Es importante mencionar que los valores obtenidos con dichas ecuaciones involucran exclusivamente ciertos componentes del tensor de esfuerzos, esto es debido a su naturaleza experimental (véase Apéndice C). Su principal limitante es que no es posible hacer un cálculo de esfuerzos que involucre a todas las excitaciones externas simultáneamente.

Referencias

- i Wadsworth R., *High Performance Lens Mounting*, Proc. of SPIE Vol. 0073, 1975.
- ii Bayar M., *Lens Barrel Optomechanical Design Principles*, Optical Engineering, March-April 1981, Vol.20 No. 2.
- iii Yoder P., *Mounting Optics in Optical Instruments*, SPIE Press, Washington USA, 2002.
- iv Delgado and Hallinan, *mounting of Lens Elements*, Applied Optics, Vol.14, No 1, 1975.
- v Yiu Y. y Meyer A., *Computation of optical Errors in Transparent Optical Elements due to Three Dimensional Photoelastic Effect*, Proc. of SPIE, Vol. 1303, 1990.
- vi Dieter, George E., *ENGINEERING DESIGN A Materials and Processing Approach*, U. De Chicago, 1991.
- vii Rothbart, *Mechanical Design and Systems*, Handbook, 2ª edición, University of Cambridge, E.U.A., 1985.
- viii Popov Egor, P., *Introducción a la Mecánica de Sólidos*, primera edición, editorial Limusa, México, 1976.
- ix Shigley and Mischke, *Mechanical Engineering Design*, quinta edición, McGraw-Hill, E.U.A., 1989.
- x Hayrettin Kardestuncer (editor jefe), *Finite Element Handbook*, McGraw-Hill, México 1987.
- xi Segerlind Larry, *Applied Finite Element Analysis*, 2ª edición, editorial John Wiley & Sons, E.U.A., 1984
- xii *Optomechanical Design and Engineering 2001*, San Diego 2001, SPIE Vol. 4444

IV. DISEÑO CONCEPTUAL

En este Capítulo se muestra la descripción general del instrumento de OSIRIS y de la Unidad de la Cámara. Se analizan las especificaciones y requerimientos directamente relacionados con el diseño del barril. Se incluyen las posibles soluciones para cada uno de los requerimientos establecidos y algunos de los cálculos analíticos o aproximados de su desempeño. Finalmente, los mejores sistemas para ser incluidos en el Diseño Preliminar del barril, son definidos y se muestran en el Capítulo V.

IV.1 Descripción general del instrumento OSIRIS

OSIRIS es un sistema óptico para adquisición de imágenes de baja resolución para el Gran Telescopio Canarias (*GTC*). Este instrumento también puede funcionar como un espectrógrafo multiobjetos cubriendo las longitudes de onda en el intervalo de 0.365 a 1.0 μm . OSIRIS representa la nueva generación de técnicas instrumentales de observación astronómica, que incluye conceptos tales como: rueda de filtros y acarreo de carga en el detector *CCD* (REF i). OSIRIS deberá operar el “día uno” de la puesta en funcionamiento del telescopio. Este instrumento deberá ser colocado en el rotador mecánico del *GTC* sin necesidad de soportes extras como se muestra en la Figura 4.1.

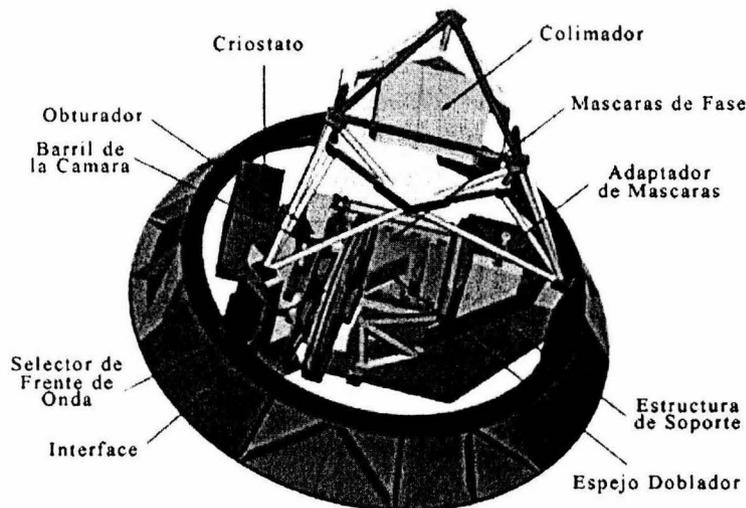


Figura IV.1 Instrumento OSIRIS

El sistema óptico está contenido en la unidad de la cámara que consiste de un barril que incluye; el barril 1, que contiene al doblete¹ D1 y a la unidad de enfoque; y el barril 2 con los singletes S1 y S2 y los dobletes D2 y D3, véase Figura 4.2 y Apéndice A. La ventana del crióstato para el CCD contiene el singlete S3 por dentro, y no forma parte del barril.

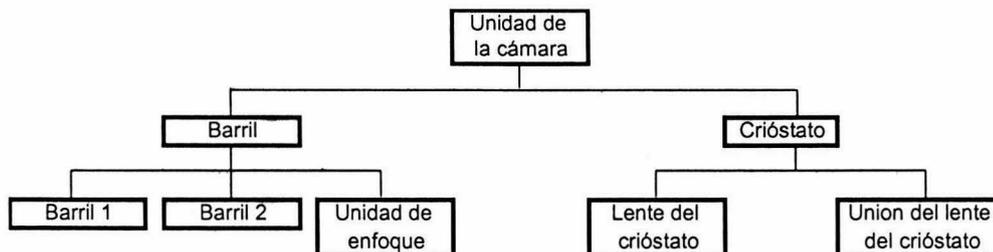


Figura IV.2. Diagrama de árbol de la cámara para OSIRIS

En la Figura 4.3 se muestra el diagrama de los elementos ópticos en la posición que deberán tener en la cámara. El obturador para tomar las imágenes es soportado por la estructura de soporte de OSIRIS y no está unido con el barril de la cámara. Las dimensiones generales de cada lente se muestran en el Apéndice A.

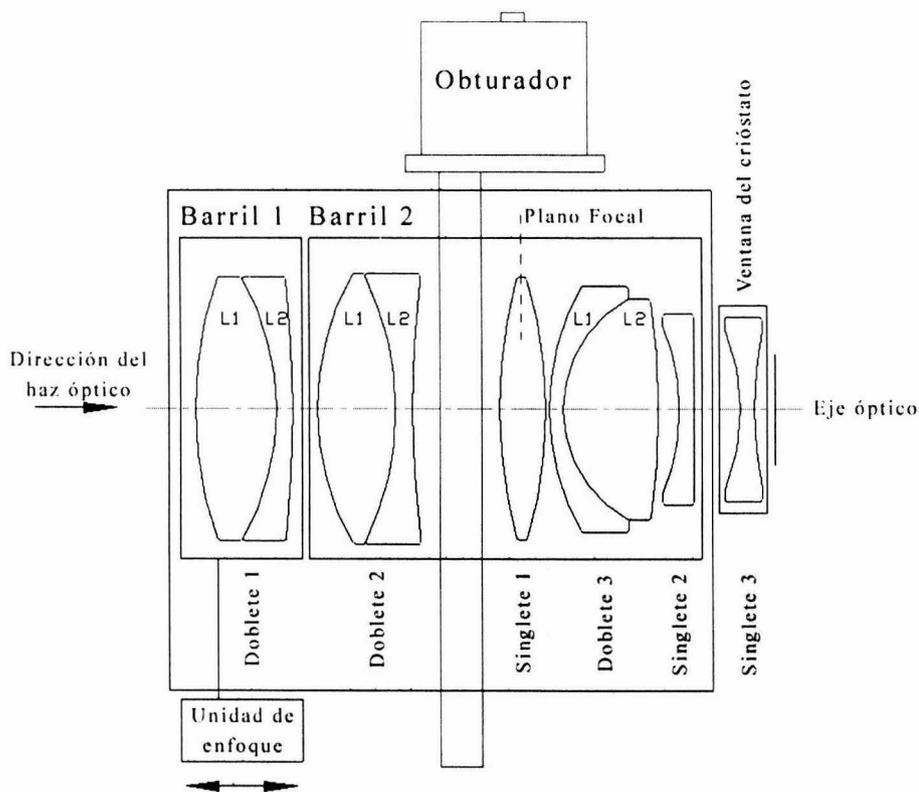


Figura IV.3 Diagrama funcional de la cámara OSIRIS

¹ Sistema óptico formado con dos lentes en contacto.

IV.2 Especificaciones y requerimientos

La cámara de OSIRIS deberá cumplir con los requerimientos establecidos. Sus especificaciones incluyen restricciones de deformación y esfuerzos por cargas gravitatorias y térmicas, así como de ensamble y repetibilidad. Las especificaciones directamente relacionadas con el diseño del barril de la cámara se muestran en el Apéndice B.

El apartado más crítico de las especificaciones es el de esfuerzos. Durante la operación del instrumento ninguna de sus componentes ópticas, bajo ninguna circunstancia, podrá tener un esfuerzo mayor a 3.4 MPa. Esto es debido a que se puede presentar el fenómeno de birrefringencia².

IV.3 Criterios de diseño, parámetros e indicadores

En función de las especificaciones y requerimientos establecidos, y como parte del Diseño Conceptual del barril los siguientes criterios, parámetros e indicadores fueron propuestos:

Criterios de diseño

- El intervalo de temperatura de operación del instrumento es de -6 a 30 °C.
- El comportamiento térmico es el más crítico ya que varía con el tiempo. La gravedad es constante por lo que se deja al final su estudio.
- Considerar temperaturas de maquinado diferentes a las de diseño.
- Isotermalización, los coeficientes de expansión térmica deben tener valores lo más similares posible.
- La cámara deberá tener el menor peso posible.
- Diseñar para que el esfuerzo de birrefringencia no se presente dentro de las aperturas ópticas de las lentes.

Parámetros

- Esfuerzos: Criterio de Tresca así como esfuerzos principales máximos.

² *Birrefringencia*, fenómeno por el cual un lente cambia su índice de refracción.

- Desplazamientos: Traslaciones del centro y rotaciones de los ejes ópticos.

Indicadores

- Esfuerzos: el valor máximo permisible para esfuerzos dentro de la apertura óptica (véase Apéndice A) deberá ser menor a 3.4 MPa (REF ii) (birrefringencia). Los esfuerzos serán verificados para ruptura.
- Desplazamientos permisibles de las especificaciones (véase Anexo B).

IV.4 Barril de la cámara OSIRIS: Diseño Conceptual

El Diseño Conceptual del barril es propuesto en diferentes etapas. Se pretende resolver de manera independiente cada uno de los requerimientos, y posteriormente, con los mejores modelos conceptuales hacer una propuesta general del barril (véase Capítulo V).

IV.4.1 Posición nominal del sistema óptico

En la Tabla 4.1 se muestran los materiales y coeficientes de expansión térmica de los diferentes lentes que componen la cámara. El material del que están fabricados es muy específico y si a esto agregamos el costo de manufactura, los lentes se convierten en los componentes más caros del instrumento. Por si esto fuera poco, la fabricación de los lentes puede llevar varios meses, por esta razón es necesario tener extremo cuidado con su manejo.

Tabla 4.1 Materiales de los lentes del sistema óptico de la cámara

Lente	Material	Masa (g)	CTE (C ⁻¹) a 22°C
D1 (L1)*	Ohara S-FPL53	1730	14.2x10 ⁻⁶
D1 (L2)	Ohara BSM51Y	906	6.3x10 ⁻⁶
D2 (L1)	CaF ₂	1363	18.9x10 ⁻⁶
D2 (L2)	Ohara S-BAL35Y	1129	5.7x10 ⁻⁶
S1	Ohara S-FPL51Y	911	13.6x10 ⁻⁶
D3 (L1)	Ohara S-BAL15Y	618	7.6x10 ⁻⁶
D3 (L2)	CaF ₂	1287	18.9x10 ⁻⁶
S2	Ohara PBL6Y	496	8.3x10 ⁻⁶
S3	Fused Silica	304	0.55x10 ⁻⁶

* Las dimensiones de cada uno de los lentes se muestran en el Apéndice A.

Para que el instrumento funcione adecuadamente es de vital importancia que la luz que concentra el telescopio se encuentre ubicada en la posición espacial definida para el detector *CCD*. Si alguno de los lentes del sistema óptico estuviera en una posición diferente a la especificada el haz no se concentraría adecuadamente provocando imágenes con una calidad inadecuada.

En la Tabla 4.2 se muestra la posición de cada lente en el sistema óptico y en la Tabla 4.3 la tolerancia de posición que garantiza el buen desempeño del instrumento. La referencia espacial se encuentra en la intersección del eje óptico y del plano focal (véase Figura 4.3).

Tabla 4.2 Posición axial nominal de cada lente (véase Figura 4.3)

	X_{ca}	Y_{ca}	Z_{ca} (mm)
D1 (L1)	0.0	0.0	172.64
D1 (L2)	0.0	0.0	128.56
D2 (L1)	0.0	0.0	110.86
D2 (L2)	0.0	0.0	68.28
S1	0.0	0.0	11.78
D3 (L1)	0.0	0.0	-15.22
D3 (L2)	0.0	0.0	-23.2
S2	0.0	0.0	-85.90
S3	0.0	0.0	-108.40

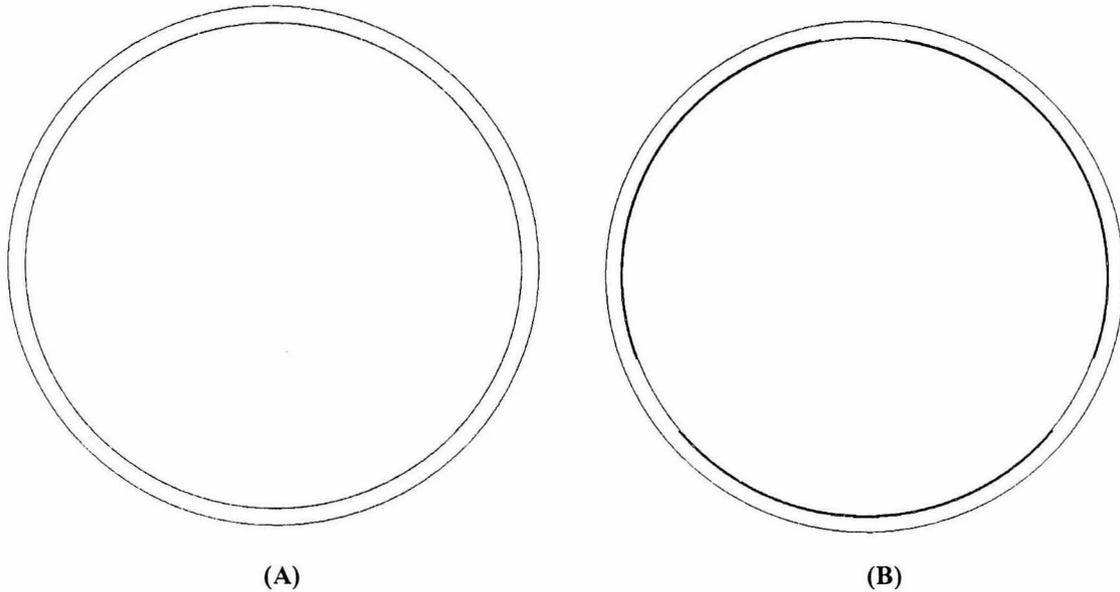
Tabla 4.3 Tolerancias de posición nominal de cada lente

	Inclinación (mrad)	Descentrado (μm)	Axial (μm)
D1	± 0.6	± 150	N/A
D2	± 0.4	± 100	± 100
S1	± 0.4	± 50	± 100
D3	± 0.4	± 100	± 60
S2	± 0.4	± 56	± 100
S3	± 0.9	± 208	± 223

a) Descentrado

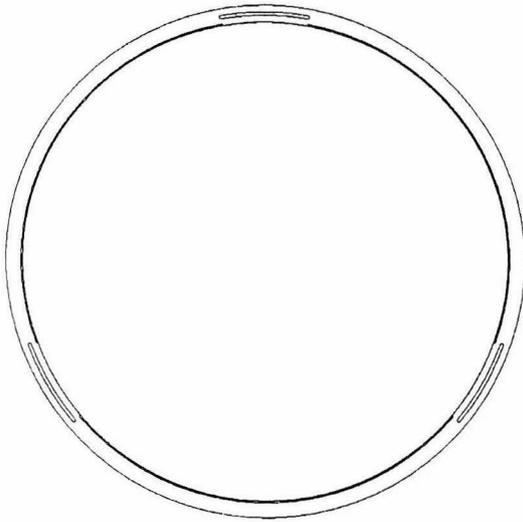
El centrado de una lente depende directamente de la interacción que exista entre éste y sus soportes. Los problemas de descentrado se presentan debido a deformaciones y esfuerzos inducidos por cambios de temperatura, cargas ejercidas y por el movimiento propio del sistema con respecto al vector gravedad. Es necesario que el diseño y el maquinado de estos soportes sean bajo estas consideraciones.

Como parte del Diseño Conceptual de soportes radiales de lentes se estudiaron una gran variedad de opciones. A continuación se describen brevemente los diferentes sistemas incluidos:

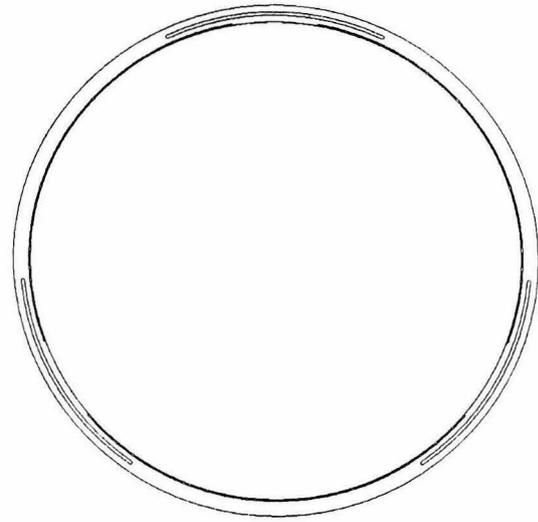


Modelo A: soporte simple en contacto con el vidrio.

Modelo B: soporte con 3 zonas curvas de contacto con el vidrio.



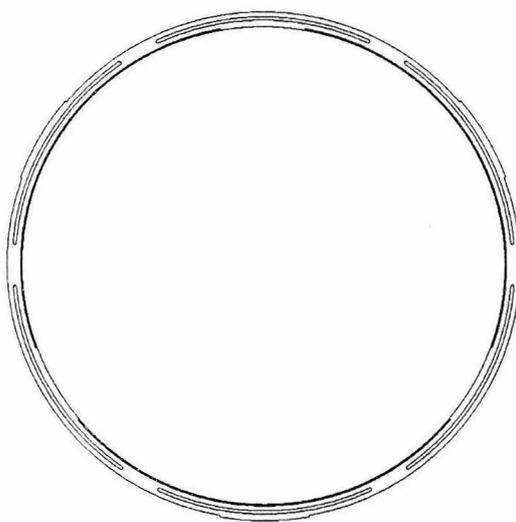
(C)



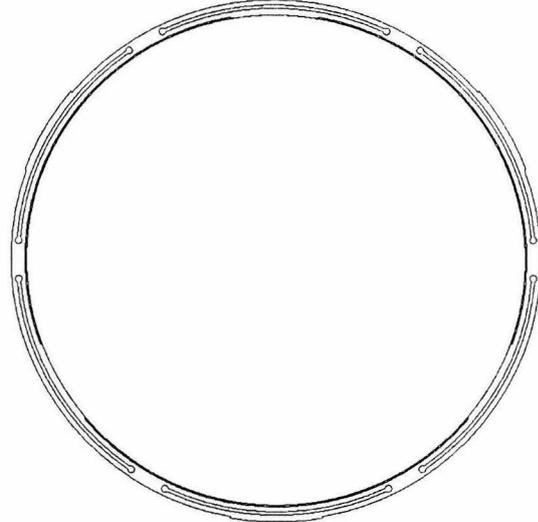
(D)

Modelo C: soporte con tres zonas de contacto curvo y tres ranuras con muelles de corta longitud.

Modelo D: soporte con tres zonas de contacto curvo y tres ranuras con muelles de mediana longitud.



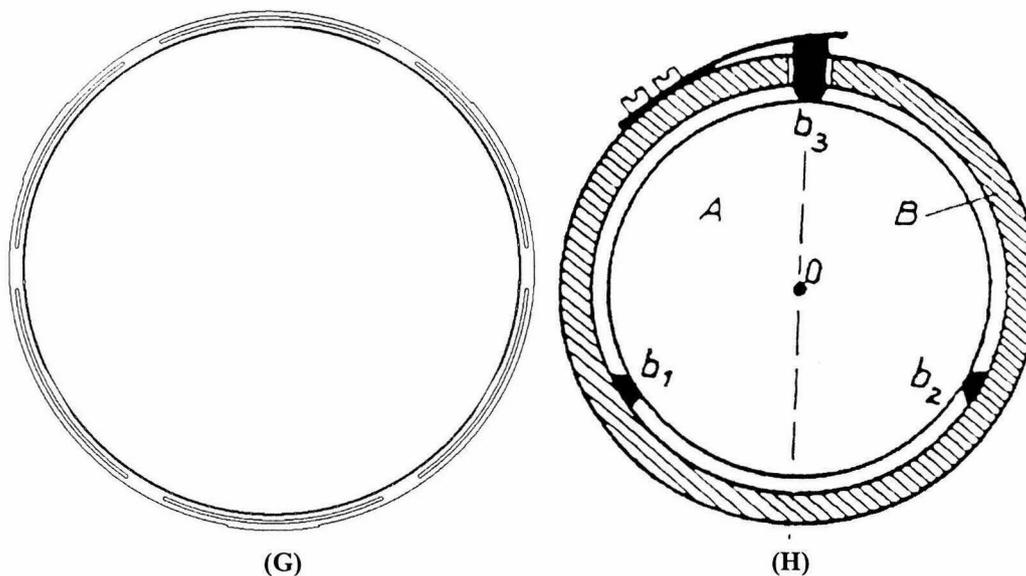
(E)



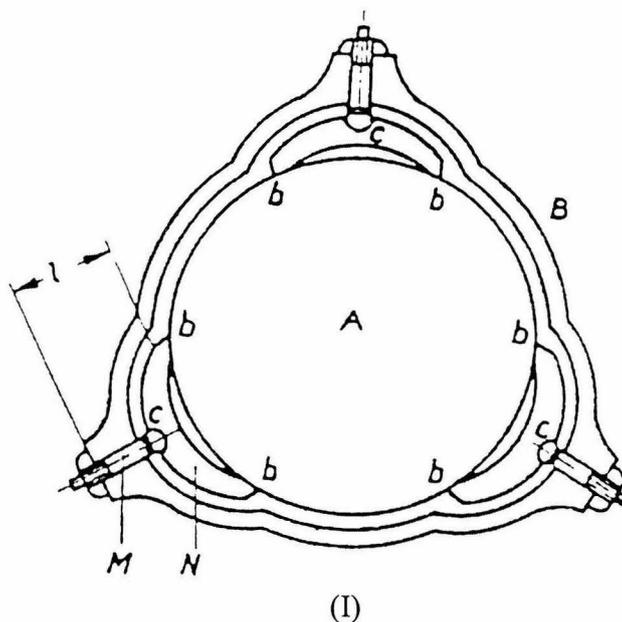
(F)

Modelo E: soporte con tres zonas de contacto curvo con el vidrio y tres zonas de contacto curvo exterior, con seis ranuras con muelles de mediana longitud.

Modelo F: similar al modelo E pero con perforaciones en los extremos de las ranuras.



Modelo G: similar al modelo E pero con las zonas de contacto con el vidrio planas.
Modelo H: sistema con dos puntos de apoyo y un tercero precargado con un resorte.



Modelo I: sistema con elementos compensadores de expansiones térmicas.

Figura IV.3 Modelos conceptuales para los soportes radiales de lentes

Del modelo A hasta el G se muestra la evolución conceptual de un soporte simple en contacto con el vidrio. En la Figura 4.4 se muestra la diferencia entre los modelos E y G.

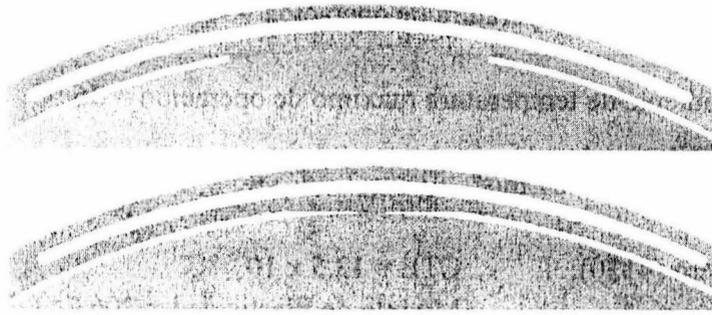


Figura IV.4 Diferencia entre los modelos E (superior) y G

Los modelos H e I son dos soluciones comerciales que se compararon directamente con las opciones desarrolladas. Todos los modelos propuestos fueron analizados por medios analíticos y por *FEM*.

Análisis de esfuerzo y deformación por elementos finitos

La primera etapa del estudio incluyó una comprobación de las simulaciones *FEA* los resultados fueron comparados con ecuaciones analíticas básicas de la expansión térmica. Además, se compararon con las ecuaciones aproximadas propuestas por Yoder (REF ii), véase el Apéndice C.

Todos los modelos conceptuales fueron analizados y comparados entre sí para poder elegir la mejor opción. Las simulaciones presentadas en esta sección son las de los casos más críticos y representativos del estudio. Garantizándose así que el comportamiento del resto de las lentes y sus soportes estén dentro de las especificaciones. Para la expansión térmica, el doblete D2 es el caso a estudiar ya que tiene el CTE más elevado de los lentes, véase Tabla 4.1. En el caso de las cargas gravitatorias se estudió el lente L1 del doblete D1.

La historia del modelado de cada uno de los conceptos de la Figura 4.3 fue desarrollada de manera similar. El número de elementos finitos, su tipo, sus restricciones y sus condiciones de frontera son análogos para garantizar que las diferentes geometrías de los soportes sean las que se estén comparando (véase Tabla 4.4). En este trabajo no se muestran todos los *FEA* realizados, se incluyen solamente las tres configuraciones más eficientes (en términos de los indicadores, véase IV.III).

Tabla 4.4 Condiciones de frontera

Intervalo de temperatura de operación = $-6\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Gradiente de temperatura máximo de operación = $36\text{ }^{\circ}\text{C}$

Gravedad = 9.81 m/s^2

Acero (4130); CTE = $13.5 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Módulo de Elasticidad = 206.84 GPa

Titanio (6Al-4V) CTE = $9.54 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Módulo de Elasticidad = 113.76 GPa

Aluminio (6061) CTE = $23.58 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Módulo de Elasticidad = 69.637 GPa

1.- Modelo G

Análisis térmicos

La Figura 4.5 muestra la simulación radial de esfuerzos entre D2L1 y su soporte radial con un gradiente de 36°C . El material propuesto para el soporte es acero ya que su CTE es similar al del lente (véase Tabla 4.1 y 4.4). Al ser éste el caso más drástico, el *FEA* garantiza que los esfuerzos de los lentes D1L1, D2L1, S1 y D3L2 estén dentro de especificaciones si tienen un soporte radial de acero.

La Figura 4.5 muestra un esfuerzo bajo el criterio de Tresca máximo de 19 MPa , este valor se encuentra más allá del límite de birrefringencia. Sin embargo, este valor se presenta en las superficies en contacto y decae rápidamente a valores permisibles con el radio de la lente. En la apertura óptica (Apéndice A y B) los esfuerzos son menores a 2.7 MPa , lo cual está tolerado.

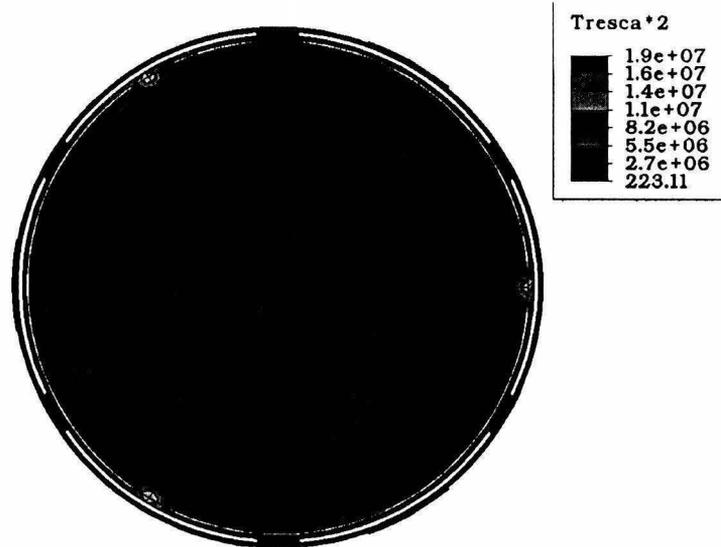


Figura IV.5 Esfuerzos generados debidos al gradiente térmico de 36°C con el modelo G para D2L1

Cuando el CTE del lente es menor al del acero es necesario utilizar otro material (por ejemplo Titanio) para evitar que el lente y su soporte pierdan contacto debido a las expansiones térmicas. Para estos lentes (véase Tabla 4.1) se analizó el caso drástico, D2L2 cuyo coeficiente es el menor de todos. La Figura 4.6 muestra los esfuerzos a los que es sometido este lente con un soporte de acero precargado³ y también cuando es de titanio, siendo esta segunda una mejor opción.

Sin embargo, aún con el soporte de titanio los primeros resultados del *FEA* mostraron un esfuerzo mayor a 3.4 MPa en la apertura óptica. Para resolver este problema se analizaron las siguientes soluciones: incrementar o disminuir el ancho de la ranura; aumentar el número de puntos de contacto; cambiar el material por uno con un CTE más próximo al del vidrio; incluir el efecto de la celda con el soporte (Figura 4.7); y proponer diferentes temperaturas libres de esfuerzos.

³ Esto fue necesario hacerlo para evitar que perdieran contacto. La precarga se logró por medio de diferentes temperaturas libres de esfuerzo del lente y de su soporte. Esto provoca que la dimensión del soporte tenga cierto apriete inicial. Por ejemplo, la diferencia entre coeficientes de expansión térmica del acero y el lente es de 7.62 e-6 m, este valor indica la cantidad de micras que el soporte tiende a separarse del lente por cada °C de aumento en la temperatura. La precarga está en función de esta diferencia y del gradiente térmico.

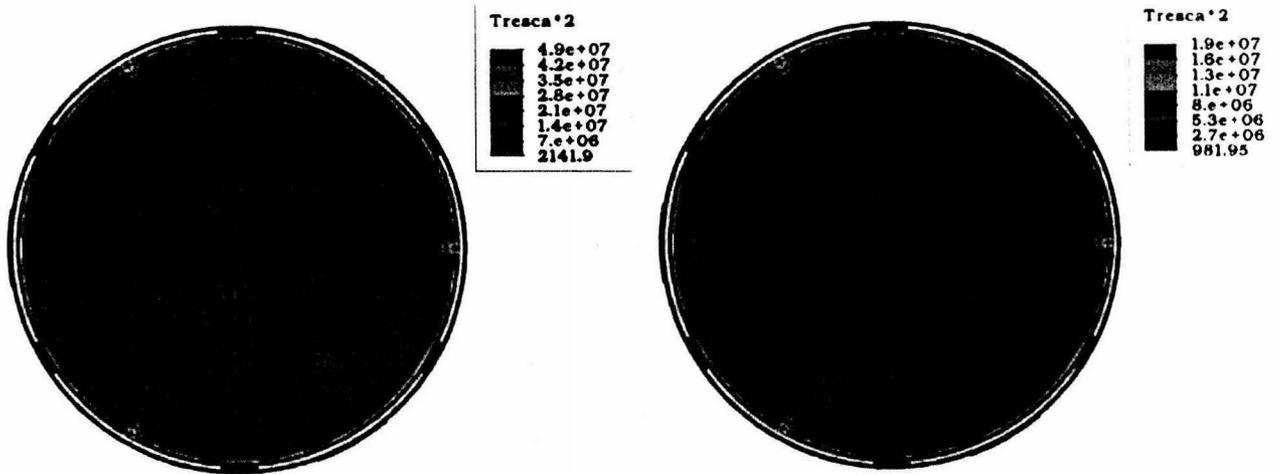


Figura IV.6 D2L2 con soporte de acero y de titanio bajo un gradiente de 36 °C

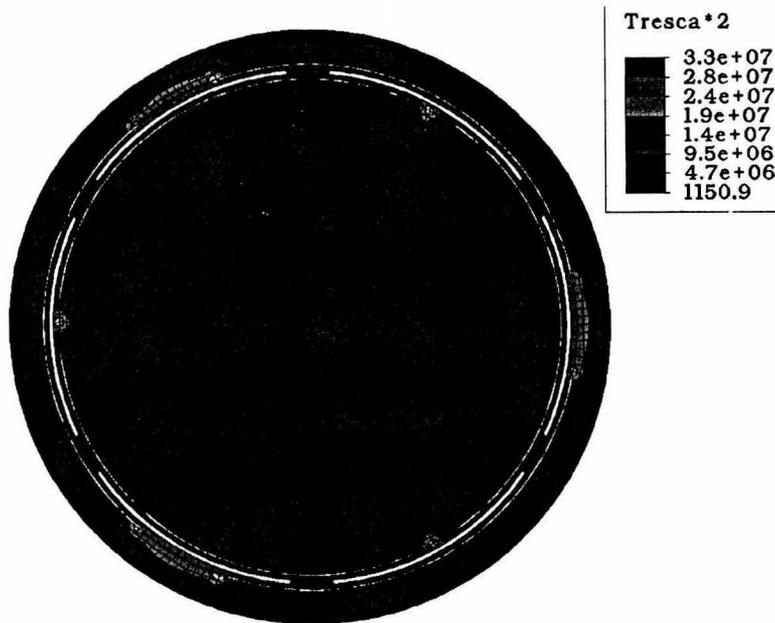
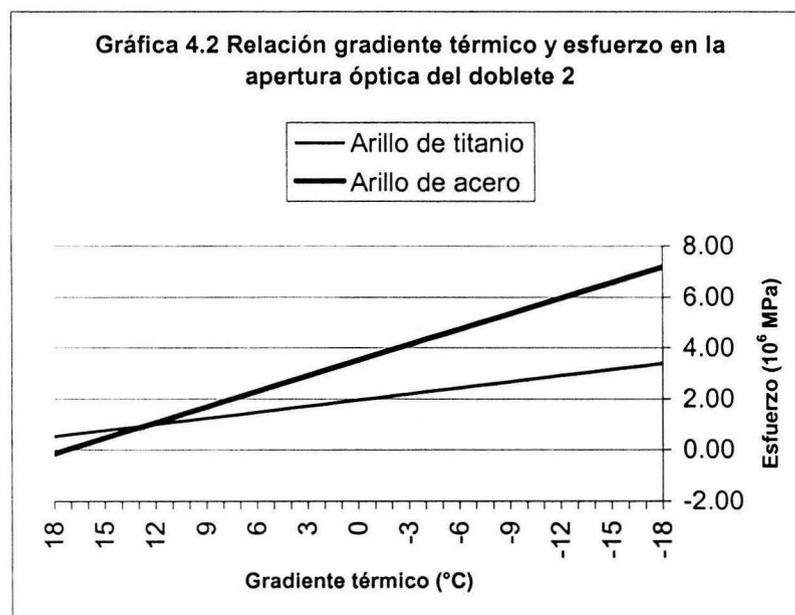
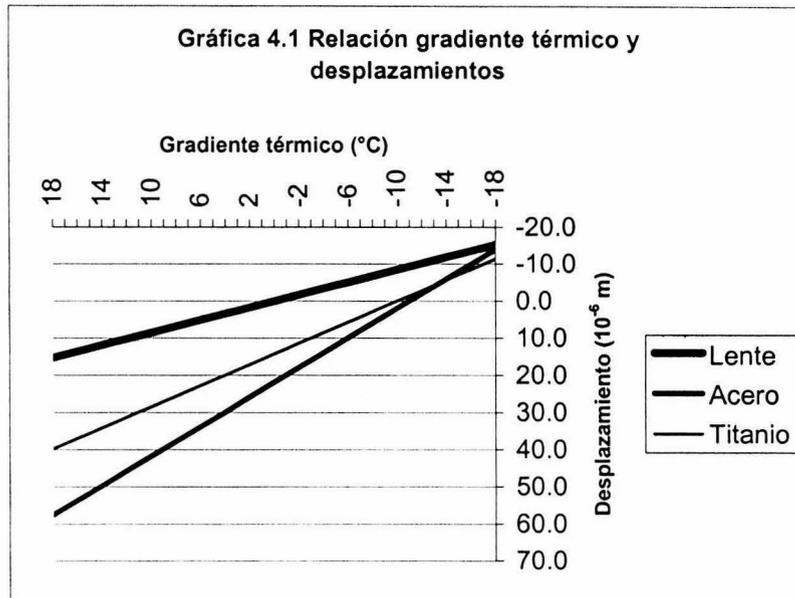


Figura IV.7 Modelo con soportes de titanio y un gradiente de 18 °C el modelo incluye la celda

Los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones indicaron que la mejor de las opciones es la de cambiar el material del soporte. Las Gráficas 4.1 y 4.2 muestran el esfuerzo debido al comportamiento térmico del lente D2L2 y de los soportes de acero y titanio. De la primera gráfica, podemos concluir que el contacto se garantiza ya que la dimensión del lente siempre es mayor que la de los soportes. De la segunda gráfica se

observa que si el soporte es de titanio el vidrio sufre menores esfuerzos. Los esfuerzos generados debido a esto se encuentran dentro de lo especificado. La temperatura de diseño⁴ puede ser elegida de tal manera que se garantice el contacto durante toda la variación de la temperatura y para que sea el esfuerzo este dentro de lo especificado.



⁴ Es la temperatura que define las dimensiones de maquinado de nuestro soporte con respecto a la temperatura de referencia de cada lente, en este caso de -6°C . Temperatura a la cual ambos componentes tienen la misma dimensión.

Análisis de carga gravitatoria

El desplazamiento relativo cada lente en el sistema se debe a la deformación de los soportes radiales y a los propios de cada celda en la barril de la cámara. A continuación se muestran los valores de los desplazamientos debidos a la carga gravitatoria en los soportes radiales obtenidos por *FEA* del lente más pesado D1L1 (véase Figura 4.8).

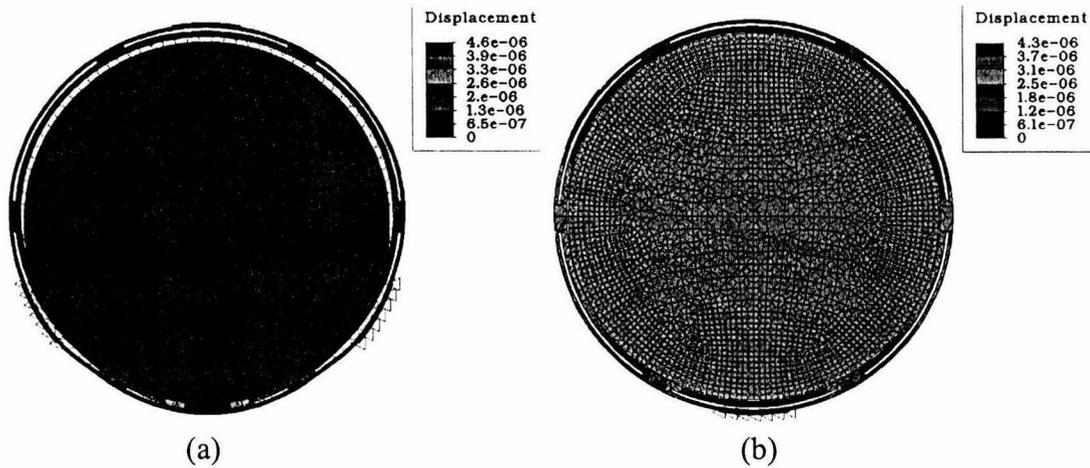


Figura IV.8 D1L1 bajo la acción de la gravedad;
(a) el soporte radial se apoya en dos secciones sobre la celda; (b) solamente en un apoyo

La deformación de los soportes radiales puede ser minimizada al aumentar el ancho de los soportes (véase Figura 4.9). En esta etapa del diseño no se pretende optimizar estos valores (véase Capítulo VI).

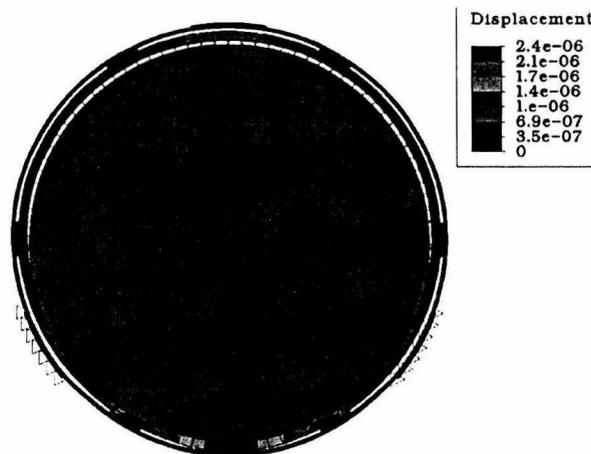


Figura IV.9 Efecto al aumentar 1 mm el ancho de los soportes

Una de las principales desventajas de este concepto es el ensamble con los lentes. Para facilitararlo se propone el uso tornillos auxiliares. Éstos tienen la función de jalar el soporte para facilitar el acceso del lente. La fuerza se aplicaría con ayuda de una tuerca apoyada en la celda de cada lente que serviría como superficie de referencia. La Tabla 4.5 muestra los posibles desplazamientos que se podrían alcanzar al aplicar una fuerza de 25 y 50 N. Estos valores se obtuvieron de análisis por elementos finitos, como se muestra en la Figura 4.10. Esta misma metodología se puede aplicar al resto de los componentes que así lo requieran. La temperatura de diseño deberá ser tal que asegura el contacto para todo el intervalo de operación.

Tabla 4.5 Valores de los desplazamientos debidos a una carga aplicada

Un tornillo de precarga con	Fuerza aplicada	
	25 N	50 N
Desplazamiento (m)	3.038E-05	6.075E-05
Esfuerzo (Pa)	5.108E+07	1.022E+08

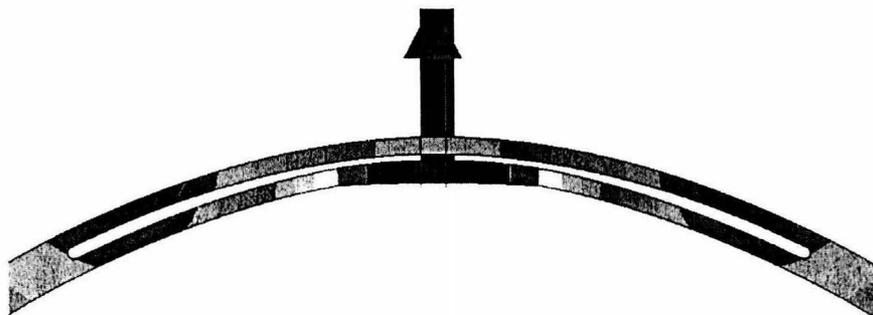


Figura IV.10 Simulación del empuje de los tornillos de ajuste

Como parte del Diseño Conceptual se revisó el comportamiento del esfuerzo si las propiedades de los diferentes materiales tuvieran cierta variación (véase el Apéndice D).

2.- Modelo H (o isostático)

Durante el Diseño Conceptual del soporte radial el modelo isostático fue propuesto. Básicamente consiste de tres puntos radiales de contacto entre la lente y su soporte, con la diferencia que dos de ellos son fijos y el tercero cuenta con un resorte de precarga. Las ventajas de este modelo son que permite un ensamble más fácil. Sin embargo, su fabricación requiere de un mayor número de procesos y de componentes. A continuación se muestra el estudio de este modelo.

Esfuerzos debidos a la precarga ejercida por el resorte

Aplicando una carga puntual de 3 kg en el D2L2 (caso crítico, véase Tabla 4.1) y con los dos otros apoyos totalmente restringidos, la Figura 4.11 muestra que sí es posible precargar sin llegar a esfuerzos mayores a los de la birrefringencia. El área donde se aplica la carga es el factor determinante para reducir esfuerzos. El valor de 3 kg fue elegido dado un peso de 1 kg del D2L2, ya que de esta manera se garantiza que la fuerza de la gravedad sea vencida por el resorte. En esta simulación no se tomaron en cuenta los gradientes térmicos.

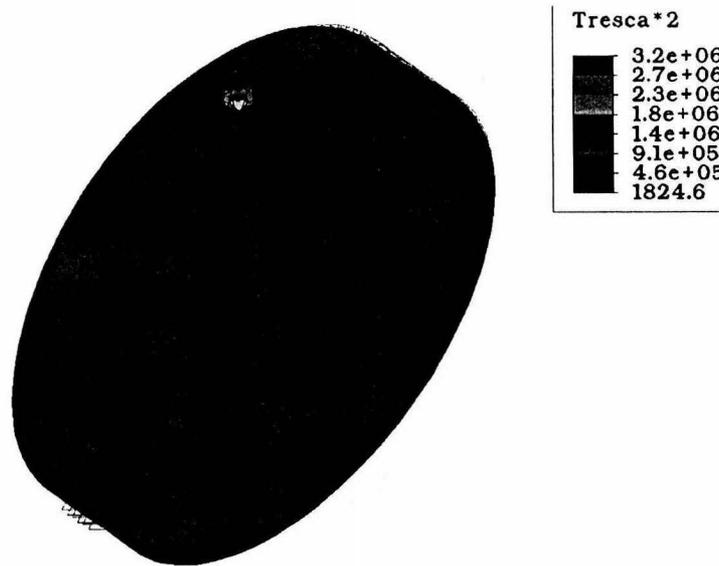


Figura IV.11 Precarga de 3 kilos en un nodo del lente D2L2

Análisis térmicos

El incremento de la fuerza ejercida por el resorte no es sensible a los cambios de temperatura debido a que los valores de las expansiones térmicas son del orden de micras. Pasa de ser 3 kg a 3.0162kg, por lo que se puede despreciar el esfuerzo inducido por la expansión térmica. Se puede concluir que se debe escoger un área de contacto adecuada para minimizar esfuerzos. La precarga solicitada al resorte deberá ser verificada junto con su rigidez.

La expansión térmica del sistema debe ser garantizada para que el eje óptico permanezca lo más estable posible. En la Tabla 4.6 se muestran los valores de la expansión para cada lente con un gradiente de 36 °C. La conclusión de este análisis indica la necesidad de isothermalizar el sistema, esto quiere decir buscar materiales adecuados para lograr que el centro de los lentes no se desplace uno con respecto al otro cuando la temperatura varíe.

Tabla 4. 6 Expansiones de los lentes, modelo isostático

Componente	CTE(C ⁻¹) a TA	Diámetro (m)	Gradiente térmico (°C)	Expansión (m)
D1 L1	1.42E-05	0.14502	36	3.71E-05
D1 L2	6.30E-06	0.14502	36	1.64E-05
D2 L1	1.89E-05	0.14900	36	5.07E-05
D2 L2	5.70E-06	0.14900	36	1.53E-05
S1	1.36E-05	0.14400	36	3.53E-05
D3 L1	7.60E-06	0.13400	36	1.83E-05
D3 L2	1.89E-05	0.12060	36	4.10E-05
S2	8.30E-06	0.10401	36	1.55E-05

3.- Modelo G optimizado:

A partir de un diagrama de cuerpo libre se puede simplificar el modelo G, donde las restricciones y condiciones de frontera se conservan. La ventaja principal del modelo G optimizado es su maquinado (véase Figura 4.12).

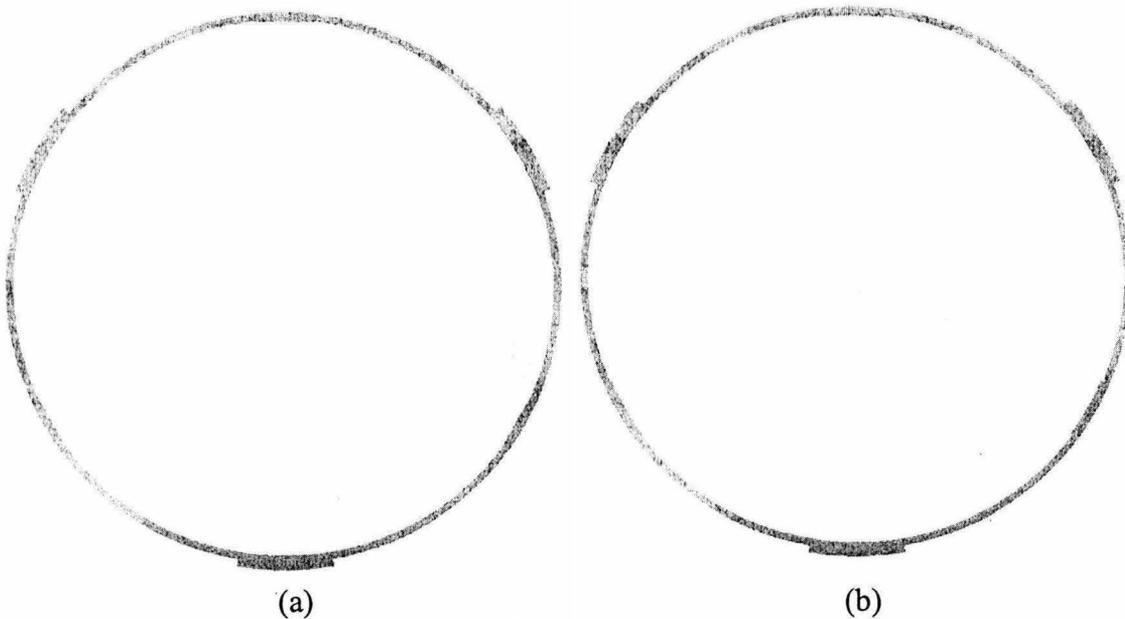


Figura IV.12 Modelo G optimizado; a) contacto tangencial, b) contacto radial

Los criterios antes expuestos para el modelo G son aplicables al modelo ya optimizado. Por esta razón solo se muestran los esfuerzos generados por la expansión térmica y por la carga gravitatoria.

El análisis térmico muestra que para el caso de D2L1 con un gradiente térmico de 36°C el esfuerzo generado disminuye (véanse Figuras 4.5 y 4.13). Este resultado favorece al modelo G optimizado.

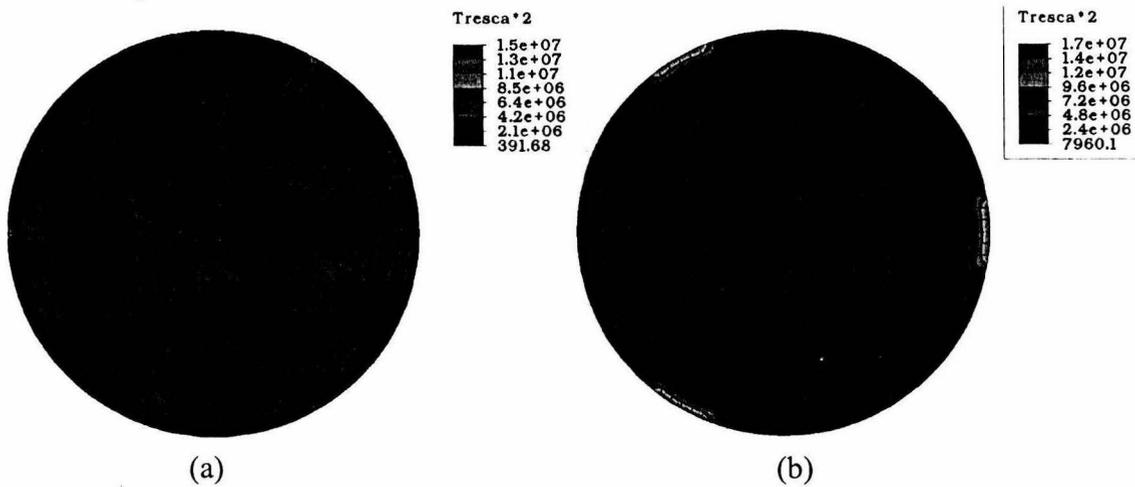


Figura IV.13 Esfuerzos debidos a la expansión térmica en D2L1 con el modelo G optimizado con un gradiente térmico de 36°C ;
 a) con contacto tangencial; b) contacto radial

Para el caso del análisis de las cargas gravitatorias (Figuras 4.8 y 4.14) el modelo G optimizado resultó ser más rígido en una dirección pero menos en la otra con respecto al modelo G. Por esta razón se propone hacer el muelle del modelo G optimizado más grueso (de 3 a 4 mm), de esta manera la gravedad lo deforma menos, sin embargo, los esfuerzos térmicos aumentan debido a este cambio (Figuras 4.15 y 4.16).

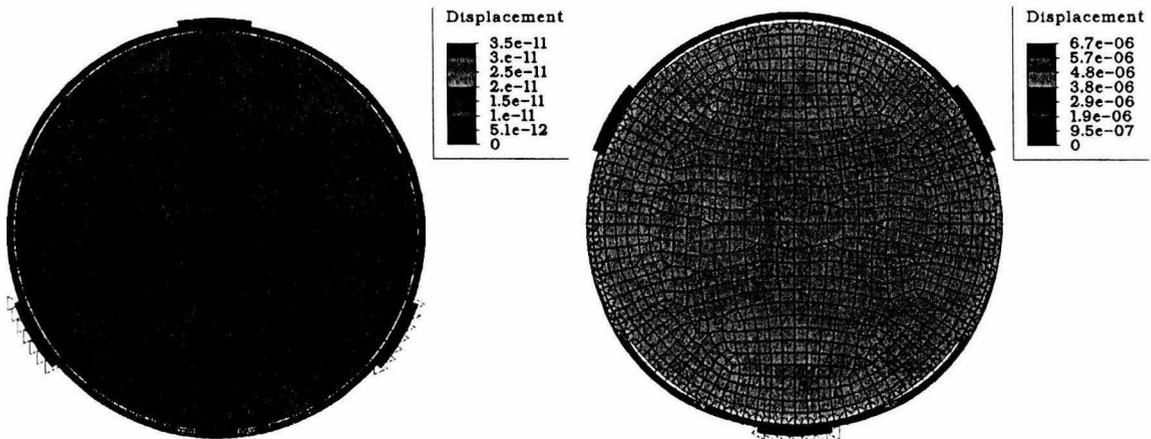


Figura IV.14 Desplazamientos del lente D1L1 con el modelo G optimizado y con contacto tangencial, debidos a la carga gravitatoria.

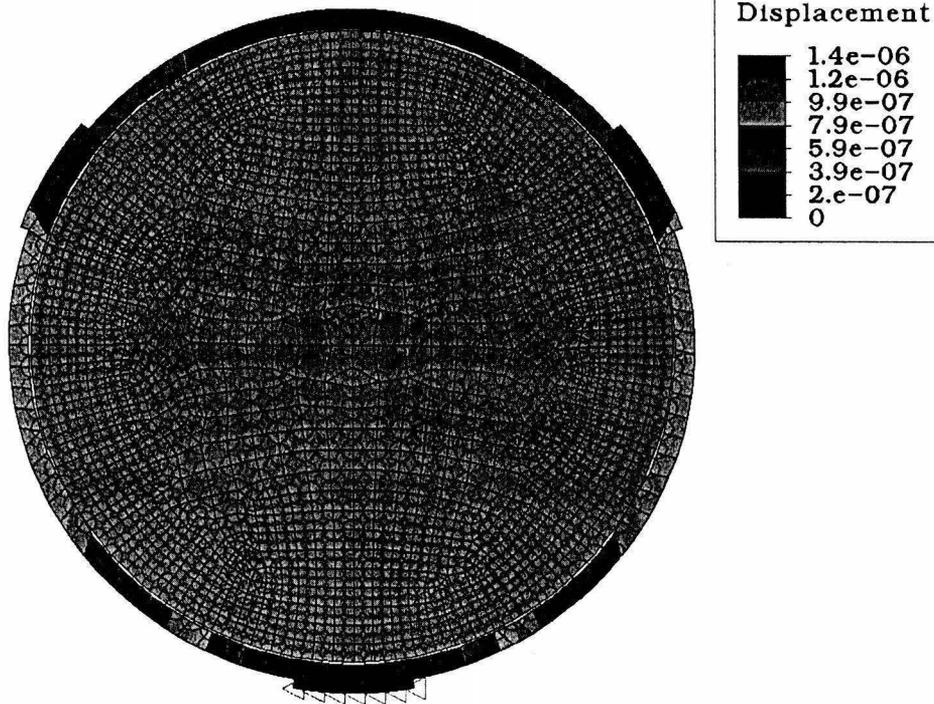


Figura IV.15 Desplazamientos del lente D1L1 con el modelo G optimizado con contacto tangencial y un espesor de 7 mm (4 mm en el muelle) debidos a la cargagravitatoria en el caso más crítico.

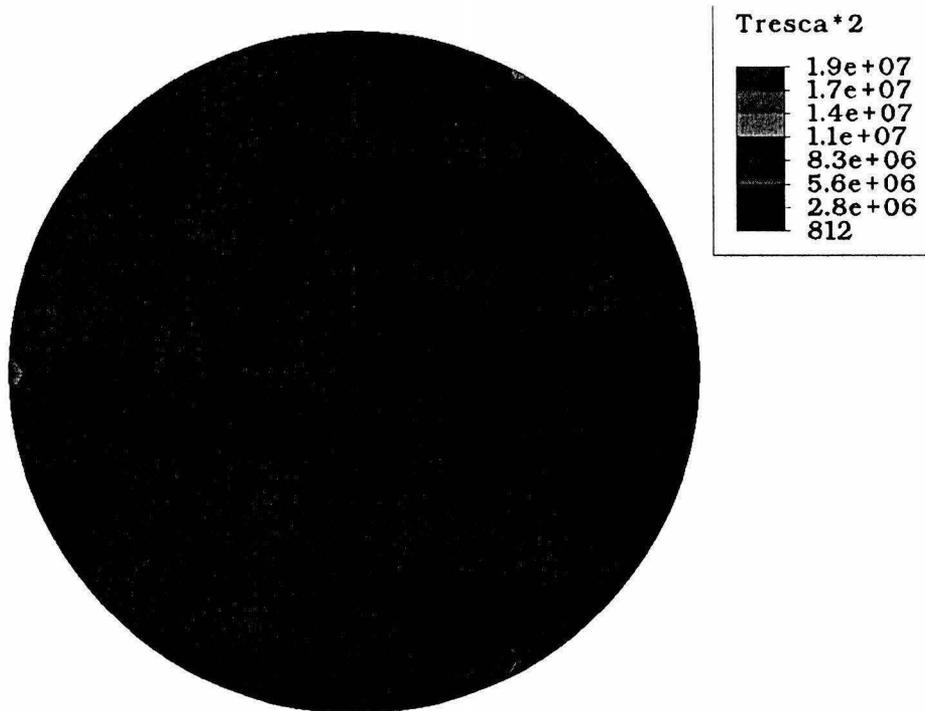


Figura IV.16 Esfuerzos debidos a la expansión térmica en D2L1 con el modelo G optimizado y un espesor de 7 mm (4 mm en el muelle), gradiente de 36°C.

La conclusión de este estudio es que los modelos simétricos que presentan una mejor estabilidad axial. En el caso de un modelo con dos puntos de apoyo y un tercero precargado con un resorte (Modelo Isostático), el centro de cada lente presenta un desplazamiento de por la expansión térmica, así junto con la contribución al error en la variación de la posición del eje óptico de cada lente los valores pueden llegar a ser críticos. Existen otro tipo de modelos que consisten en elementos compensadores de las expansiones térmicas. Sin embargo, una gran desventaja que presentan es que sus celdas son demasiado grandes y pesadas, al igual que su manufactura tiene es compleja. El modelo G optimizado es el mejor de todos los analizados en este trabajo, por esta razón se incluye como parte del Diseño Preliminar del barril (véase Capítulo V).

IV.5 Atermalización: Unidad Pasiva de Desplazamiento (UPD)

Definición del problema

El doblete tres ha sido electo como compensador térmico de calidad de imagen y escala de placa de OSIRIS (REF iii), para cumplir esta función es necesario que D3 tenga un movimiento axial pasivo de 12.6 (+1.9/-2.6) $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$. El sentido de la expansión debe separar D3 de S2 cuando aumente la temperatura y viceversa, véanse la Figura 4.17 y el Anexo B.

El espacio a los lados de D3 son similares, por lo que los elementos lineales para la expansión pueden ir en cualquiera de éstos. La posición preferente a la expansión de la UPD es sobre S2, por lo tanto, la primera decisión es acoplar la unidad de ese lado. Este valor está dado entre el extremo derecho de S3 y el borde izquierdo de D3 (véase Figura 4.3). Como primera aproximación, se propone que el material pasivo mida 10 cm. En etapas posteriores de diseño mecánico se ajustarán las medidas.

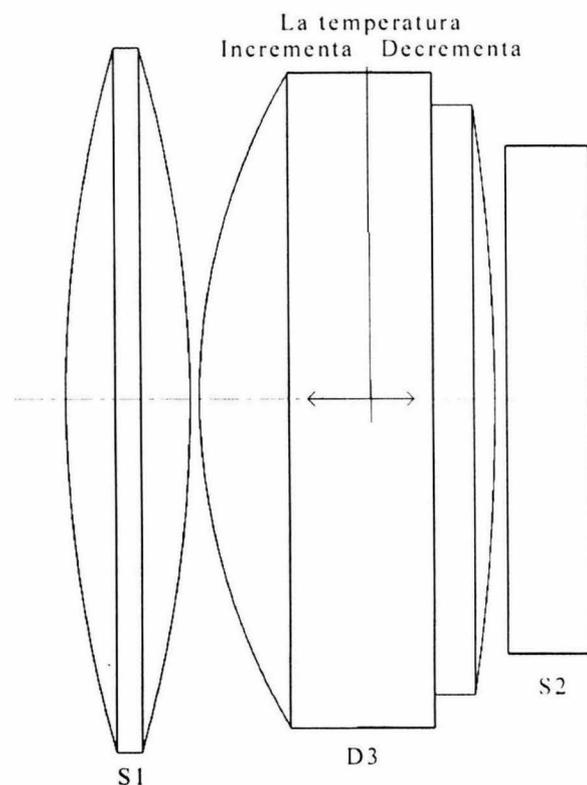


Figura IV.17 Dimensiones generales para la UPD

Materiales factibles para la UPD

El coeficiente de expansión térmica aproximado que debe tener el material de los elementos lineales de la UPD, suponiendo que miden 10 cm es de $120 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. En la Tabla 4.7 se muestran solo algunos materiales con un CTE aproximado a este valor.

Tabla 4.7 Tabla de propiedades para la UPD

Materiales posibles	CTE $^\circ\text{C}^{-1}$	E Gpa
Nylon 12	50 - 180	0.4 - 2.9
ABS/PVC Alloy	80 - 166	1.8 - 3
Nylon 612, Glass Fiber Filler	14 - 220	3.4 - 16
Polyethylene U.H.M.W.	130 - 200	0.2 - 1.2

Como se puede ver, existen coeficientes más grandes que el deseado de 120 micras/ $^\circ\text{C}$, por lo tanto el mecanismo propuesto cabe en el espacio propuesto.



Figura IV.20 Deformación de la *UPD* debido a la gravedad con el concepto I
(desplazamiento máximo = 0.02 m)

Los elementos lineales brindan el posicionado térmico requerido, sin embargo no son lo suficientemente rígidos para evitar la flexión de la celda bajo la acción de la gravedad (véase Figura 4.20). Por esto la rigidez a la flexión necesita ser proporcionada por otros elementos mecánicos tales como: rodamientos o flexores.

Propuestas conceptuales

Concepto I: “Patines de agujas y elementos lineales”:

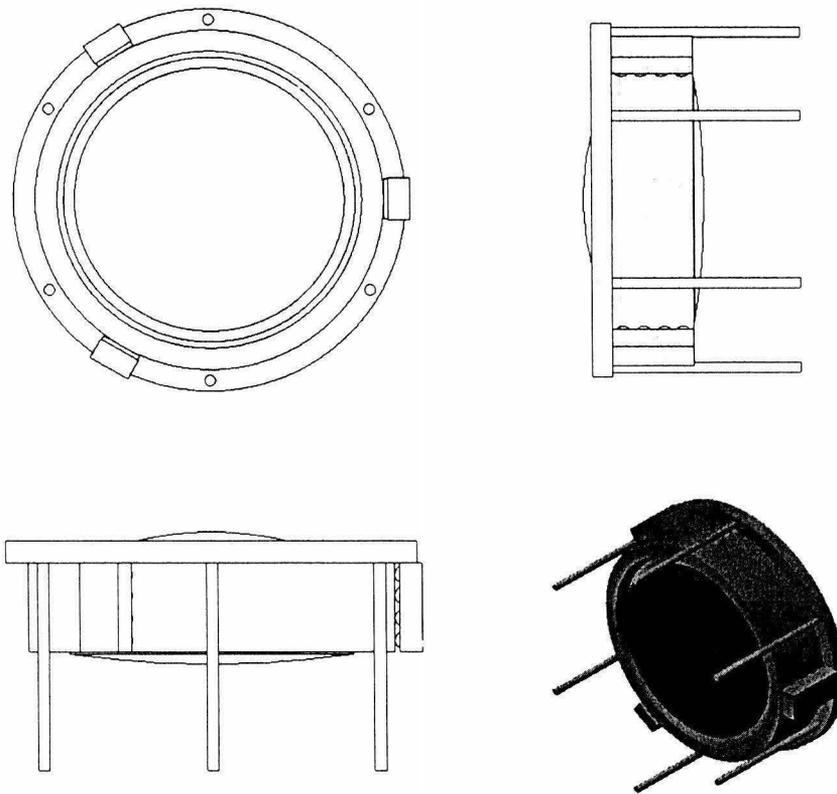


Figura IV.18 Concepto I

Concepto II: “Flexores y elementos lineales” (este concepto fue propuesto en una segunda etapa de estudio de la UPD):

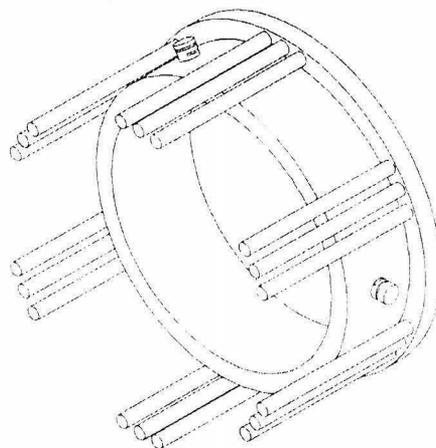


Figura IV.19 Concepto II

Análisis FEA de los conceptos

Para comprobar que nuestro *FEA* de la UPD sea correcto se analizó el modelo con un gradiente térmico de uno y de 36 grados centígrados. El resultado fue de $1.202e-6$ m y de $4.318e-4$ m respectivamente, lo cual corresponde con la expansión lineal analítica.

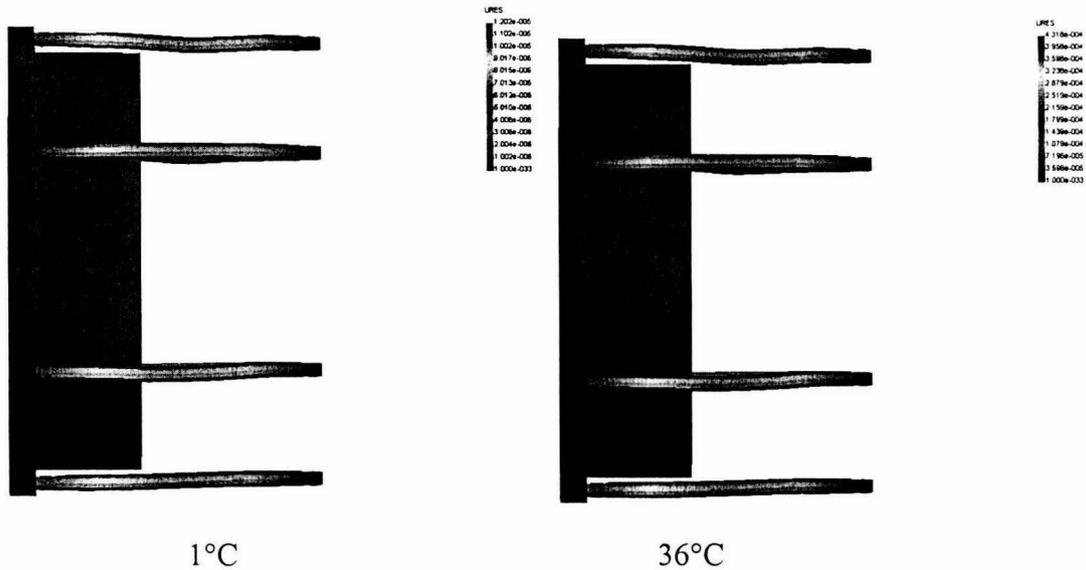


Figura IV.21 Comportamiento térmico y verificación del *FEA*

Para el concepto I se supone que el coeficiente de fricción de los Patines de Aguja es igual al del acero contra acero lubricado, aproximadamente igual a 0.1, la fuerza resultante de fricción sería del 10% del peso del sistema móvil. La masa estimada de la UPD es de 5 kg, incluyendo los lentes, celdas, y elementos lineales. La Figura 4.22 muestra la fuerza de empuje que tienen estos elementos lineales.

El análisis incluyó en la superficie contraria a la expansión una fuerza de 10 N actuando en dirección contraria a la expansión. La diferencia de desplazamiento fue del 2%. Con una fuerza de 100 N, la diferencia fue menor al 47% (desplazamiento de $2.33e-4$). La conclusión de esta simulación es que los elementos lineales tienen la suficiente fuerza de empuje para mover el sistema.

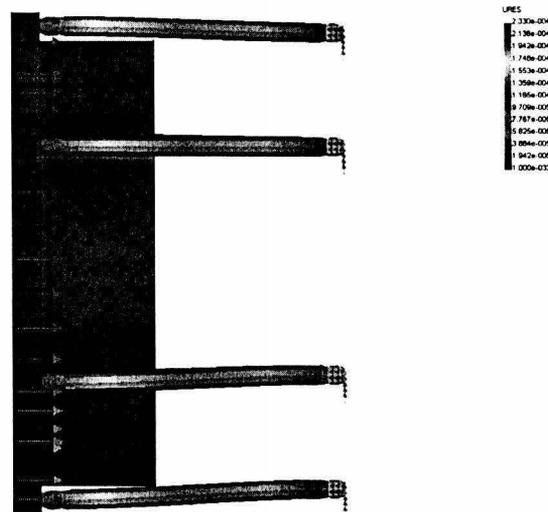


Figura IV.22 Expansión térmica restringida por una fuerza

Quando el instrumento se encuentre trabajando en posición vertical el desplazamientos que va a sufrir la UPD debido a la deformación de los elementos lineales es de 72 e-6 m (véase Figura 4.23). Esto implica que los elementos lineales requieren tener mayor rigidez para minimizar este desplazamiento. Por lo que se aumentó el número de los mismos a 12 con un diámetro de 6 mm. En este caso el valor del desplazamiento decreció hasta 32 e-6 m . La optimización de estos elementos se hizo hasta lograr un total de 18 elementos con un diámetro de 7 mm, el desplazamiento obtenido es de 15.8 e-6 m . Este sistema se puede optimizar más al usar un material con el mismo CTE pero con una mayor rigidez, o bien aumentando las dimensiones de estos 18 elementos.

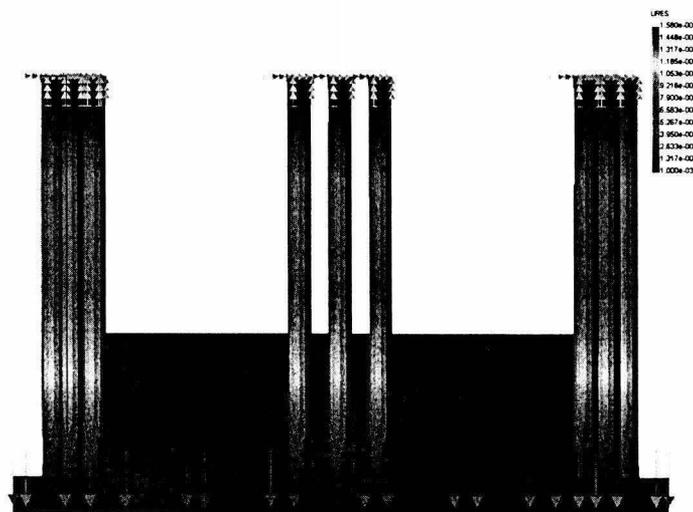


Figura IV.23. Cuando la gravedad actúa en forma vertical

Para minimizar estos desplazamientos podemos utilizar Nylon 12 pero con la mayor rigidez (2.9 GPa) y con el mismo coeficiente de expansión térmica. Los desplazamientos máximos obtenidos por *FEA* son 2.19×10^{-6} m. Este modelo fue mejorado en etapas posteriores de diseño mecánico (véase Figura 4.24).

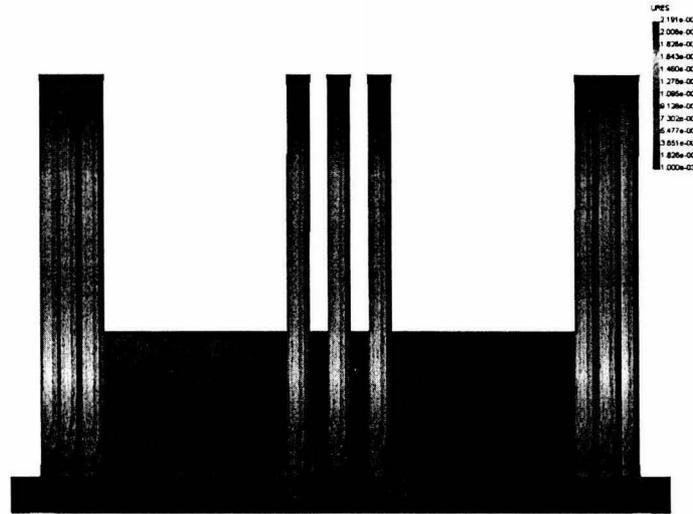


Figura IV.24 Valores obtenidos por *FEA* de los desplazamientos verticales

La figura general de la UPD dentro del barril para la cámara sería hasta el momento como se muestra en la Figura 4.25.

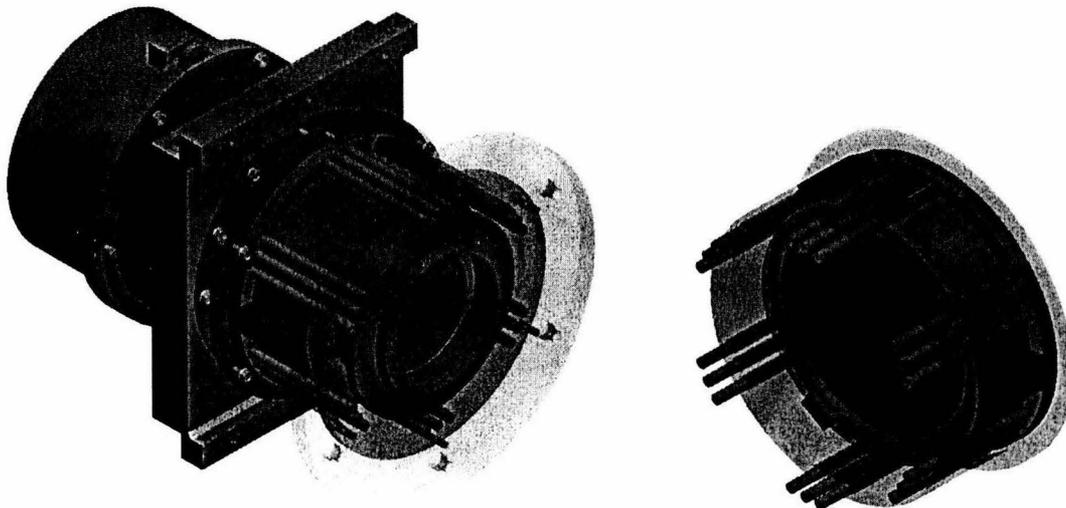


Figura IV.25 Cámara y UPD con el concepto I

El análisis del concepto II se muestra en la Figura 4.26. Los flexores son exclusivamente para dar rigidez a la flexión de la unidad. El desplazamiento máximo de la UPD fue de 432 micras ($12 \text{ micras}/^{\circ}\text{C} * 36^{\circ}\text{C}$), valor que se debe verificar que se satisfaga en todo el intervalo. Este concepto requiere de mayor tiempo de Diseño Conceptual e implica mayor complejidad de maquinado, por lo que la opción más viable hasta el momento es el concepto I. La evolución de este concepto se aprecia en la propuesta preliminar (véase Figura 4.27). El análisis FEA de ésta se muestra en el Capítulo VI.

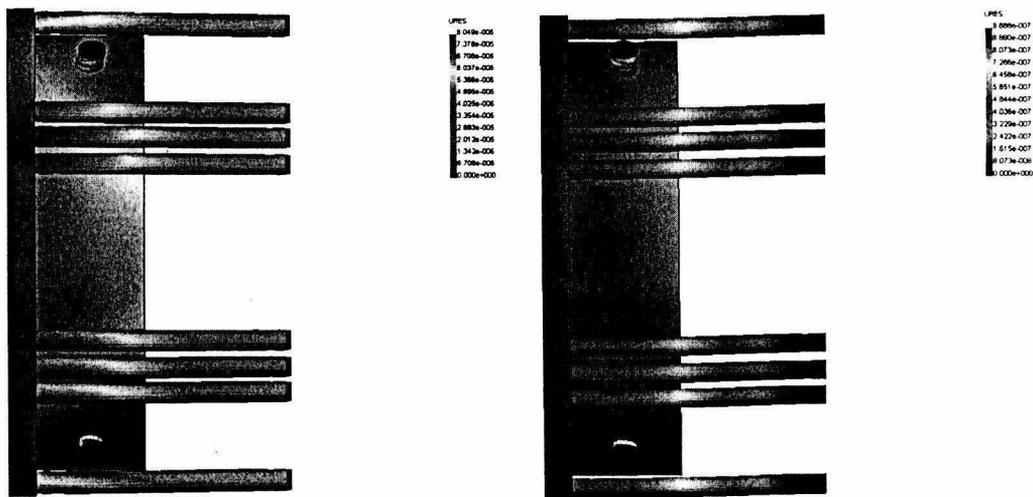


Figura IV.26 Desplazamientos de la UPD con flexores; a) gradiente de 36 °C; b) con gravedad

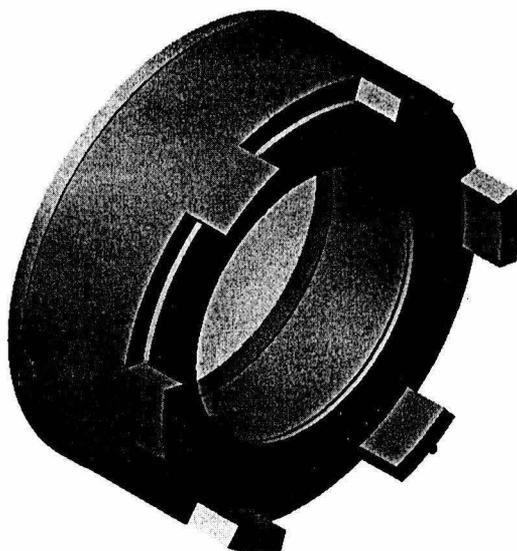


Figura IV.27 Propuesta preliminar

IV.6 Unidad de Enfoque

Los requerimientos básicos de esta unidad son que la posición relativa del primer doblete pueda ser modificada con respecto a D2 con una precisión de $4 \mu\text{m}$ con una repetibilidad mejor a $\pm 20 \mu\text{m}$ y con una carrera total de 1 cm (véase Apéndice B, 5.4.5 a 5.4.8). Debido a que el peso total de D1 con su mecánica de soporte es menor a 5 kg, los parámetros de posicionado son factibles.

Existen dos propuestas conceptuales para la unidad de enfoque. La primera que funciona a partir de un sistema de engranes que transmiten rotación a un soporte con rosca externa. Este soporte empuja a la celda D1 que desliza sobre un buje o guía, la celda no tiene rotación alguna solo presenta translación a lo largo de la guía. El movimiento se transmite a partir de un motor de pasos precargado por medio de un sistema de resortes.

La segunda opción es por medio de un actuador comercial cuyas características satisfagan los requerimientos establecidos. A continuación se muestra un breve análisis de ambas opciones, los cálculos mecánicos de la opción electa se muestran en el capítulo VI, y sus tolerancias son incluidas en el presupuesto de error.

Opción I: Sistema de engranes y soporte roscado

La relación de engranes está dada por el diámetro interno máximo en el barril y el espacio externo del barril.

Diámetro interno máximo = 0.166 m	Dientes = 232
Diámetro externo propuesto = 0.05 m	Dientes = 35
Relación de dientes = $0.025/0.166 = 1/6.64$	
Número de hilos por centímetro en la rosca del soporte = 10	
Resolución = $0.01/10/6.64/35 = 4.3 \text{ micras}$	

Estos valores demuestran que sí es posible obtener la resolución deseada con este sistema. La repetibilidad es también factible gracias al uso de un motor de pasos. Los posibles problemas son los juegos y el deslizamiento de la celda sobre el buje o sus guías.

Opción II: Sistema lineal de deslizamiento

La fuerza de enfoque del sistema se logra por medio de un actuador comercial. Este producto garantiza las especificaciones de resolución y de repetibilidad deseadas para nuestra aplicación (por ejemplo, véase actuadores UltraMotion y PI).

Para el centrado de la celda en ambas opciones de la unidad de enfoque se pueden implementar uno de los siguientes sistemas: a) celda soportada en tres rodamientos, uno

se usa como precarga y los otros como definidores de posición con ayuda de tornillos; b) por medio de un buje (ajuste g5-H7 de 54 a 70 micras de juego) y c) por medio de un riel guía (véase Capítulo VI).

IV.7 Generalidades

Algunas de las consideraciones que provienen de las especificaciones para la evaluación de los diferentes sistemas son:

- Deberá ser posible ensamblar y desensamblar el barril (incluyendo toda su óptica) sin la necesidad de hacer alineamientos posteriores, por lo cual cada singlete o doblete irá en su propia celda.
- El barril completo deberá estar contenido por una envolvente que define el espacio máximo del cual dispone dentro del instrumento.
- La masa máxima del barril de la cámara deberá ser menor a 47 kg.

Referencias

- i Fuentes, Javier, *Camera Unit Specifications*, Instituto de Astrofísica de Canarias, España.
- ii Yoder, Paul, *Mounting Optics in Optical Instruments*, SPIE, EUA 2000.
- iii Farah, Alejandro, *Camera Barrel Mechanical Calculations*, Instituto de Astronomía (UNAM), México 2003
- iv Collins, *Mechanical Design of Machine Elements and Machines*, John Wiley & Son, 2000
- v Farah, Alejandro, *Camera Barrel Preliminary Design*, Instituto de Astronomía (UNAM), México 2003
- vi J. Jesús González, C. Tejada, A. Farah, J. L. Rasilla, F. J. Fuentes, “*Thermal Effects & thermal compensation in the OSIRIS camera*”, SPIE Proceedings, Astronomical Telescopes and instrumentation, 2002.artículo descripción del compensador térmico.
- vii Chevalier, A., *Dibujo Industrial*, Editorial limusa, México 1997
- viii A. Farah, J. Godoy, F. Velázquez, C. Espejo, S. Cuevas, UNAM; V. Bringas, A. Manzo, L. del Llano, J. L. Sánchez, A. Chavoya, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (México); N. Devaney, J. Castro, L. Cavaller, GRANTECAN (Spain), “*Finite Element*

-
- Analysis of the GTC Commissioning Instrument Structure*", SPIE Proceedings, Astronomical Telescopes and instrumentation, 2002.
- ix A. Farah, "*Structure analysis of the primary mirror support for the New Technology Optical Infrared Telescope (TIM) using computer-aided finite element method*", SPIE Proceedings, marzo 2000
 - x Dieter, George E., *ENGINEERING DESIGN A Materials and Processing Approach*, U. De Chicago, 1991.
 - xi Rothbart, *Mechanical Design and Systems*, Handbook, 2ª edición, University of Cambridge, E.U.A., 1985.
 - xii Popov Egor, P., *Introducción a la Mecánica de Sólidos*, primera edición, editorial Limusa, México, 1976.
 - xiii Shigley and Mischke, *Mechanical Engineering Design*, quinta edición, McGraw-Hill, E.U.A., 1989.
 - xiv Hayrettin Kardestuncer (editor jefe), *Finite Element Handbook*, McGraw-Hill, México 1987.
 - xv Segerlind Larry, *Applied Finite Element Analysis*, 2ª edición, editorial John Wiley & Sons, E.U.A., 1984
 - xx Pilkey Walter, D., *Mechanics of structures: Variational and Computational Methods*, CRC Press, Inc., Florida, E.U.A., 1994.
 - xxi Leigh Ronald, W., *Solid Modeling with AutoCAD*, 2ª edición, editorial Ventana Press, E.U.A., 1992.
 - xxii Logan, D., *A First Course in the Finite Element Method using Algor*, editorial Publishing Company, E.U.A., 1997.
 - xxiii *Optical Engineering*, SPIE Decemer 2002 Vol.41 No.12.
 - xxiv *Optomechanical Design and Engineering 2001*, San Diego 2001, SPIE Vol. 4444

V. DISEÑO PRELIMINAR

El objetivo de este Capítulo es describir el Diseño Preliminar del sistema mecánico de soporte para las lentes del Barril basados en todas las decisiones tomadas durante el Diseño Conceptual. Se incluye una descripción de cada una de los componentes que lo integran.

V.1 Descripción general del BC

El Diseño Preliminar del Barril de la Cámara se muestra en las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3, el diseño es modular para permitir su ensamble y desensamble. Está compuesto por 4 subensambles y dos interfaces. El barril 1 incluye a D1 y a la unidad de enfoque. El barril 2, compuesto por D2, la interfase con el obturador, S1, D3 y S2, sirve de interfase de soporte con el resto del instrumento (según especificaciones). El singlete 3 es la ventana del crióstato para el CCD y no forma parte del BC.

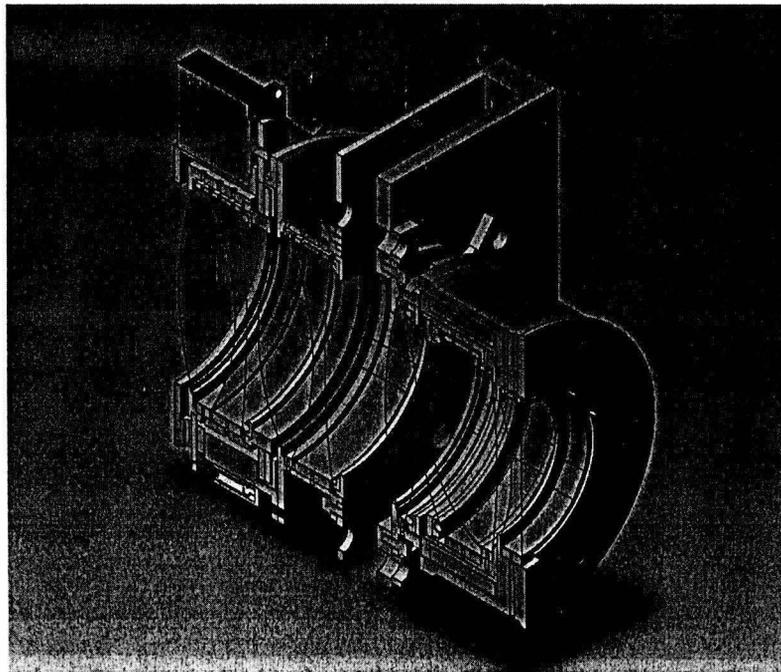


Figura V.1. Vista en corte del Diseño Preliminar de la cámara.

Los dobletes D1, D2 y D3, así como las lentes S1 y S2 de BC están contenidos en su propia celda. El acceso a cualquier de estos componente se puede lograr sin la necesidad de desensamblar el sistema completo. El ensamble de toda la cámara es por medio de tornillos con tuerca y la repetibilidad de este proceso se garantiza con pernos guía de alineación, véanse Figura 5.2 y 5.3.

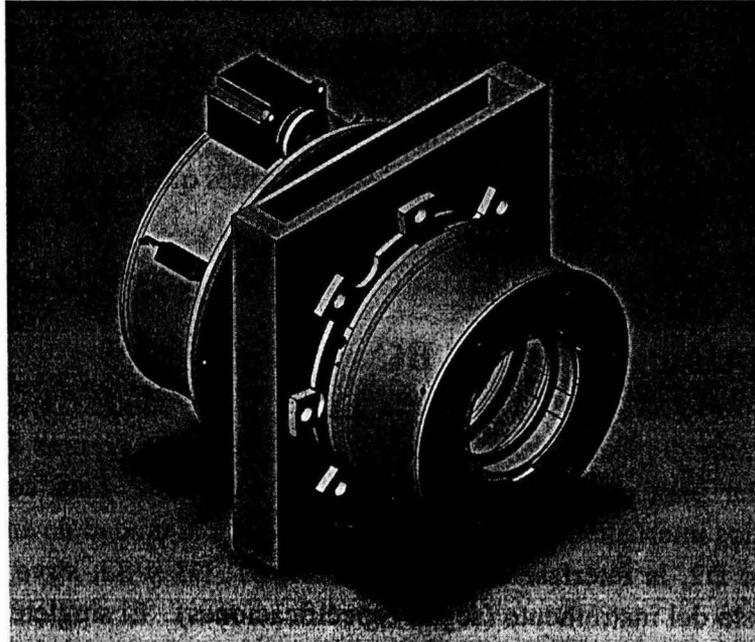


Figura V.2 Vista isométrica del BC.

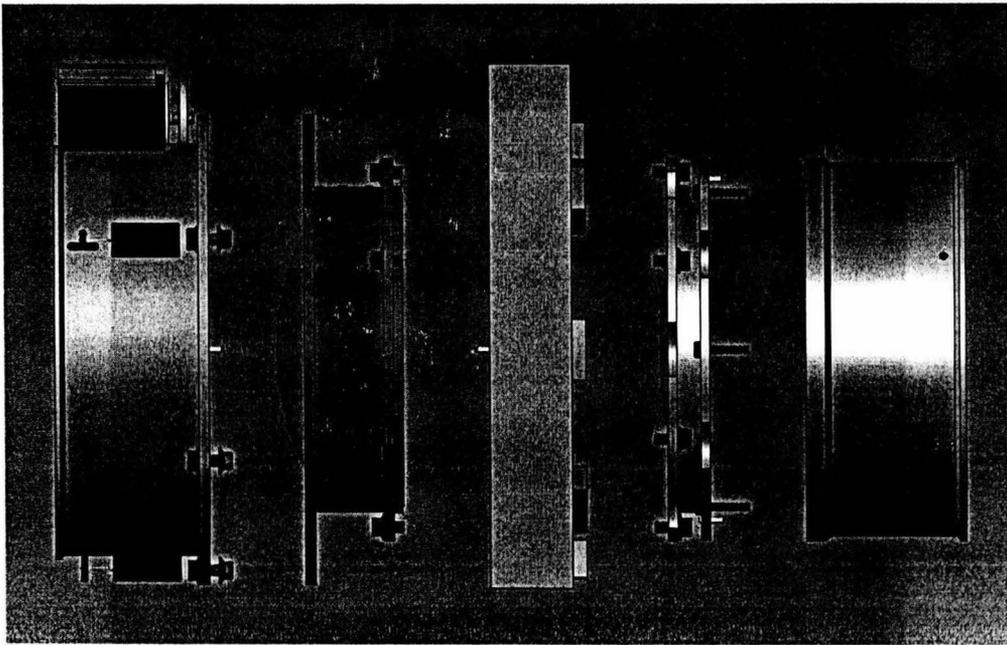


Figura V.3 Explosión del BC completo, donde de izquierda a derecha se muestran los componentes, D1 y unidad de enfoque, D2, obturador, S1 y D3-S2.

El diseño de la cámara satisface el requerimiento dimensional especificado en REF, véase Figura 5.4.

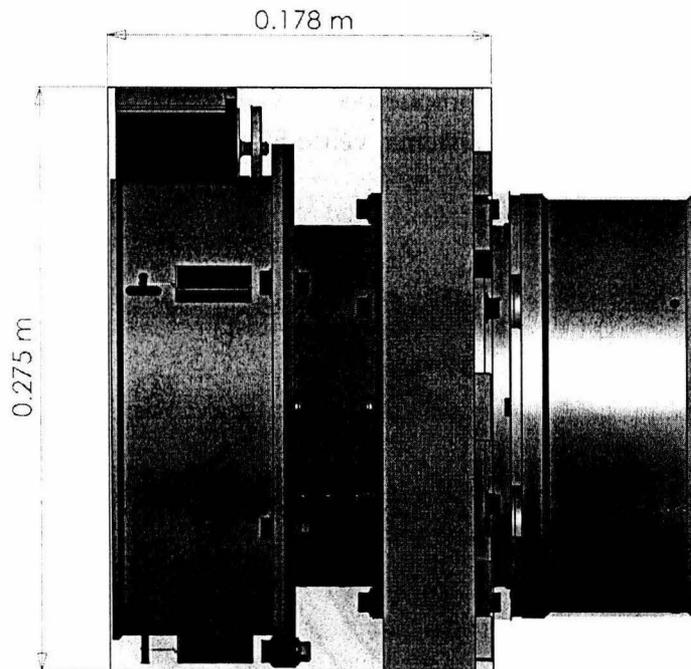


Figura V.4 BC y envolvente dimensional.

El SR de cada lente es un anillo con muelles de amortiguación, contenido en su celda correspondiente (Figura 5.5). Es un soporte compuesto por una sola pieza, que una vez maquinado a las dimensiones deseadas no requiere de ajustes posteriores (véase VI.I).

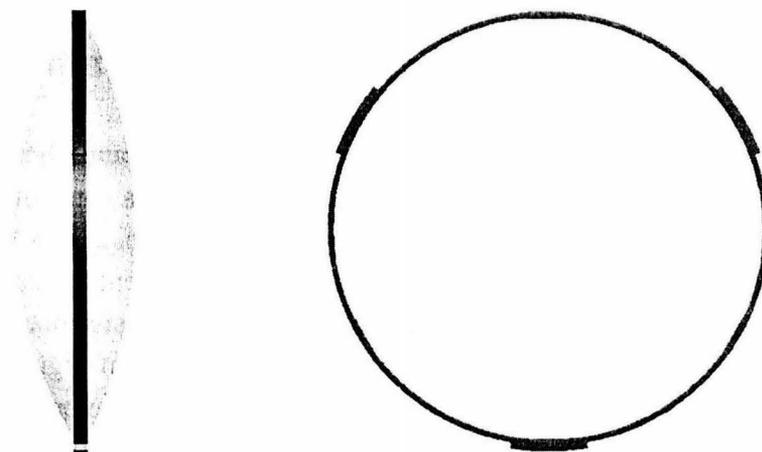


Figura V.5 SR para D1.

La posición axial de cada lente en el sistema óptico se define con topes mecánicos de tipo “*Sharp Edge*”. Para liberar los posibles esfuerzos debidos a la expansión térmica se utiliza un O-ring (véase Figura 5.1). Estos esfuerzos generados se analizaron para cada caso en específico y se garantiza que están por debajo del nivel especificado (véase VI.II). El material y las dimensiones propuestas de cada componente son propuestas a partir del comportamiento térmico del sistema, véase Figura 5.6.



Figura V.6 (1) Celda 2 de B2, (2) soporte radial, (3) lente, (4) O-ring y (5 y 6) separadores de S1.

V.2 Barril 1: Celda 1, Doblete 1 y Unidad de Enfoque

La unidad de enfoque funciona a partir de un sistema de engranes helicoidales, éstos están restringidos a toda traslación por medio de rodamientos. La rotación es transmitida a la celda de D1 por medio de roscas. El enfoque se logra gracias a la traslación de la celda a lo largo de un rodamiento axial o de un buje. El movimiento se transmite a partir de un motor de pasos. Para evitar los juegos entre las roscas, el sistema está precargado por medio de tres resortes Figura 5.7. La celda no tiene rotación alguna solo presenta traslación a lo largo de ejes guía. El ajuste del sistema está incluido en el presupuesto de error (véase VI.IV). El sistema cuenta también con un codificador lineal de posición. La interfase del B1C1 se acopla con el B2C1.

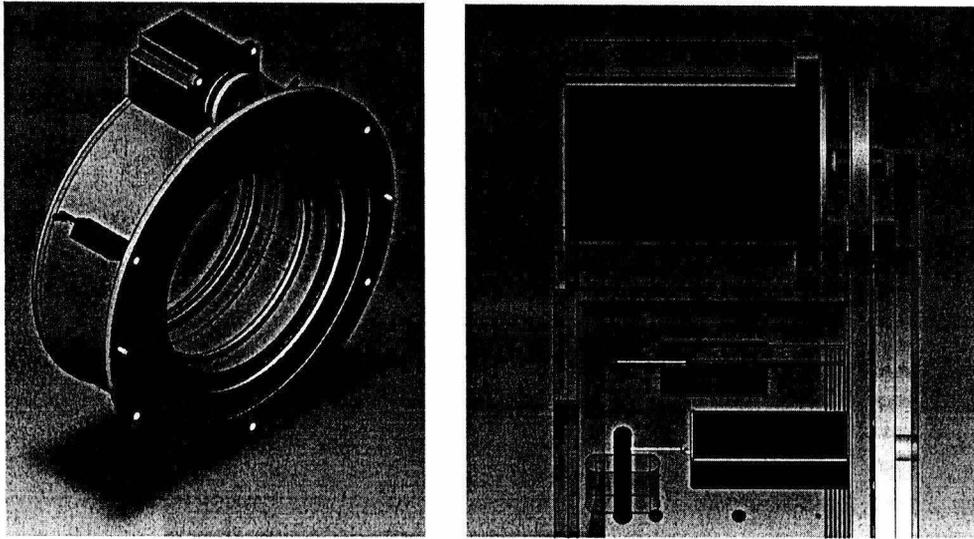


Figura V.7 B1C1 y Unidad de Enfoque.

V.3 Barril 2

B2C1: Celda 1, doblete 2

En la Figura 5.8 se muestra el B2C1 (véase la Tabla 5.2). La celda tiene dos interfaces, por un lado con B1C1, y por el otro con el Obturador.

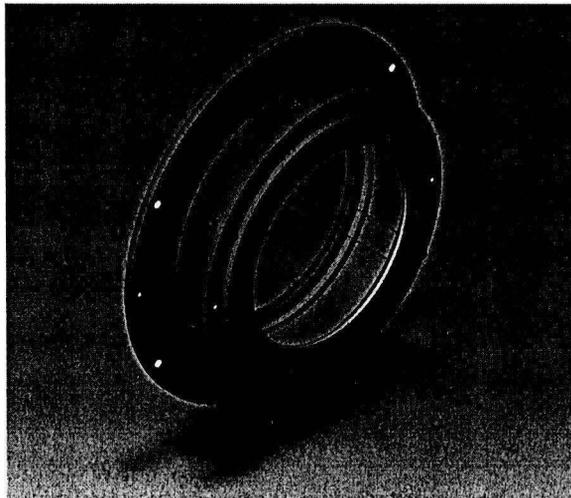


Figura V.8 B2C1.

Obturador

La función de este elemento es facilitar el acceso del Obturador, así como de ser la interfase de soporte con el resto del instrumento. El material del que está hecho este componente es de acero. La ubicación de los tornillos de ensamble con el resto del instrumento está definida por REF (véase Figura 5.9). El Obturador es ensamblado, con B2C1 y B2C2.

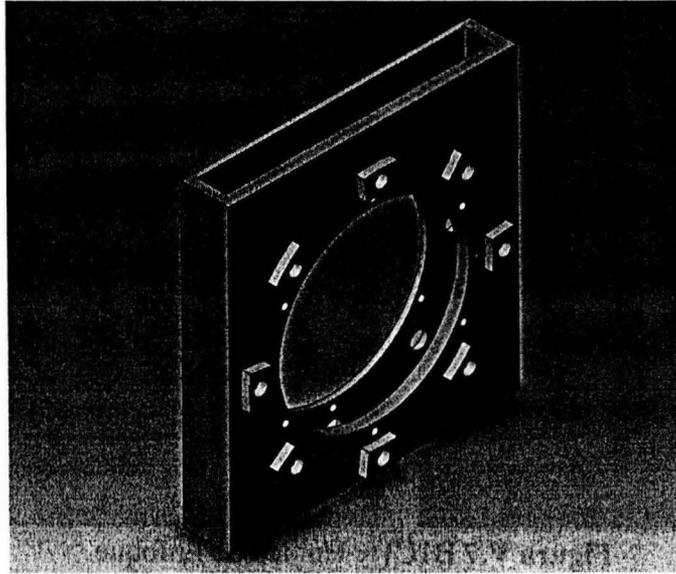


Figura V.9 Obturador.

Celda 2, singlete 1

En la Figura 5.10 se muestra el B2C2 (véase la Tabla 5.2). B2C2 es ensamblado con el Obturador y B2C3.

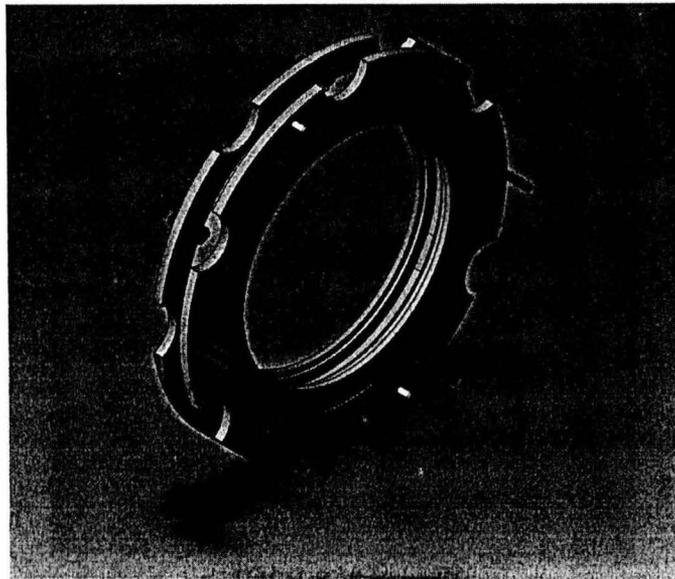


Figura V.10 B2C2.

B2C3: Celda 3 y Unidad Pasiva de Desplazamiento (UPD)

La UPD contiene a D3 y S2 (Figura 5.11). El doblete D3 ha sido electo como compensador térmico de calidad de imagen y escala de placa de OSIRIS. Para cumplir esta función es necesario que D3 tenga un movimiento axial pasivo de $12.6 +1.9/-2.6$ micras/m°C (Camera Unit Specifications).

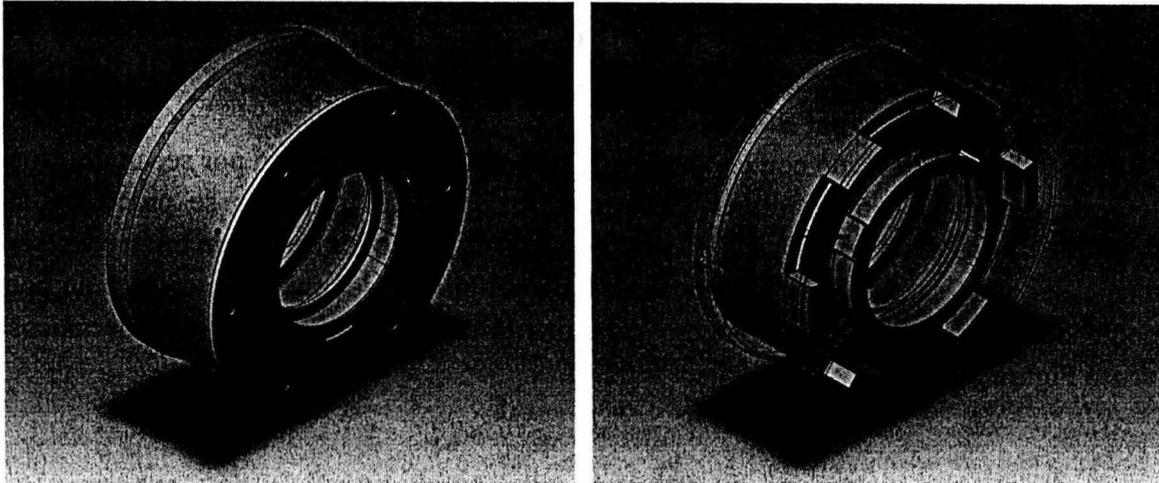


Figura V.11 B2C3 y UPD

La celda de D3 esta contenida en la UPD, esta unidad tiene la función de corregir la posición del doblete conforme varíe la temperatura. El movimiento se logra gracias a la expansión térmica de un cilindro polimérico (Anexo REF. La longitud del cilindro se calcula en función del CTE del material electo. Las propiedades de este elemento serán verificadas en un laboratorio certificado de metrología. Del FEA se concluyó que la UPD tiene la suficiente rigidez para soportar al D3 y su celda (véase VI.IV).

La unión entre estos elementos en sus dos extremos debe ser lo más firme y estable posible. En la etapa de diseño crítico se ajustarán las medidas de la unidad (véase VI.IV).

V.4 Materiales y peso estimado

El material con mayor proporción para BC es Aluminio. Los esfuerzos y desplazamientos generados por el peso mismo de cada componente y de las lentes se encuentran dentro de los valores permisibles (véase VI.I y VI.V).

Peso estimado del BC: 15.2 kg (Modelo 3D, incluyendo las lentes)

Peso estimado de las lentes: 9 kg

Peso total: 24.2 kg

La lista de componentes incluidos se muestra en la Tabla 5.2. Esta estimación no incluye el peso de los tornillos y tuercas de sujeción.

V.5 Proceso de maquinado

Proceso de maquinado del BC

Este proceso será realizado con equipo CNC, las celdas se maquinarán por separado. Una vez maquinados y con las dimensiones aproximadas a las deseadas se procederá al ensamble con ayuda de pernos guía y tornillos. Las dimensiones de la cámara pueden ser verificadas y de ser necesario rectificadas. La repetibilidad del ensamble se obtiene por medio de los pernos guía. El proceso garantiza la coincidencia de los ejes mecánicos (véase Figura 5.12).

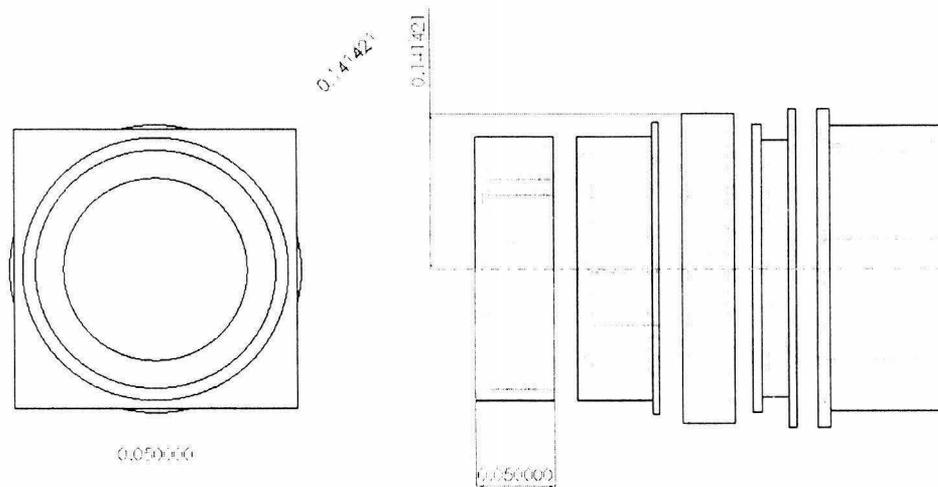


Figura V.12 Proceso de maquinado del barril

Proceso de maquinado de los arillos del SR

Los arillos del SR son la interfase entre las lentes y las celdas que los contienen. Su fabricación será realizada a partir de las dimensiones medidas de las lentes terminadas. Las dimensiones de los arillos serán ajustadas para lograr el apriete deseado tanto con las lentes como con las celdas. Para evitar la concentración de esfuerzos, el contacto entre el arillo y el lente debe ser homogéneo (véase Figura 5.13).

Las dimensiones del SR no requieren de alta precisión a excepción de los puntos de contacto con las lentes. Los diferentes ejes de maquinado deben ser lo más coincidentes posibles para garantizar la concetricidad. Este proceso se puede realizar en el centro de maquinado conservando una referencia fija durante los diferentes procesos.

Para lograr que el eje óptico y el mecánico coincidan, los tres puntos de contacto deben describir una circunferencia igual a la del lente. Los tres puntos del arillo que están en contacto con la lente pueden ser ajustados por medio de fresado. En este proceso también es importante conservar una referencia fija para las mediciones dimensionales. El

ensamble entre el vidrio y el metal se puede lograr gracias a la posibilidad de usar herramientas de ensamble (véase la sección de ensamble y cálculos mecánicos).

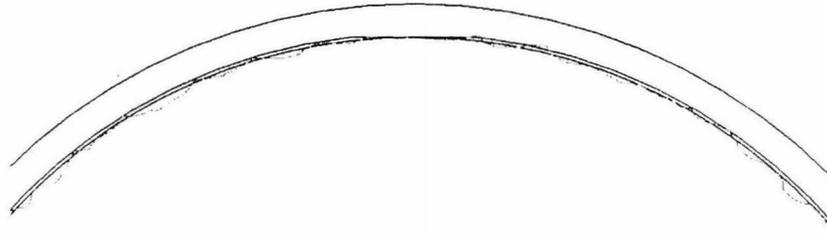


Figura V.13 Contacto entre el lente y su soporte radial

Tolerancias de maquinado

A continuación se muestra en la Tabla 5.1 las tolerancias de diferentes procesos de maquinado. Estos valores nos permiten concluir que es posible fabricar estos componentes mecánicos.

Tabla 5.1 Tolerancias de maquinado

MAQUINA	MARCA	MODELO	OPER.	DIMS. PIEZA	Tolerancias, 10 ⁻³ m
Centro de Maquinados	HYUNDAI	SPT-V100	CNC	800X500X600	10
Electroerosionadora Penetración	AGIE	MONDO STAR-50	CNC	860x650x315	10
Electroerosionadora Corte por Hilo	AGIE	AGIECUT CLASSIC 3	CNC	1050x650x250	1
Torno fresador	HYUNDAI	HIT-20M	CNC	Ø294X434	10
Torno	HYUNDAI	HIT-8	CNC	Ø160X285	10

Las tolerancias de cada componente deben ser garantizadas por el fabricante y serán debidamente revisadas en un laboratorio de metrología certificado.

V.6 Ensamble y desensamble (herramientas)

El ensamble y desensamble de cada celda se va a realizar con ayuda de una herramienta especial. Esta herramienta va a sustentar las lentes como se muestra en la Figura 5.14. Los SR deben ser previamente colocados en su celda con los tornillos auxiliares de ensamble con una tensión que será establecida en los manuales de usuario. Posteriormente la celda será acoplada con el sistema óptico al subirla.

El ajuste entre cada lente y su respectivo arillo es holgado mientras los tornillos estén actuando (véase VI.Ic). El ensamble tiene un ajuste que le permite deslizar el lente hacia adentro del arillo (ajuste g6-H7 +40/-14 a -39 micras)¹. Para que el centrado de las lentes sea uniforme una vez en su sitio se deberá liberar los tornillos siguiendo un orden específico. Este proceso deberá ser realizado de forma horizontal y siguiendo el orden descrito a continuación y detallado en el manual de usuario.

- a) Posicionado de arillos en la precelda, junto con los separadores adecuados.
- b) Tornillos auxiliares para el paso de las lentes: La fuerza se aplicaría con ayuda de una tuerca apoyada en la celda de cada lente (véase VI.Ic y Figura 5.14).
- c) Introducción de las lentes: singletes y dobletes cementados.
- d) Ajuste de los tornillos radiales y liberación de los mismos (Manual de Usuario).
- e) Separador y O-ring restringidos por un elemento roscado con una precarga mínima.
- f) Posteriormente la precelda se acopla con el BC por medio de los pernos guía y tornillos.

Esta misma metodología se puede aplicar al resto de las celdas. El ensamble de cada celda deberá hacerse bajo intervalos específicos de temperatura.

Repetibilidad

La repetibilidad del ensamble del sistema depende directamente de la calidad de los maquinados. Una vez acoplada será revisada y rectificada hasta lograr la precisión requerida. La repetibilidad que se puede obtener es confiable y dentro de especificaciones.

V.7 Componentes totales

El número total de componentes estimados es de 55 con un peso aproximado de 24.2 kg. En esta estimación no se considera el peso de los tornillos, tuercas y elementos de ajuste. A continuación se muestra una lista con los componentes del BC:

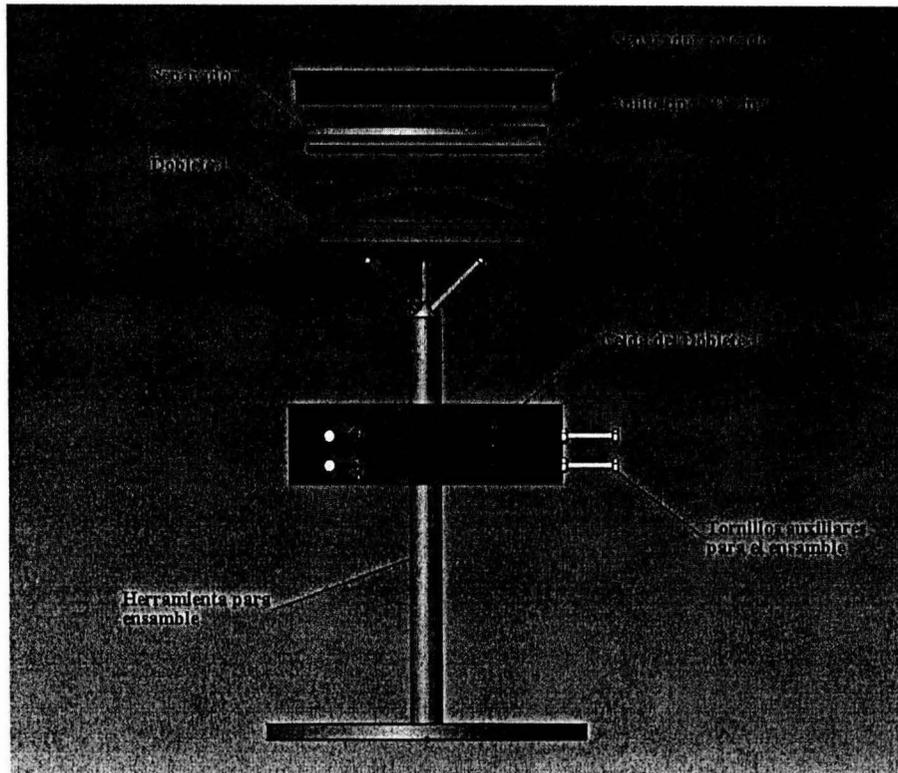


Figura V.14 Herramienta para ensamble

Tabla 5.2 Componentes del BC.

Barril 1		Barril 2				
Celda 1	UE	Celda 1	Celda 2	Celda 3	UPD	Shutter
D1L1	Motor	D2L1	S1	D3L1	UPD	Shutter
D1L2	Eje	D2L2	SRS1	D3L2	CUPD	
SRD1L1	Buje	SRD2L1	(3) TMSRS1	SRD3L1		
SRD1L2	Engrane	SRD2L2	CS1	SRD3L2		
(3) TMSRD1L2	Piñón	(3) TMSRD2L2	O-ringS1	(3) TMSRD3L2		
CD1	(2) RodaSKF	CD2	Sep1S1	CD3		
Sep1D1		Sep1D2	Sep2RS1	Sep1D3		
O-ringD1L2		O-ringD2L2		O-ringD3L1		
Sep2D1		Sep2D2		Sep2D3		
Sep3RD1		Sep3RD2		S2		
RodaSKF				SRS2		
CCD1				(3) TMSRS2		
(3) HPT				O-ringS2		
(3) BR				Sep1S2		
				CCD3S2		

D: Doblete, L: Lente, S: Singlete, SR: Soporte Radial, TM: Tope Mecánico, C: Celda, Sep: Separador, CC: Contenedor de la Celda, HPT: Herramienta para Tensión, BR: Buje Resorte.

Referencias

ⁱ Chevalier, A., *Dibujo Industrial*, Editorial limusa, 1997.

VI CÁLCULOS MECÁNICOS

El objetivo de este Capítulo es mostrar los cálculos mecánicos del Diseño Preliminar del Barril. Los resultados que se presentan son todos aquellos que son necesarios para justificar las decisiones que fueron tomadas para dicha propuesta.

Los cálculos se realizaron para los casos de estudio más drásticos y están divididos de la siguiente manera; soportes radiales, topes mecánicos axiales, unidad de enfoque, unidad pasiva de desplazamiento, deformación gravitatoria del barril. Las técnicas utilizadas incluyen cálculos analíticos, simulaciones por FEA así como el uso de criterios establecidos y corroborados de diseño mecánico. Todos y cada uno de los valores que se presentan a continuación se encuentran dentro de los valores impuestos por el documento de especificaciones.

VI.1 Soporte radial: Modelo G optimizado

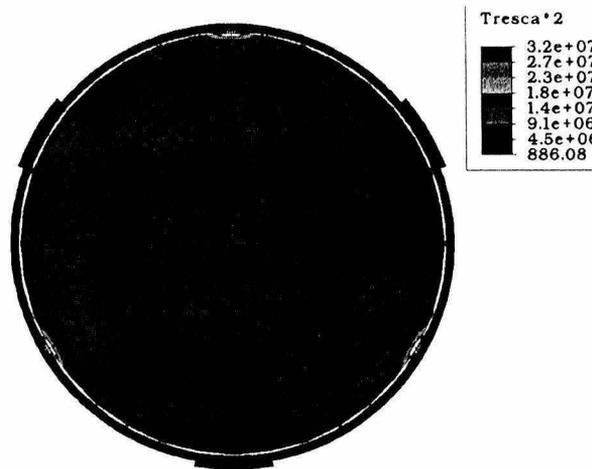
Análisis de esfuerzo y desplazamientos

El gradiente térmico utilizado en las simulaciones fue de 36°C , de esta manera se garantiza que los esfuerzos están dentro de valores permisibles en todo el intervalo (véase Tabla 4.4). Las dimensiones de maquinado deberán ser propuestas partiendo de que la temperatura libre de esfuerzos es 30°C . Los soportes radiales para cada lente deben tener un CTE similar al del vidrio que contienen, como se propuso en los criterios de diseño, para reducir los esfuerzos inducidos y evitar el efecto de birrefringencia.

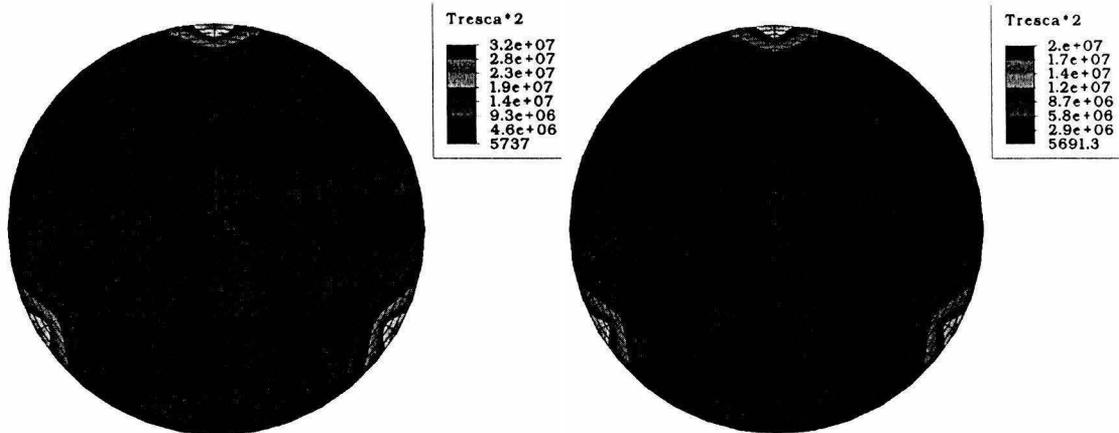
a) Esfuerzos térmicos:

El caso del segundo doblete es el más crítico de todos los lentes, las Figura VI.1 muestra el esfuerzo térmico que se genera bajo la acción de un gradiente térmico de 36°C . El máximo esfuerzo que se presenta en la apertura óptica del lente D2L1 es de 0.8 MPa , valor que se encuentra por debajo del especificado (Figura VI.1a).

En el caso de D2L2, el esfuerzo térmico generado con un soporte radial de aluminio (6061) es mayor que el obtenido cuando es de acero (4041), esto es debido a la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica relativas al del lente (véase Figura VI.1b). El resultado es congruente con el esperado, mientras más similares sean éstos coeficientes menor es el esfuerzo generado (véase Criterios de Diseño, Capítulo IV).



(a) D2L1 con un soporte radial de acero 4041
(esfuerzo de 0.8 MPa en OA)



(b) D2L2 con soporte radial de aluminio 6061; D2L2 con soporte radial de acero 4041
(esfuerzos 4.6 de MPa en OA) (esfuerzos 2.9 MPa en OA)

Figura VI.1 Esfuerzos térmicos en el segundo doblete
(OA = Apertura Óptica)

La Figura VI.2 muestra la simulación del lente D1L2 incluyendo la celda que contiene el soporte radial de Titanio (6Al-4V). El esfuerzo residual en la apertura óptica se encuentra también bajo especificaciones, este valor tiene un incremento debido a la diferencia de coeficientes de expansión térmica entre la celda y el soporte radial del lente.

Las dimensiones y materiales finales para los soportes radiales de cada lente serán establecidos en la etapa de diseño mecánico crítico. En la Tabla 6.1 se muestra la propuesta preliminar del material de los mismos. El espesor preliminar de los muelles de amortiguamiento del soporte radial es de 3 mm.

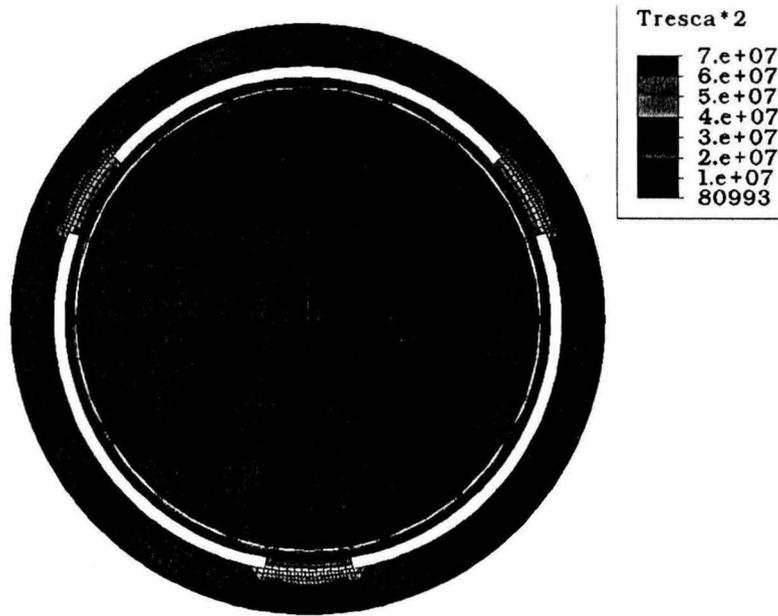


Figure VI.2 Esfuerzos térmicos en D1L2 con soporte radial de Titanio y celda de aluminio (esfuerzo de 1.13 MPa en OA).

Tabla 6.1 Materiales de los lentes y sus soportes radiales

Lente	Material	CTE (C ⁻¹) a RT	Soporte radial	Material	CTE (C ⁻¹) a RT
D1L1	Ohara S-FPL53	14.2x10 ⁻⁶	RSD1L1	Acero (4130)	13.5x10 ⁻⁶
D1L2	Ohara BSM51Y	6.3x10 ⁻⁶	RSD1L2	Titanio (6Al-4V)	9.5x10 ⁻⁶
D2L1	CaF ₂	18.9x10 ⁻⁶	RSD2L1	Aluminio (6061-T6)	23.58x10 ⁻⁶
D2L2	Ohara S-BAL35Y	5.7x10 ⁻⁶	RSD2L2	Titanio (6Al-4V)	9.5x10 ⁻⁶
S1	Ohara S-FPL51Y	13.6x10 ⁻⁶	RSS1	Acero (4130)	13.5x10 ⁻⁶
D3L1	Ohara S-BAL15Y	7.6x10 ⁻⁶	RSD3L1	Titanio (6Al-4V)	9.5x10 ⁻⁶
D3L2	CaF ₂	18.9x10 ⁻⁶	RSD3L2	Aluminio	23.58x10 ⁻⁶
S2	Ohara PBL6Y	8.3x10 ⁻⁶	RSS2	Titanio (6Al-4V)	9.5x10 ⁻⁶

b) Desplazamientos debidos a la gravedad

El desplazamiento debido a la carga gravitatoria fue analizado en dos casos. El primero es D1L1, el cual es el lente más pesado del barril y el segundo D2L1, que es el lente con el soporte radial más angosto. La simulación de los desplazamientos se muestran en las Figuras 6.3 y 6.4, los valores máximos están incluidos en el presupuesto de error del sistema al final de este Capítulo.

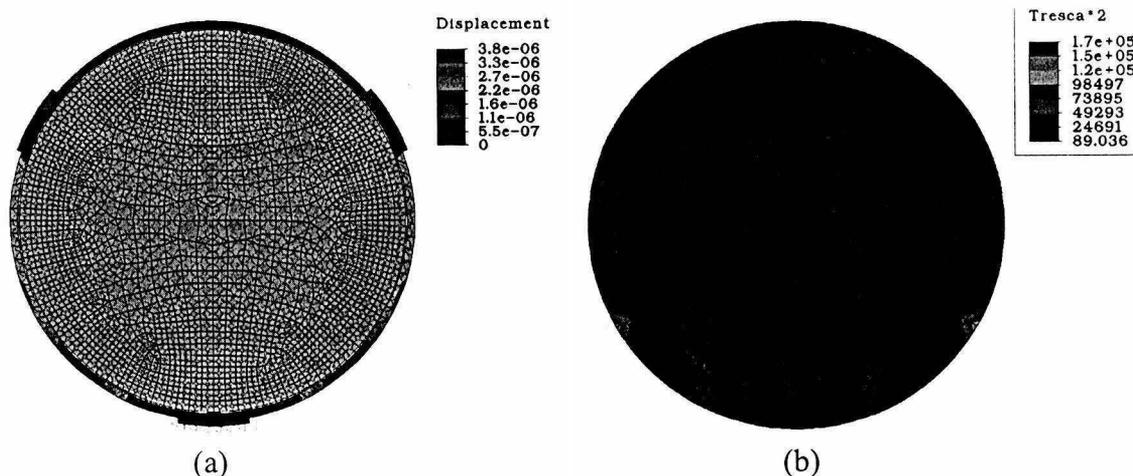


Figura VI.3 (a) desplazamientos en D1L1 (máximo 2.67 μm)
(b) esfuerzos en D1L1 (máximo 0.049 MPa).

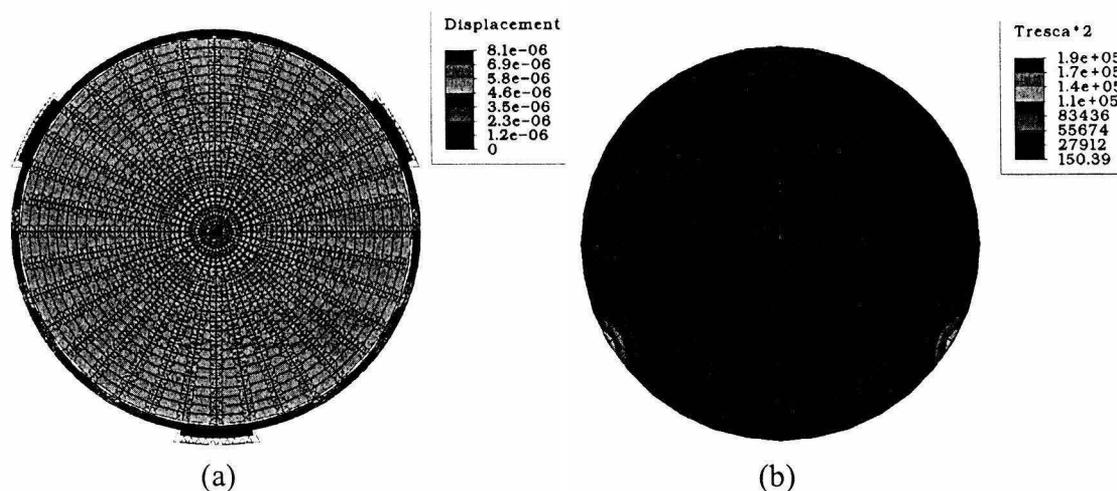


Figura VI.4 (a) desplazamientos en D2L1 (máximo 5.36 μm)
(b) esfuerzos en D2L1 (máximo 0.055 MPa).

c) Ensamble: tornillos auxiliares de tracción

El proceso de ensamble y desensamble se explica con detalle en el Capítulo V (Diseño Preliminar). En esta sección se muestran los resultados de la simulación por FEA de los tornillos auxiliares de tracción. La simulación es del soporte radial de S2 cuyo material es Titanio (6Al-4V) ya que es el caso crítico al presentar el mayor de los anchos. La fuerza aplicada es equivalente a 150 N y el desplazamiento resultante es de alrededor de 60 μm (véase Figura VI.5). Este valor permitirá un ensamble más sencillo del lente con su soporte radial.

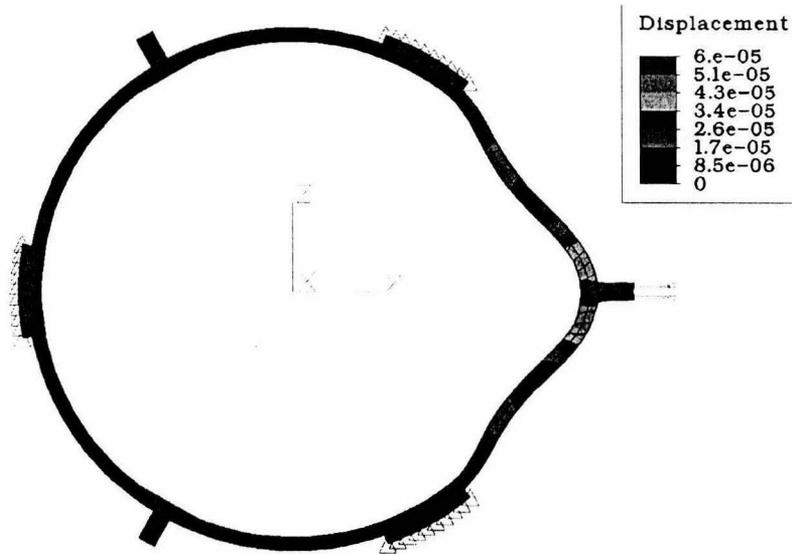


Figura VI.5 Desplazamiento debido a los tornillos auxiliares de tracción del soporte radial de S2.

VI.2 Posicionado axial de los lentes

La posición axial de cada lente está definida con topes mecánicos con filos agudos. Para ver detalles véase el Capítulo V del Diseño Preliminar.

a) Esfuerzos y expansiones térmicas

En la Tabla 6.2 se muestran los desplazamientos axiales en la apertura óptica de cada lente (singlete o doblete) cuando exista un gradiente térmico de 36 °C; también se incluye la expansión equivalente de la celda (aluminio 6061) y la diferencia entre ellos. Todos los valores de la Tabla se encuentran en el intervalo lineal, siendo el caso más drástico el doblete 3, con una diferencia de casi 20.7 E-6 m.

Con el objetivo de evitar la concentración de esfuerzos se hace uso de O-rings, los cuales son capaces de absorber estas expansiones y contracciones, manteniendo la óptica en la

posición deseada. Este Diseño Preliminar propone el uso de O-rings de 5 mm de diámetro; lo cual se traduce para el caso más crítico en una deformación del 0.42%, el cual es un valor no representativo para la concentración de esfuerzos.

Tabla 6.2 Expansión térmica de los lentes y su celda

Lentes	OA (10^{-6} m)	Celda OA (10^{-6} m)	Difference (10^{-6} m)
D1L1+D1L2	13.2	31.2	18.0
D2L1+D2L3	26.5	34.1	7.6
S1	4.3	7.5	3.2
D3L1+D3L3	26.8	47.5	20.7
S2	5.3	15.1	9.8

La siguiente simulación FEA fue hecha para ser comparada con los desplazamientos analíticos (véase Figura VI.6), ambos valores son aproximados.

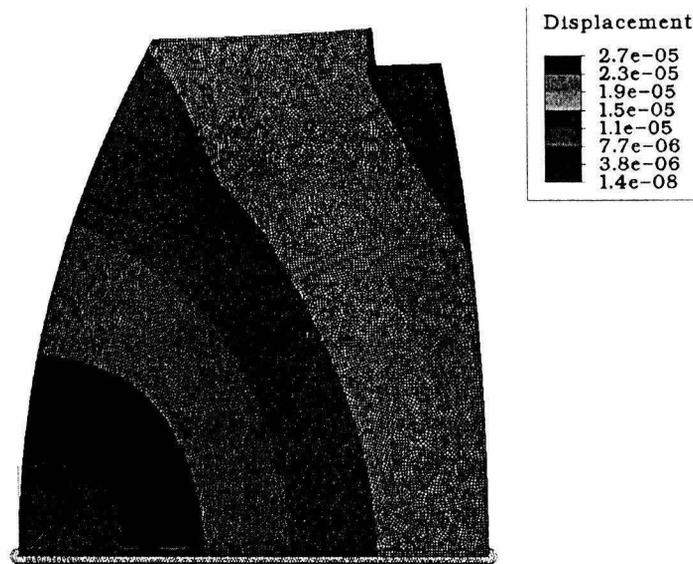


Figure VI.6 Expansión térmica de D3.

b) Precarga axial aplicada

Las simulaciones FEA pueden ser usadas para calcular la precarga máxima admisible. Por ejemplo, el caso D3 fue modelado axisimétricamente y analizado como se muestra en la Figura VI.7. Las reacciones generadas debido a la precarga y a la expansión térmica de los lentes nos permiten asegurar que la birrefringencia no se alcanza. Con esta metodología podemos calcular un torque específico para cada lente. Los valores finales serán calculados en la etapa de Diseño Crítico. El esfuerzo total generado por la precarga

debe ser incluido en el presupuesto de error, y debe satisfacer las especificaciones (véase VI.6).

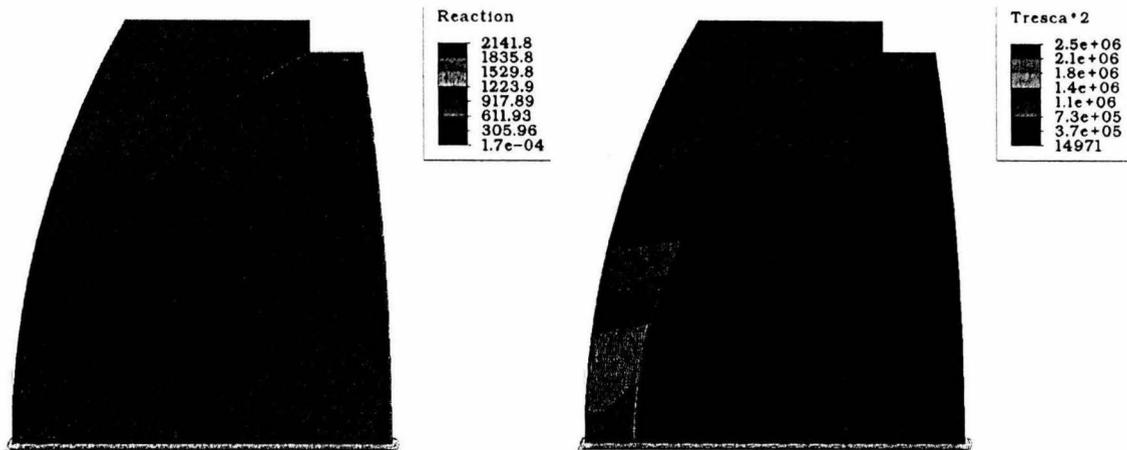


Figura VI.7 Reacciones y esfuerzos axiales debidas a una precarga aplicada y a la expansión térmica en D3 (esfuerzo de 1.6716 MPa en OA).

VI.3 Unidad de enfoque

a) Resolución del sistema de engranes y roscas

El concepto se describe en el Capítulo de Diseño preliminar. A continuación se muestran los datos técnicos generales del sistema (véase Figura VI.8):

ENGRANES HELICOIDALES

Diámetro del primer engrane = 0.204 m ; Dientes = 165
 Diámetro del Segundo engrane = 0.04277 m ; Dientes = 33
 Relación de reducción = 5

ROSCA

Número de hilos por cm = 5
 Ancho de la rosca = 0.01 m

MOTOR DE PASOS (Anexo 4)

Pasos = 200

RESOLUCIÓN

$$0.01m/5 = 0.002m \rightarrow 0.002m/165 = 1.2121 \times 10^{-5} \rightarrow 1.2121 \times 10^{-5} / (200/33) = 2 \times 10^{-6} m$$

Por lo tanto la resolución es suficiente para satisfacer las especificaciones. Para evitar en lo máximo posible el juego en el sistema los engranes son de tipo helicoidal y la cuerda de las roscas es de tipo cuadrada.

b) Resortes de precarga

El juego del sistema de roscas es eliminado con resortes de precarga (véase Anexo 2). Los tres resortes trabajan simétricamente con respecto al eje del sistema óptico. El valor de la precarga es 3 veces mayor que el peso de los componentes que se mueven; el valor máximo se muestra en la Tabla 6.3. Los momentos inducidos por la fuerza de gravedad son despreciados debido al uso de rodamientos axiales de agujas de la compañía sueca SKF (modelo SKF-AXK 160200).

c) Motor de pasos

Para seleccionar el motor de pasos se calculó el torque necesario para mover todos los componentes. El peso estimado de todos los componentes a mover y la fuerza inducida por los resortes de precarga se muestran en la Tabla 6.3.

Table 6.3 Peso de la Unidad de Enfoque precarga de los resortes

Componentes	14
Peso (kg)	3.94
Precarga resortes (kg)	23.64
Total (kg)	27.58

La Tabla 6.4 muestra los resultados para los requerimientos del motor de pasos. Los cálculos incluyeron el peso de los componentes, la fuerza de los resortes de precarga y la fuerza de fricción en las roscasⁱⁱⁱ.

Table 6.4 Requerimientos del motor de pasos

Steps	200
Torque (N*cm)	41.8
rpm	300

Existen varios motores que cumplen con estos requerimientos, en el Anexo 4 se muestra un ejemplo.

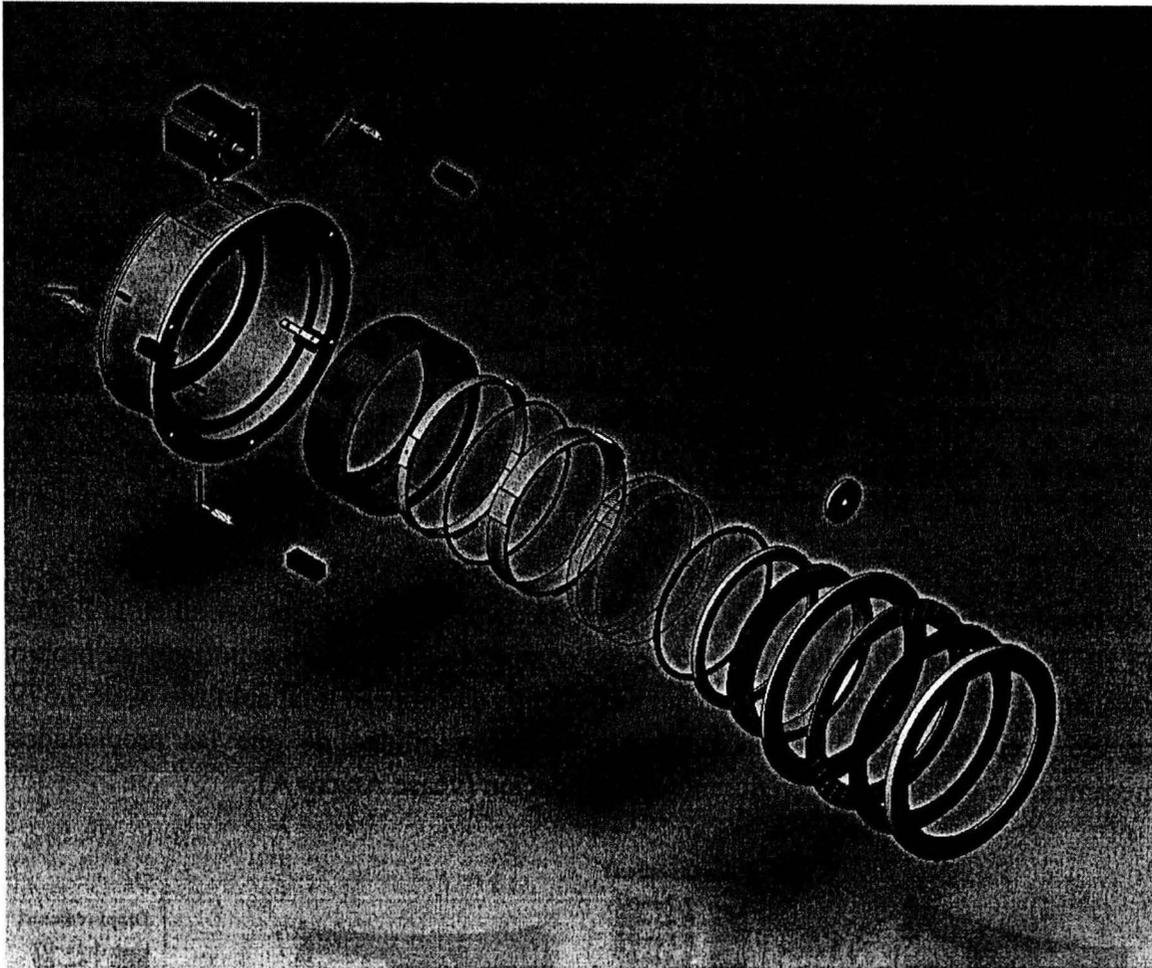


Figura VI.8 Explosión del Barril 1 (D1 y unidad de enfoque).

VI.4 Unidad Pasiva de Desplazamiento

Simulaciones FEA de la UPD

La longitud propuesta para la UPD es de 0.07 m. El material del que está compuesta se muestra en el Anexo A, el cual tiene un CTE aproximado de $180 \mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$. Para garantizar que las especificaciones sean satisfechas, este valor deberá ser corroborado una vez fabricada la unidad, y de ser necesario la dimensión axial puede ser modificada en la etapa de Diseño Crítico. La expansión térmica analítica por cada grado centígrado es de $12.6 \mu\text{m}$, y de $6480 \mu\text{m}$ para un gradiente de 36°C (véase Figura VI.9).

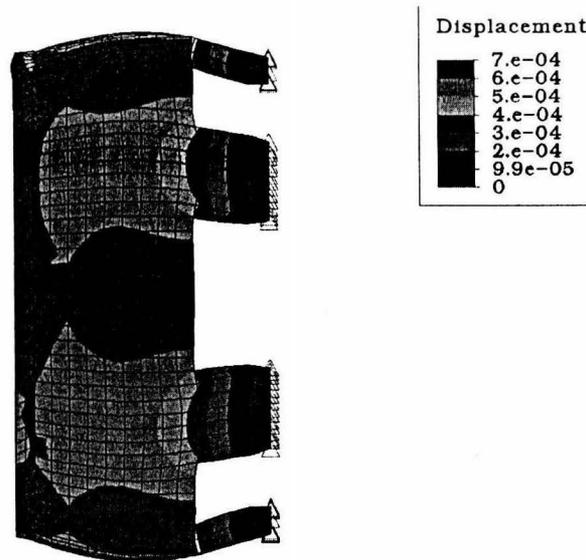


Figure VI.9 Expansión térmica de la UPD.
(gradiente térmico de 36°C)

Los desplazamientos debidos a la carga gravitatoria de la UPD se muestran en la Figura VI.10. La simulación incluye el peso de los componentes que va a soportar y su propio peso suponiendo un factor de seguridad de 5, por lo que el peso total aplicado es de 9.579 kg. Se decidió aplicar este factor debido a la posibilidad de que las propiedades mecánicas de la unidad varíen durante su fabricación (véase Anexo A).

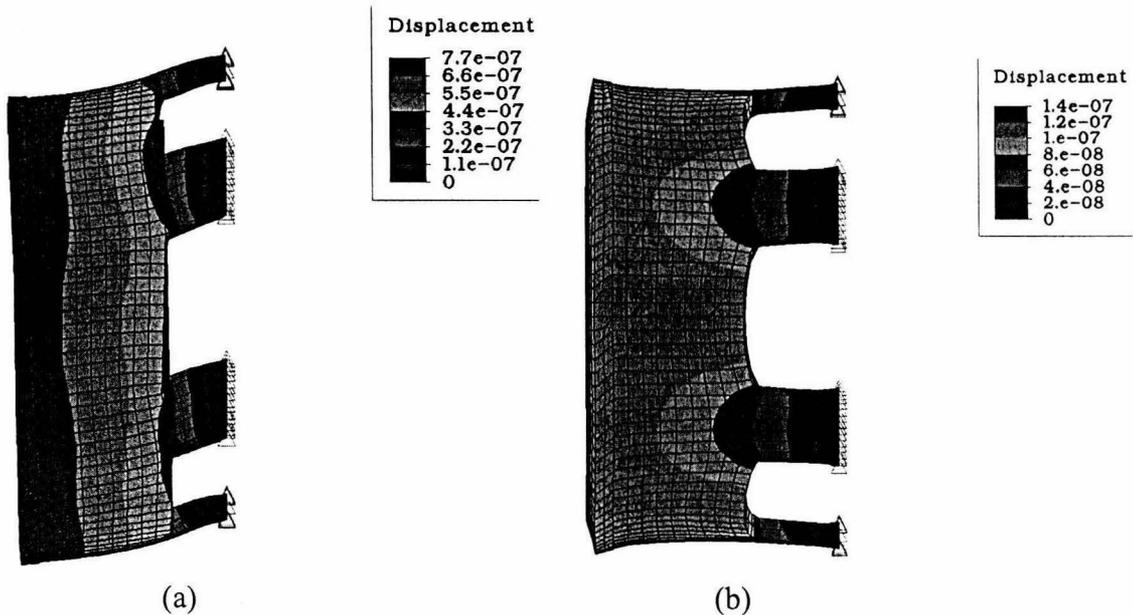


Figure VI.9 Desplazamientos de la UPD debidos a la carga gravitatoria;
a) vector gravedad perpendicular al eje óptico;
b) vector gravedad en la dirección axial contraria a los soportes

VI.5 Barril: acción gravitatoria sobre el barril ensamblado

El desplazamiento total de cada lente debido a su propio peso se compone del desplazamiento del lente en su arillo y a los propios de la flexión de la cámara. En la Figura VI.11 se muestran los valores de los desplazamientos debidos a la flexión de la cámara. Las condiciones de frontera se supusieron según la interface de soporte de la cámara y el barril. El peso total utilizado para la simulación fue de 67 kg, considerando un factor de seguridad aproximado a 3 (véase V.IV). Estos valores de desplazamiento son incluidos en el presupuesto de error.

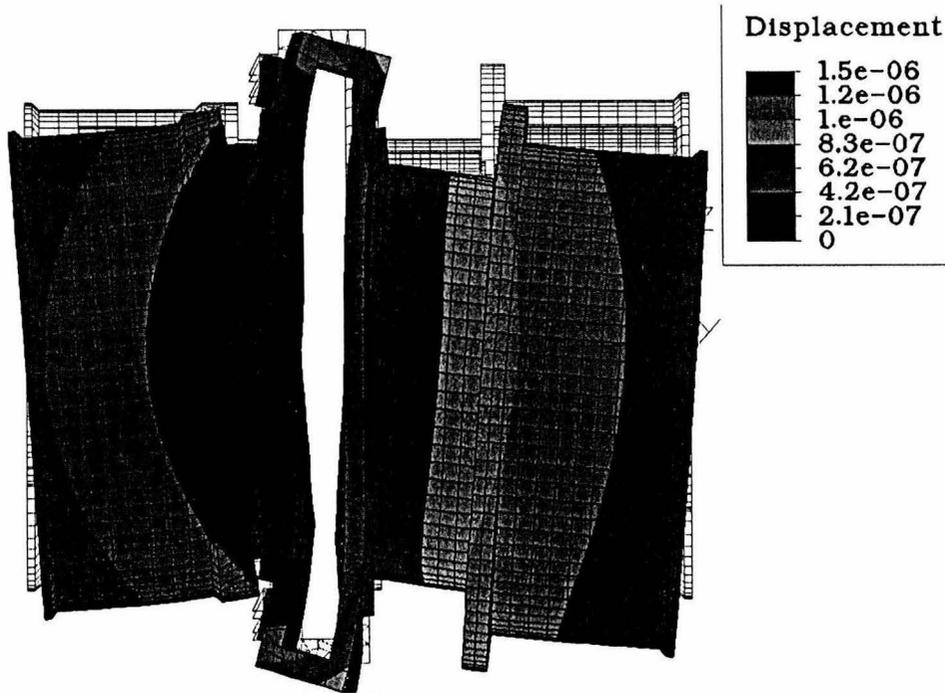


Figura VI.11 Simulación de la flexión del barril.

VI.6 Presupuestos de error

El objetivo de los presupuestos de error es el de cuantificar el error acumulado por todos los componentes del sistemas. Estos valores de error deben satisfacer las especificaciones (véanse Tablas 4.2 y 4.3 y el Apéndice B).

a) Posición nominal de los lentes

La posición nominal de los lentes se logra a través de topes mecánicos y superficies de referencia. Las tolerancias del proceso de maquinado de cada componente son del orden de $10\ \mu\text{m}$. El caso más drástico es D1L1, el cual tiene un error máximo de $90\ \mu\text{m}$ de error en la posición del vértice. Esto es debido a que tiene 6 superficies de referencia (tornillos de sujeción) y 3 topes mecánicos que definen su posición axial (véase Figura VI.12). Este cálculo implica que la tolerancia de maquinado es siempre en la misma dirección con su valor máximo de $10\ \mu\text{m}$.

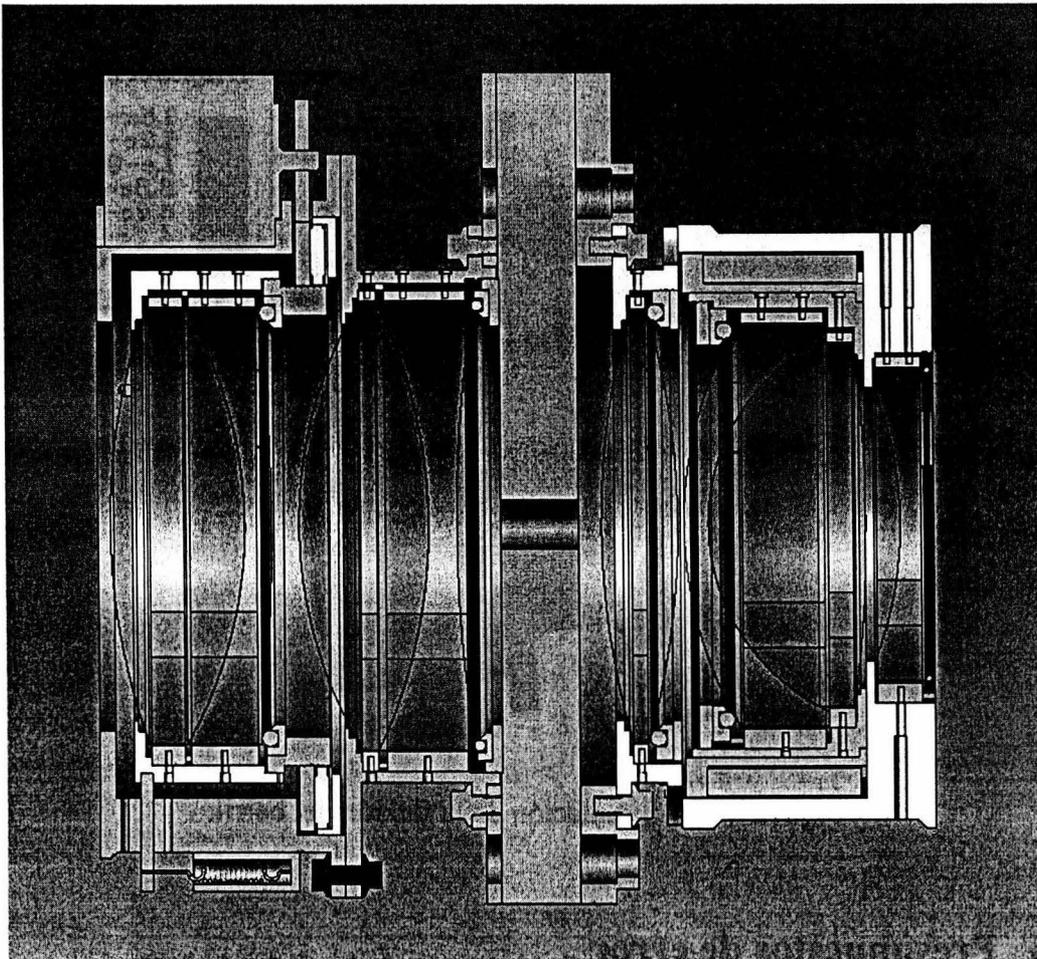


Figura VI.12 Vista lateral en corte del Barril de la Cámara.

b) Tolerancias de posición de los lentes

Descentrado

Los siguientes valores son estimados para D2L1, el cual es el caso más crítico (véase Tabla 6.5).

1) Rugosidad del canto de las lentes

Valor: 20 μm

Fuente: ópticos

2) Soportes Radiales

Valor: 10 μm

Especificaciones del centro de maquinado CNC (CIDESI)

3) Desalineamiento Soporte Radial/Barril

Valor: 10 μm

Especificaciones del centro de maquinado CNC (CIDESI)

4) Barril

Valor: 10 μm

Especificaciones del centro de maquinado CNC (CIDESI)

5) Desalineamiento radial de la celda

Valor: 10 μm

Especificaciones del centro de maquinado CNC (CIDESI)

6) Desplazamientos debidos a la carga gravitatoria

Valor: (5.36 from RS + 1.5 from barrel) $\mu\text{m} = 6.86 \mu\text{m}$

FEA simulations for D2L1 and for the barrel

7) Otros: un estimado del 5% del total anterior (3.34 μm)

Tabla 6.5 Presupuesto de error para el descentrado

a) Rugosidad del canto de las lentes	20
b) Soportes Radiales	10
c) Desalineamiento Soporte Radial/Barril	10
d) Barril	10
e) Desalineamiento radial de la celda	10
f) Desplazamientos (carga gravitatoria)	6.86
g) Otros	3.34
Total	70.20

c) Esfuerzos en los lentes

Dirección radial:

- | | |
|--|------------------|
| a) D2L2 esfuerzo térmico inducido por su soporte radial en la apertura óptica:
(véase Figura VI.1b) | 2.9 MPa |
| b) D2L1 esfuerzo debido a la gravedad:
(véase Figura VI.4b) | 0.055 MPa |
| | Total: 2.955 MPa |

Dirección axial:

- | | |
|---|-----------|
| c) D3 esfuerzo debido a la precarga:
(incluye la expansión térmica; Figura VI.7) | 1.671 MPa |
|---|-----------|

$$\text{Esfuerzo total} : = \sqrt{2.95567^2 + 1.6716^2} \text{ MPa} = 3.395 \text{ MPa}$$

Aunque el valor del esfuerzo total se encuentra cerca del valor especificado, los presupuestos de error se encuentran por debajo de los valores establecidos por las especificaciones. Es importante notar que todos estos valores son para el caso de estudio más crítico del componente más crítico, y considerando las condiciones de frontera límite. Por este motivo se puede garantizar que todos los componentes tienen valores menores al presentado en esta sección.

Referencias

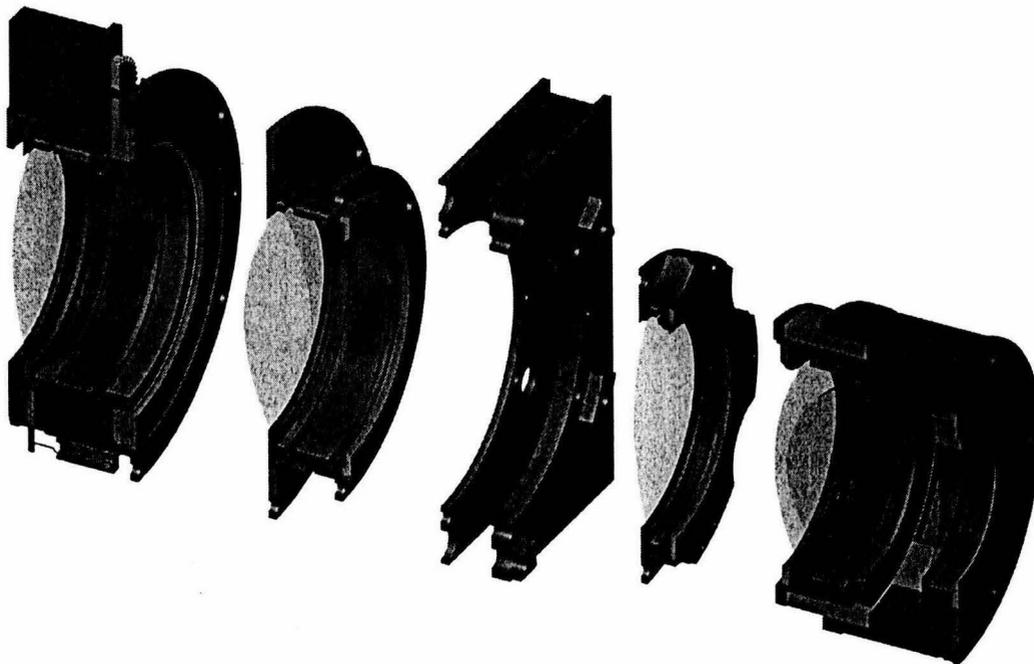
- i Fuentes, Javier, *Camera Unit Specifications*, Instituto de Astrofísica de Canarias, España.
- ii Yoder, Paul, *Mounting Optics in Optical Instruments*, SPIE, EUA 2000.
- iii Farah, Alejandro, *Camera Barrel Mechanical Calculations*, Instituto de Astronomía (UNAM), México 2003
- iv Collins, *Mechanical Design of Machine Elements and Machines*, John Wiley & Son, 2000
- v Farah, Alejandro, *Camera Barrel Preliminary Design*, Instituto de Astronomía (UNAM), México 2003
- vi J. Jesús González, C. Tejada, A. Farah, J. L. Rasilla, F. J. Fuentes, “*Thermal Effects & thermal compensation in the OSIRIS camera*”, SPIE Proceedings, Astronomical Telescopes and instrumentation, 2002.artículo descripción del compensador térmico.
- vii Chevalier, A., *Dibujo Industrial*, Editorial limusa, México 1997

- viii A. Farah, J. Godoy, F. Velázquez, C. Espejo, S. Cuevas, UNAM; V. Bringas, A. Manzo, L. del Llano, J. L. Sánchez, A. Chavoya, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (México); N. Devaney, J. Castro, L. Cavaller, GRANTECAN (Spain), "*Finite Element Analysis of the GTC Commissioning Instrument Structure*", SPIE Proceedings, Astronomical Telescopes and instrumentation, 2002.
- ix A. Farah, "*Structure analysis of the primary mirror support for the New Technology Optical Infrared Telescope (TIM) using computer-aided finite element method*", SPIE Proceedings, marzo 2000
- x Dieter, George E., *ENGINEERING DESIGN A Materials and Processing Approach*, U. De Chicago, 1991.
- xi Rothbart, *Mechanical Design and Systems*, Handbook, 2ª edición, University of Cambridge, E.U.A., 1985.
- xii Popov Egor, P., *Introducción a la Mecánica de Sólidos*, primera edición, editorial Limusa, México, 1976.
- xiii Shigley and Mischke, *Mechanical Engineering Design*, quinta edición, McGraw-Hill, E.U.A., 1989.
- xiv Hayrettin Kardestuncer (editor jefe), *Finite Element Handbook*, McGraw-Hill, México 1987.
- xv Segerlind Larry, *Applied Finite Element Analysis*, 2ª edición, editorial John Wiley & Sons, E.U.A., 1984
- xx Pilkey Walter, D., *Mechanics of structures: Variational and Computational Methods*, CRC Press, Inc., Florida, E.U.A., 1994.
- xxi Leigh Ronald, W., *Solid Modeling with AutoCAD*, 2ª edición, editorial Ventana Press, E.U.A., 1992.
- xxii Logan, D., *A First Course in the Finite Element Method using Algor*, editorial Publishing Company, E.U.A., 1997.
- xxiii *Optical Engineering*, SPIE Decemer 2002 Vol.41 No.12.
- xxiv *Optomechanical Design and Engineering 2001*, San Diego 2001, SPIE Vol. 4444

VII. CONCLUSIONES

El diseño preliminar del barril para la óptica de la cámara del instrumento científico *OSIRIS* cumple con las especificaciones y requerimientos establecidos. El diseño conceptual aplicado durante el desarrollo de este proyecto demostró su eficiencia al permitirnos alcanzar estos valores. Las tolerancias dimensionales, la posición y los esfuerzos inducidos de cada uno de los componentes ópticos de la cámara fueron las principales líneas que dirigieron el diseño del mismo. Las cuales fueron cuantificadas utilizando el Método de los Elementos Finitos así como cálculos analíticos. El criterio de falla por esfuerzo de birrefringencia fue el caso más crítico de estudio. La selección de materiales cuyas propiedades mecánicas fueran adecuadas y la geometría de cada componente mecánico son vitales para el buen desempeño del barril.

La colaboración, así como el proceso de revisiones a las que este diseño fue sujeto, nos situaron en los más altos estándares de normatividad internacional. El barril para la cámara está actualmente en etapa de fabricación y deberá estar funcionando en el telescopio español *GTC* a mediados del 2005. Gracias a este proyecto, los astrónomos mexicanos tendrán acceso a uno de los más grandes instrumentos astronómicos, y podrán realizar investigación de vanguardia.



APÉNDICE A

A continuación se muestran las dimensiones y datos técnicos de las especificaciones de los lentes para la cámara tal cual fueron presentadas por el grupo científico OSIRIS.

OSIRIS CAMERA D1L1 LENS AT 20°C

Material S-FPL53
Diameter 145.02 + 0.0/-0.15 mm
Central Thickness 44.01 +/- 0.102 mm
Maximum Wedge 0.048015 Deg

Edge

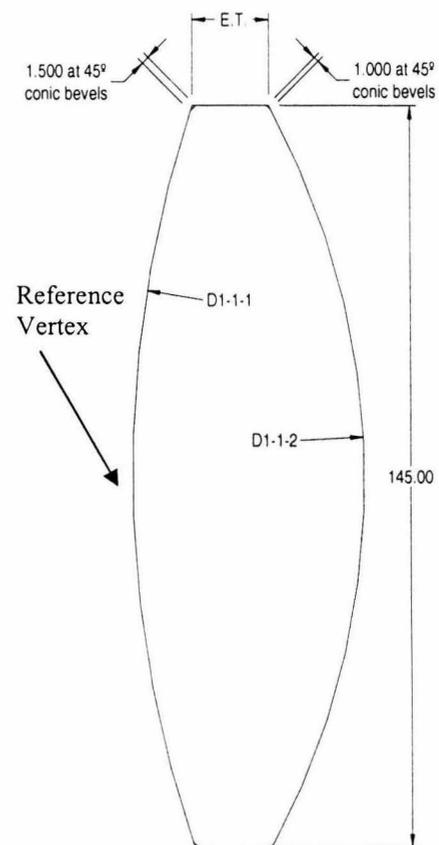
Burnished with 220 or finer rounding stone
Edge Thickness Fixed by curvatures
Ink blackened

D1-1-1 SURFACE

Polished Clr. Ap. Full Aperture
Convex Radius 218.23 +/- 0.347 mm

D1-1-2 SURFACE

Polished Clr. Ap. Full Aperture
Convex Radius 146.16 +/- 0.2mm



D1L1 data sheet

Especificaciones dimensionales de los lentes

OSIRIS CAMERA D1L2 LENS AT

20°C Material S-BSM51Y
Diameter 145.02 + 0.0/-0.15 mm
Central Thickness 8.80 +/- 0.102 mm
Maximum Wedge 0.038729 Deg

Edge

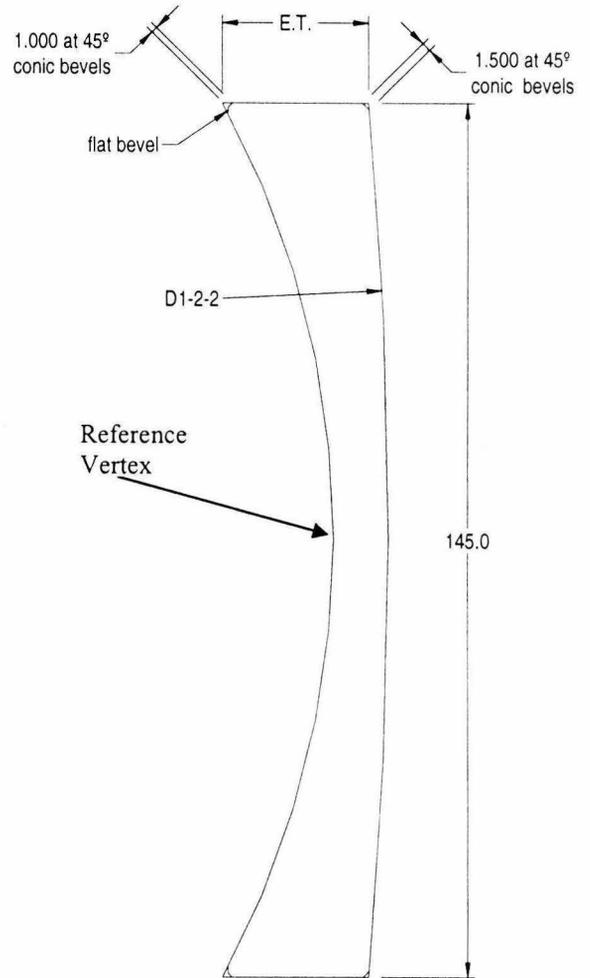
Burnished with 220 or finer rounding stone
Edge Thickness Fixed by curvatures
Ink blackened

D1-2-1 SURFACE

Polished Clr. Ap. Full Aperture
Concave Radius 146.24 +/- 0.2 mm

D1-2-2 SURFACE

Polished Clr. Ap. Full Aperture
Convex Radius 679.50 +/- 3.38 mm



OSIRIS CAMERA D2L1 LENS AT 20°C

Material CAF2
Diameter 149.0 + 0.0/-0.15 mm
Central Thickness 42.51 +/- 0.1 mm
Maximum Wedge 0.050068 Deg

Edge

POLISHED

Edge Thickness Fixed by curvatures

Ink blackened

D2-1-1 SURFACE

Polished Clr. Ap. To bevels

Convex Radius 146.23 +/- 0.2 mm

Conic Bevel

POLISHED

Angle to Axis 45.00 +/- 5.00 Deg.

Max. Face width 1.50 mm

Ink blackened

D2-1-2 SURFACE

Polished Clr. Ap. To bevels

Convex Radius 172.96 +/- 0.218 mm

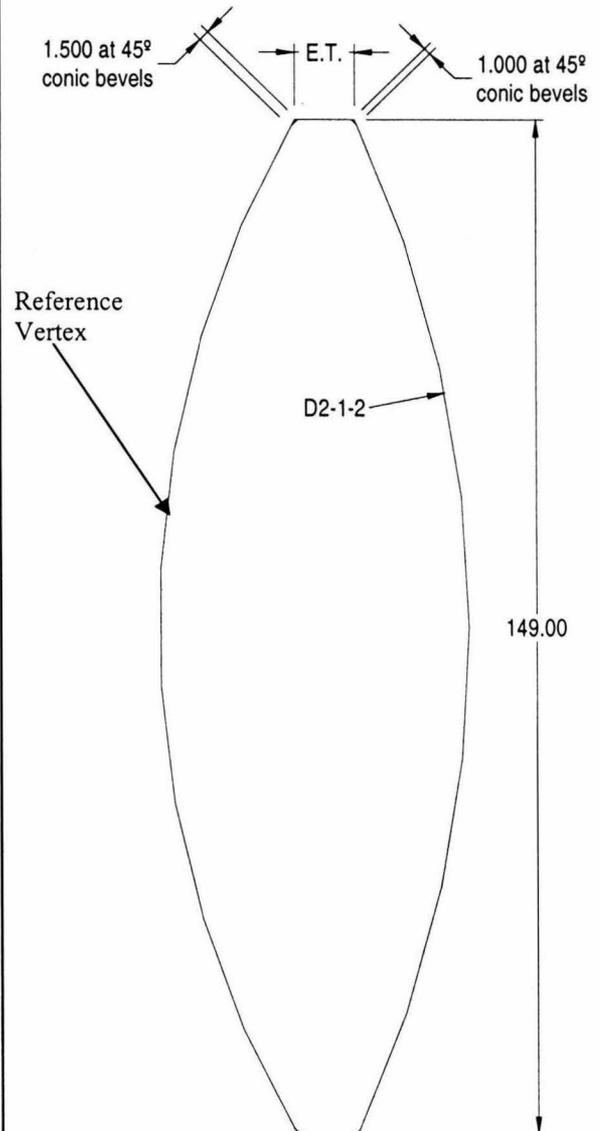
Conic Bevel

POLISHED

Angle to Axis 45.00 +/- 5.00 Deg.

Max. Face width 1.00 mm

Ink blackened



Especificaciones dimensionales de los lentes

OSIRIS CAMERA D2L2 LENS AT 20°C

Material S-BAL35Y
Diameter 149.0 +0.0/-0.15 mm
Central Thickness 9.10 +/- 0.1 mm
Maximum Wedge 0.040818 Deg

Edge
Burnished with 220 or finer rounding stone
Edge Thickness Fixed by curvatures/bevels
Ink blackened

D2-1-1 SURFACE

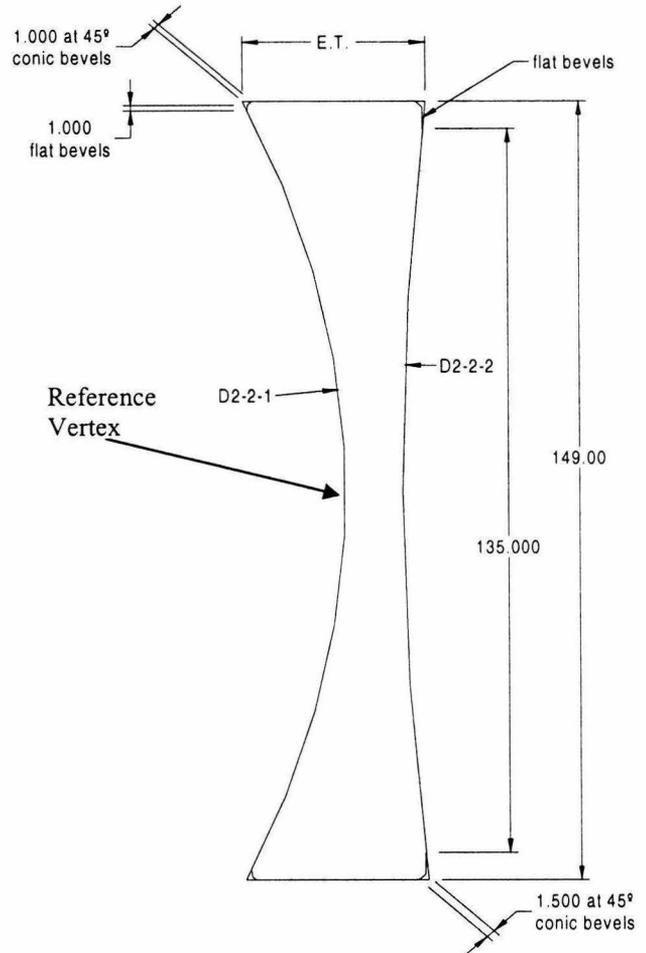
Polished Clr. Ap. To bevel
Concave Radius 173.04 +/- 0.218 mm
Flat Bevel
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 90.00 +/-5.00 Deg.
Max. Face width 1.00 mm
Ink blackened

Conic Bevel
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 45.00 +/-5.00 Deg.
Max. Face width 1.00 mm
Ink blackened

D2-1-2 SURFACE

Polished Clr. Ap. 135.00 mm
Concave Radius 503.1 +/- 1.867 mm
Flat Bevel
Inner diameter 135.00 +0.1/-0.5 mm
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 90.00 +/-0.033 Deg.
Ink blackened

Conic Bevel
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 45.00 +/-5.00 Deg.
Max. Face width 1.50 mm
Ink blackened



OSIRIS CAMERA S1 LENS AT 20°C

Material S-FPL51Y
Diameter 144.0 +0.0/-0.15 mm
Central Thickness 25.00 +/- 0.1 mm
Maximum Wedge 0.045953 Deg

Edge

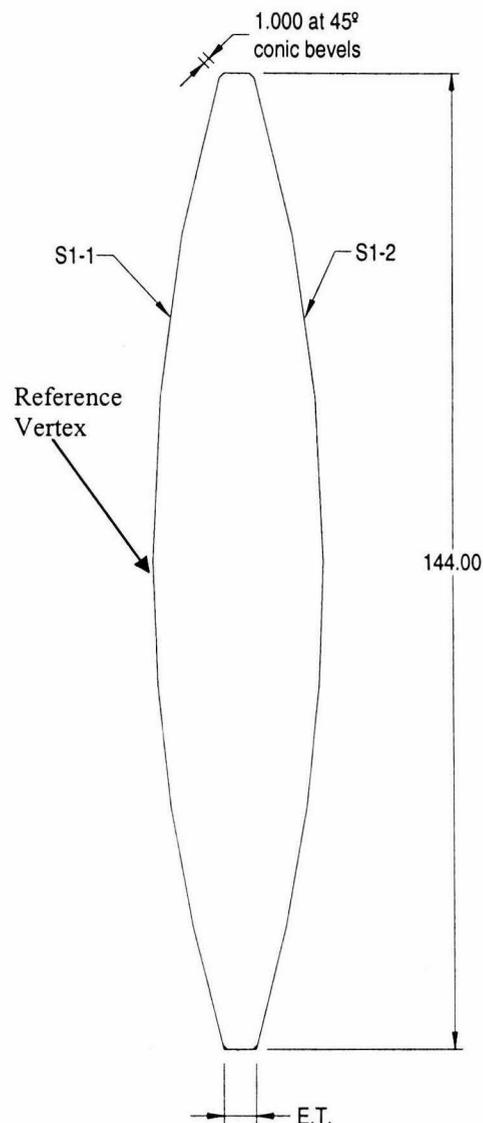
Burnished with 220 or finer rounding stone
Edge Thickness Fixed by curvatures/bevels
Ink blackened

S1-1 SURFACE

Polished Clr. Ap. To bevel
Convex Radius 264.8 +/- 0.509 mm
Conic Bevel
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 45.00 +/-5.00 Deg.
Max. Face width 1.00 mm
Ink blackened

S1-2 SURFACE

Polished Clr. Ap. To bevel
Convex Radius 264.8 +/- 0.509 mm
Conic Bevel
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 45.00 +/-5.00 Deg.
Max. Face width 1.00 mm
Ink blackened



Especificaciones dimensionales de los lentes

OSIRIS CAMERA D3L1 LENS AT 20°C

Material S-BAL15Y
Diameter 134.0 + 0.0/-0.15 mm
Central Thickness 7.90 +/- 0.1 mm
Maximum Wedge 0.036963 Deg

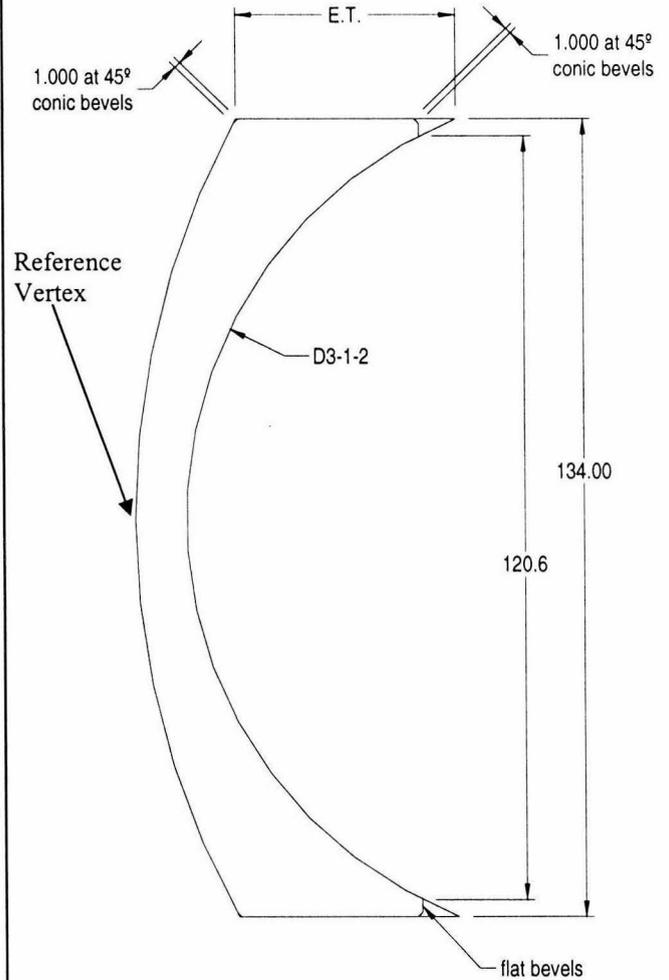
Edge
Burnished with 220 or finer rounding stone
Edge Thickness Fixed by curvatures/bevels
Ink blackened

D3-1-1 SURFACE

Polished Clr. Ap. To bevel
Convex Radius 133.1 +/- 0.202 mm
Conic Bevel
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 45.00 +/- 5.00 Deg.
Max. Face width 1.00 mm
Ink blackened

D3-1-2 SURFACE

Polished Clr. Ap. 120.586 mm
Concave Radius 68.70 +/- 0.203 mm
Flat Bevel
Inner diameter 120.586 +0.1/-0.5 mm
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 90.00 +/- 0.033 Deg.
Ink blackened
Conic Bevel
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 45.00 +/- 5.00 Deg.
Max. Face width 1.00 mm
Ink blackened



OSIRIS CAMERA S2 LENS AT 20°C

Material PBL6Y
Diameter 104.01 + 0.0/-0.15 mm
Center Thickness 8.00 +/- 0.102 mm
Edge
Burnished with 220 or finer rounding stone
Thickness 16.757 +/- 0.1 mm
Ink blackened

S2-1 Surface

Polished Clr. Ap. 92.00 + 0.5/-0.1 mm
Concave Radius 125.21 +/- 0.203 mm

Flat Bevel

Burnished with 302 Emery
Inner Diameter 92.0 + 0.5/-0.1 mm
Angle to Axis 90.0 +/- 0.033 Deg.
Ink blackened

Conic Bevel

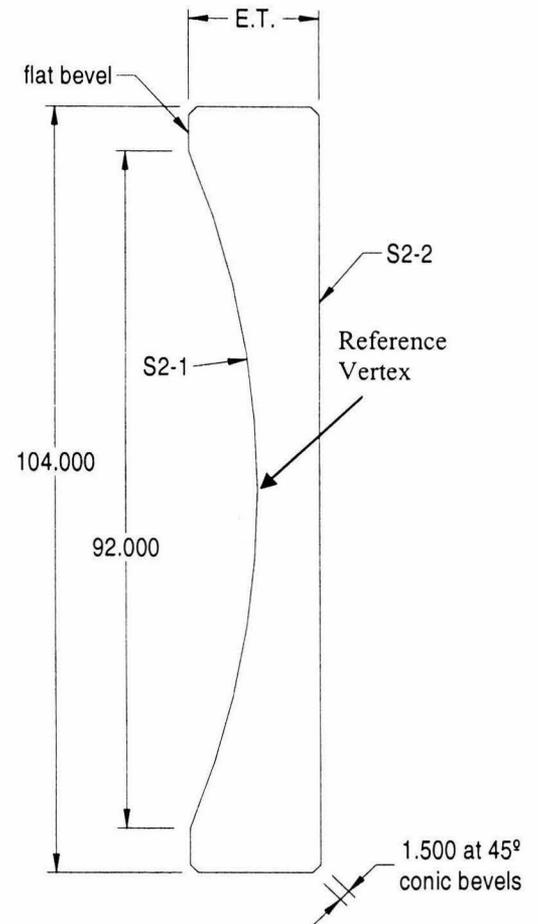
Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 45.0 +/- 2.00 Deg.
Max. Face width 1.50 mm
Ink blackened

S2-2 Surface

Polished Clr. Ap. Full Aperture
Flat Surface Fit. +/- 2.00 Frin.

Conic Bevel

Burnished with 302 Emery
Angle to Axis 45.0 +/- 2.00 Deg.
Max. Face width 1.50 mm
Ink blackened



APÉNDICE B

A continuación se muestra un resumen de las especificaciones y requerimientos del barril para la cámara OSIRIS. Se presentan en el formato original con el cual fueron solicitadas. En especial, las más importantes para esta etapa de diseño conceptual son las contenidas en los incisos del 4.2 al 4.10.

List of acronyms and abbreviations

CB	Camera Barrel
CL	Cryostat Lens
CoG	Centre of Gravity
CU	Camera Unit
CULCS	Camera Unit Local Coordinate System
DU	Detector Unit
GTC	Gran Telescopio Canarias
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
IAC	Instituto de Astrofísica de Canarias
MPMNT	Mean Preventive Maintenance Night Time
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
NA	Not Applicable
OA	Optical Aperture
OPT	OSIRIS Project Team
OSIRIS	Optical System for Imaging and low/intermediate Resolution Integrated Spectroscopy
ORM	Roque de Los Muchachos Observatory (at La Palma)
OSS	OSIRIS Support Structure
PDR	Preliminary Design Review
ROC	Radius of Curvature
RT	Temperature of Reference (8.5 °C)
TBC	To Be Confirmed
TBD	To Be Defined

1.1 Guides to understanding the document

1.1.1 Use of shall/should

“Shall” is used for requirements, whereas “should” is reserved for guidelines. Requirements are mandatory and guidelines are not mandatory, although their fulfilment should be strongly pursued.

1.1.2 Stable and unstable requirements

A “TBC” or a “TBD” identifies Unstable or Undefined requirements respectively.

1.1.3 Guidelines

- The word “guidelines” appears explicitly in the paragraph title.
- Guidelines are always expressed in terms of “should” statements.

1.1.4 Drawings

The drawings shall not be considered as requirements unless it is indicated by some specification in this document. Additionally, in case of conflict the specification document shall prevail over the indications in the drawing

2. DEFINITIONS

2.1 Accuracy

This term refers both to the concepts of overall accuracy and incremental accuracy. If one of them is not explicitly mentioned it shall be assumed to be overall accuracy.

2.2 Axial position (in a lens or doublet)

This term refers to the axial distance between the camera local XY plane and the lens (doublet) reference vertex

2.3 Barrel #1 nominal position

The nominal position of barrel #1 with respect to the CULCS is with D1 on its nominal position

2.4 Camera Barrel nominal position

The nominal position of the Camera Barrel with respect to the interface with the Support Structure shall be as defined in A.2

2.5 Camera back focal

The back focal length is the distance along the Z axis from the second surface of the last lens to the paraxial image plane

2.6 Camera effective focal length

The effective focal length is the distance from the rear focal plane to the paraxial image plane

2.7 Doublet Real Optical Axis

This term refers to the line that joins the centres of curvature of the first optical surface of the first lens and the last optical surface of the last lens (meaning of “first” and “last” is in the optical beam direction, see Figure 2.3)

2.8 Doublet Reference Vertex

This term refers to the reference vertex of the first lens

2.9 Decenter (in a lens or doublet)

This term refers to the radial distance between the camera local Z axis and the lens (doublet) reference vertex

2.10 Field element

Any electronic or electromechanical part intended to allow the change of the state of a subsystem, or to acquire any type of data about its current state, i.e. motors, actuators, proximity sensors or temperature sensors, for example.

2.11 Lens Back Optical Surface

This term refers to the optical surface in the output light side (see the light beam direction in Figure 2.3)

2.12 Lens Front Optical Surface

This term refers to the optical surface in the input light side (see the light beam direction in Figure 2.3)

2.13 Lens Real Optical Axis

This term refers to the line that joins the centres of curvature of the two optical surfaces in a real lens

2.14 Lens Reference Vertex

This term refers to the vertex of the front optical surface. Reference vertex are indicated on each lens drawing included in Annex 1

2.15 Mean Preventive Maintenance Night-Time (MPMNT)

The MPMNT is the night-time per year that the system is not available for operation due to planned (preventive) maintenance tasks.

2.16 Mean Time Between Failures (MTBF)

The MTBF for a system is the mean time between two consecutive failures of the system.

2.17 Mean Time To Repair (MTTR)

The MTTR for a system is the mean time spent in unplanned (corrective) maintenance to repair the system.

2.18 Motion source

Any electromechanical part able to change the current position of any part of a subsystem, i.e. motors and actuators, for example.

2.19 Motion transducer

Any electronic or electromechanical part able to inform about the current state of movement of any part of a subsystem, i.e. tachometer or encoders, for example.

2.20 Optical aperture (OA)

The minimum free diameter in a lens to avoid vigneting

2.21 Overall accuracy

The overall accuracy is a statistical measurement of the differences between the real value and the ideal one for a number of events (measurements or actuations).

2.22 Overall repeatability

The overall repeatability is a statistical measurement of the differences between a number of events (measurements or actuations) when the conditions are the same

2.23 Positioning transducer

Any electronic or electromechanical part intended to inform about the current position of any part of a subsystem, i.e. encoder, proximity sensors

2.24 Radius of Curvature (ROC)

This term refers to the radius of each spherical surface in a lens. There are two different radius of curvature: The radius of the front surface (Front ROC) and the radius of the back surface (Back ROC)

2.25 Repeatability

This term refers to both the concepts of overall repeatability and incremental repeatability. If one of them is not explicitly mentioned it shall be assume to be overall repeatability

2.26 Resolution

Resolution is the smallest detectable increment in a motion or measurement in which a magnitude can vary

2.27 Roll

Roll tolerance is the roll of a surface about the seat of another surface. A typical application is in cemented components as doublets, where one of the elements is cemented off centre relative to the other. Normally the value input is the lateral shift of the vertex of the seat surface

2.28 Shutter nominal position

The nominal position of the shutter shall be as defined in A.3

2.29 System failure

A system failure is any event arising in the OSIRIS which impedes all planned science observations

2.30 Tilt (in a lens or doublet)

This term refers to the angle between the camera local Z axis and the lens (doublet) real optical axis

3. SCOPE

This document specifies the mechanical requirements and optical performances that must be satisfied by the Camera Unit, excluding the mechanical specifications of the Cryostat Window

Electrical and control requirements that must be satisfied by the Camera Unit are specified in A.1

Manufacturing specifications of the camera lenses are included in R.4

Mechanical specifications of the Cryostat Window are included in R.5

Lenses data sheets are included in Annex 1 (this document) as reference

4. REQUIREMENTS

All the requirements in the following section shall have the following code: SP/IN-OS-CA/NNN, where NNN is the index that appears immediately before the requirement title

4.1 General Requirements

4.1.1 Local Coordinate Systems

The Camera Unit Local Coordinate System (CULCS) is named (X_{ca}, Y_{ca}, Z_{ca})

The origin is in the intersection between the plane of the CB axial reference and the axis of the BC radial reference (according A.2)

X_{ca} and Y_{ca} are in the plane of the CB axial reference (according A.2)

Z_{ca} is perpendicular to the CB axial reference (according A.2)

Source: OSIRIS System Group

4.2 Functional requirements

4.2.1 Overall concept

The three singlets and three doublets of the OSIRIS camera shall be mounted within three different opto-mechanical mounts:

- Barrel #1, that encloses the doublet D1
- Barrel #2, that encloses the singlets S1 and S2 and the doublets D2 and D3
- Cryostat Lens, that works as the cryostat vacuum window and encloses the singlet S3

The Barrel #1 is moved axially with respect to the Barrel #2 by the Focus Unit

Source: OSIRIS Optical and Mechanical Group

4.2.2 Barrel #1

To be compliant with the OSIRIS requirements, the Barrel #1 shall have the following functions:

- Support the doublet D1 with the required radial, axial and angular accuracies
- Provide the interface with the Focus Unit

Source: OSIRIS Optical and Mechanical Group

4.2.3 Barrel #2

To be compliant with the OSIRIS requirements, the Barrel #2 shall have the following functions:

- Support the singlets S1, S2 and the doublets D2, D3 with the required radial, axial and angular accuracies
- Provide the support to Barrel #1
- Provide the interface with the OSIRIS Support Structure through the Camera Interface
- Provide free space for the shutter

Source: OSIRIS Optical and Mechanical Group

4.2.4 Focus Unit

To be compliant with the OSIRIS requirements, the Focus Unit shall have the following functions:

- Move axially the Barrel #1 for optical focusing
- Provide the interface between the Barrel #1 and the Barrel #2
- This unit shall be motorized and remote controlled

Source: OSIRIS Optical and Mechanical Group

4.2.5 Barrel #1 and Barrel #2 disassembling

It shall be possible to dismount the Barrel #1 from the Barrel #2 and reassemble them without further alignment

It shall be possible to dismount the focus unit from the Barrel #2 and reassemble them without further alignment

It shall be possible to dismount the lenses from the Barrel #1 and the Barrel #2 and reassemble them without further alignment

It shall be possible to dismount the Camera Barrel from the OSIRIS Support Structure and reassemble them without further alignment

Source: OSIRIS Optical and Mechanical Group

Justification: To dismount and reassemble the camera in a minimum time for maintenance tasks, like cleaning and coating of lenses (MPMNT and MTTR)

4.3 Optical Performance Requirements

4.3.1 Wavefront deformation

4.3.1.1 Centre field wavefront deformation

The effect of the Camera Unit on the transmitted wavefront for the centre field, assuming the doublet D1 and S3 are on their nominal positions, shall be lower than 0.635 waves RMS (at $\lambda=632.8$ nm) in the nominal temperature range

Justification: The camera will be tested using an interferometer. In this way this requirement has been wrote assuming that the wavefront error will be minimized (adjusting the camera position in the interferometer) during the test. The reference wavelength is $\lambda=632.8$ nm (HeNe laser line).

4.3.1.2 Intermediate field wavefront deformation

The effect of the Camera Unit on the transmitted wavefront for a field of 5.71×5.71 degrees, assuming the doublet D1 and S3 are on their nominal positions, shall be lower than 0.826 waves RMS (at $\lambda=632.8$ nm) in the nominal temperature range

Justification: The camera will be tested using an interferometer. In this way this requirement has been wrote assuming that the wavefront error will be minimized (adjusting the camera position in the interferometer) during the test. The reference wavelength is $\lambda=632.8$ nm (HeNe laser line). The intermediate field simulates a corner of the 5×5 arcmin OSIRIS FOV.

4.3.1.3 Unvignetted field wavefront deformation

The effect of the Camera Unit on the transmitted wavefront for a field of 8.08x8.08 degrees, assuming the doublet D1 and S3 are on their nominal positions, shall be lower than 1.488 waves RMS (at $\lambda=632.8$ nm) in the nominal temperature range

Justification: The camera will be tested using an interferometer. In this way this requirement has been wrote assuming that the wavefront error will be minimized (adjusting the camera position in the interferometer) during the test. The reference wavelength is $\lambda=632.8$ nm (HeNe laser line). The unvignetted field simulates a corner of the 7x7 arcmin OSIRIS FOV.

4.3.2 Effective focal length

The Camera Unit effective focal length (at $\lambda=632.8$ nm) shall be 181.235 ± 0.576 mm, assuming the doublet D1 and S3 are on their nominal positions

Source: OSIRIS Optical Group

4.3.3 Back focal

The Camera Unit back focal (at $\lambda=632.8$ nm) shall be 9.267 ± 0.36 mm, assuming the doublet D1 and S3 are on their nominal positions

Source: OSIRIS Optical Group

4.3.4 Camera Optics throughput

The minimum optical throughput for the Camera Unit shall be:

> 65 % at 365.0 nm

> 75 % at 656.3 nm

> 75 % at 852.1 nm

> 75 % at 953.2 nm

Source: OSIRIS Optical Group

4.4 Mechanical Performance Requirements

4.4.1 Radial displacements

The relative radial displacements between each lens on the Camera Barrel and the Barrel Interface, due to gravitational loads, shall be within the following tolerances:

X_{ca} displacements $< 2 \mu\text{m}$

Y_{ca} displacements $< 2 \mu\text{m}$

Source: Error Budget of image movement in spectroscopic mode

Justification: Camera barrel has been assumed fully rigid in the present FEA model. The specified values are the radial displacements of individual lenses inside the barrel that contribute to the image movement with the value assigned in the error budget of image movement. It is assumed that all the lenses have the same displacements, and the contributions of individual lenses to the image movement are rms added

4.4.2 Athermalization

The camera shall be passively athermalized to maintain the contribution of plate scale variations inside the value allowed in the image movement error budget.

Athermalization is obtained mounting a large CTE spacer between D3 and S2 to increase this distance at a rate of $13\pm 1 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$

Especificaciones del Barril para la Cámara

Plate scale and focus are insensitive to barrel materials having $CTE \leq 25 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

The lenses shall not move radially nor tilt due to thermal effects. The errors introduced on radial positions by temperature changes shall be considered as an additional source of error on the positional tolerances, which shall be limited as per 5.6

Parent requirement: RQ/IN-OS/5.1.8.15

Source: Error Budget of image movement in spectroscopic mode

Justification: The variation of the distance between lenses has no effect on image quality (it is perfectly compensated using the focus mechanism), but has an important impact on image movement due to plate scale variations

4.4.3 Lens stresses

Compressive or tensile stress in lenses and couplant interfaces (in doublets) shall not exceed 3.4 Mpa to avoid birefringence

Source: OSIRIS Mechanical Group

Justification: "Mounting lenses in Optical Instruments", P.R. Yoder, SPIE ed. p. 75 (1995)

4.4.4 Assembly repeatability

The errors introduced on lenses position by Camera disassembling and reassembling shall be considered as an additional source of error on the positional tolerances, which shall be limited as per 5.6

Source: OSIRIS Mechanical Group

4.4.5 Focus Unit linear travel

The linear travel along the Z_{ca} axis shall be ± 5 mm from the Barrel #1 nominal position

Parent requirement: RQ/IN-OS/5.1.7.6 and 5.1.7.7

Source: Error Budget of image quality

Justification: This is a factor 2 over the largest focus movement needed to compensate the image quality in all the performed MonteCarlo runs

4.4.6 Focusing time

The maximum time to move the focus between end positions shall be less than 5 sec

4.4.7 Focus Unit translation repeatability

The repeatability (along the Z_{ca} axis) of Barrel #1 shall be better than $\pm 20 \mu\text{m}$

Parent requirement: RQ/IN-OS/5.1.7.6 and 5.1.7.7

Source: Error Budget of image quality

Justification: This is the axial positional tolerance of D1, obtained from the error budget nominal tolerances

4.4.8 Focus Unit translation resolution

The resolution along the Z_{ca} axis shall be better than $\pm 4 \mu\text{m}$

Source: OSIRIS Mechanical Group

Justification: This value is a factor 5 below the mechanism repeatability

4.5 Physical Requirements

4.5.1 Lenses nominal geometry

The nominal geometry of the camera lenses shall be as defined in Annex #1 (L1 and L2 refers to the first and second lens in a doublet). The positions of each lens reference vertex are included in the drawings

Source: OSIRIS Optical Group

4.5.2 Lenses optical aperture

The optical aperture of camera lenses are:

	OA
D1 (L1)	130 mm
D1 (L2)	130 mm
D2 (L1)	134 mm
D2 (L2)	134 mm
S1	130 mm
D3 (L1)	119 mm
D3 (L2)	109 mm
S2	91 mm
S3	87 mm

L1 and L2 have the same meaning than in 5.5.1

Source: OSIRIS Optical Group

4.5.3 Lenses nominal position

The coordinates of the reference vertex of each nominal lens are:

	X_{ca}	Y_{ca}	Z_{ca}
D1 (L1)	0.0	0.0	172.64 mm
D1 (L2)	0.0	0.0	128.56 mm
D2 (L1)	0.0	0.0	110.86 mm
D2 (L2)	0.0	0.0	68.28 mm
S1	0.0	0.0	11.78 mm
D3 (L1)	0.0	0.0	-15.22 mm
D3 (L2)	0.0	0.0	-23.2 mm
S2	0.0	0.0	-85.90 mm
S3	0.0	0.0	-108.40 mm

Source: OSIRIS Optical Group

4.5.4 Baffle specification

The baffle geometry inside the barrel is TBD. It shall be defined in the Kick-Off

Source: OSIRIS Optical Group

4.5.5 Ventilation holes

A ventilation path shall exist between the different air gaps in the barrel with a single exit to the exterior. This exit shall be provided with a dust filter and desiccant

Source: OSIRIS Mechanical Group

4.5.6 Shutter physical envelope

The free space for shutter is as defined in A.2

Source: OSIRIS Mechanical Group

4.5.7 Camera Barrel physical envelope

The geometrical envelope of the Camera Barrel (IN-OS-CA-110) shall be as defined in A.2

Source: OSIRIS Mechanical Group

4.5.8 Camera Barrel Mass

The maximum mass of the Camera Barrel shall be lower than 47 Kg

Source: Mass Budget

4.5.9 Camera Barrel Centre of Gravity

The position of the CoG of the Camera Barrel, with Barrel #1 on its nominal configuration, shall be within the range:

- $X_{ca} = 0 \pm 25$ mm (TBC)
- $Y_{ca} = 0 \pm 25$ mm (TBC)
- $Z_{ca} =$ TBD

4.6 Integration Requirements

4.6.1 Positional tolerances of lenses with respect to the Camera Barrel interface

The doublets D1, D2 and D3 and the singlets S1, S2 and S3 shall be centered with respect to the CULCS within the following tolerances:

	Tilt	Decenter	Axial
D1	± 0.6 mrad	± 150 μ m	N/A
D2	± 0.4 mrad	± 100 μ m	± 100 μ m
S1	± 0.4 mrad	± 50 μ m	± 100 μ m
D3	± 0.4 mrad	± 100 μ m	± 60 μ m
S2	± 0.4 mrad	± 56 μ m	± 100 μ m
S3	± 0.9 mrad	± 208 μ m	± 223 μ m

Source: Error Budget of image quality

Justification: Those values are the error budget nominal tolerances. Values are defined at 8.5 C according 5.10.1. Tilt and decenter tolerances shall not vary with the temperature, according 5.4.2

4.6.2 Positional tolerance of the Camera Barrel with respect to the interface

The tolerances of the interface zones shall be as defined in A.3

Source: Error Budget of image quality

Justification: The alignment tolerances obtained from the error budget have been allocated to the manufacturing tolerances in the interface zones in the Support Structure and the Camera Barrel

4.6.3 Doublet Roll

The maximum roll in the doublets shall be 57 μm

Justification: Error Budget of image quality

4.7 Material Requirements

4.7.1 Material of lenses

The lenses in the camera shall be made in the following optical glasses:

	Material	Mass (g)	CTE ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) at RT
D1 (L1)	Ohara S-FPL53	1730	14.2×10^{-6}
D1 (L2)	Ohara BSM51Y	906	6.3×10^{-6}
D2 (L1)	CaF_2	1363	18.9×10^{-6}
D2 (L2)	Ohara S-BAL35Y	1129	5.7×10^{-6}
S1	Ohara S-FPL51Y	911	13.6×10^{-6}
D3 (L1)	Ohara S-BAL15Y	618	7.6×10^{-6}
D3 (L2)	CaF_2	1287	18.9×10^{-6}
S2	Ohara PBL6Y	496	8.3×10^{-6}
S3	Fused Silica	304	0.55×10^{-6}

Source: OSIRIS Optical Group

4.7.2 Doublets couplant

The doublet couplant shall be selected by the Contractor and approved by the OPT

Justification: Corning Q2-3067 was the optical couplant proposed by the optical design. The transmission of this couplant in the UV spectral range can be lower of the efficiency requirement. This parameter must be tested.

4.7.3 Doublets couplant central thickness

The doublet couplant central thickness shall be (TBD) mm

Justification: The OSIRIS optical design proposes a thickness of 0.08 ± 0.01 mm for Corning Q2-3067 couplant.

4.7.4 Doublets couplant bubbles

The total bubbles cross-section shall be less than 0.0256 mm^2

Source: OSIRIS Optical Group

4.7.5 Doublets Couplant Efficiency

The efficiency of the couplant shall be better than 99 % from 365 to 953 nm

Source: OSIRIS Optical Group

4.7.6 Material of Cells and Barrels

The material of the Cells and Barrels shall be selected by the Contractor and approved by the OPT

4.7.7 Cell thermal expansion guideline

The CTE of the Cells should be as near as possible to that of lenses

Source: OSIRIS Mechanical Group

4.7.8 Material condition

Materials whose characteristics have a direct impact on the performance, reliability or safety of the equipment will be procured according to either standards or manufacturer specifications and certificates of conformance will be requested from the supplier.

Structural materials shall be NDI (Non Destructive Inspection) inspected before their processing. All materials and parts used shall be subject to a reception inspection, whose extent shall be specified on the corresponding purchase documentation and the final deliverables shall be inspected as part of the factory acceptance.

Source: OSIRIS Mechanical Group

4.8 Thermal Requirements

4.8.1 Camera Optics Thermal Inertia guideline

The Camera Optics should have minimum thermal inertia

4.8.2 Heat dissipation guideline

The design of the Focus Unit should minimise the amount of heat power dissipated

4.8.3 Maximum heat dissipation

The maximum heat dissipated by electrical components is TBD. It shall be proposed by the Contractor and approved by the Project Team

The maximum heat dissipated when the focus unit is not moving shall be zero

4.8.4 Temperature of thermal control enclosures guideline

The temperature of the external surfaces of the enclosures of active heat sources located close to the optical light path or potentially creating convective thermal flow into it should differ negligibly from the ambient temperature.

4.9 Interface Requirements

4.9.1 Interface with the OSIRIS Support Structure

The interface between the Camera Barrel and the OSIRIS Support Structure shall be as defined in A.3 The mechanical interface zones shall be situated in the Camera Barrel Axial and Radial References

4.10 Design Requirements

4.10.1 Temperature of Reference

The temperature of reference for all the dimensions and tolerances shall be 8.5°C, unless otherwise specified

Justification: OSIRIS requirements

4.10.2 Lens Cell

Lenses should be grouped in cells whenever is possible. Cells will be mounted inside a common barrel

4.10.3 Standardisation guideline

The components of the Camera should be standard, commercial and well proven and should be selected in such a way as to facilitate their maintenance.

Justification: OSIRIS requirements

4.11 Manufacturing Requirements

4.11.1 Temperature of Reference

The temperature of reference for all dimensions and tolerances during manufacturing of components shall be 20 C. Dimensions and tolerances shall be converted from design values to manufacturing values during the detailed design phase

Source: OSIRIS Mechanical Group

Justification: According DIN 102

4.12 Coating, painting and surface finish requirements

4.12.1 Surface treatment

All parts of the Camera Barrel which can scatter light into the instrument shall be optically black for wavelengths below 1.1 μm

The specified surface treatment to be used shall be proposed by the Contractor and approved by the OPT

4.13 Reliability Requirements

4.13.1 Lifetime guideline

The Camera should be designed for a minimum lifetime of 15 years under the environment conditions specified in 5.15 This lifetime start at first integration on OSIRIS

Source: OSIRIS System Group

4.13.2 MTBF

The MTBF shall be of at least 50.000 hours

Source: OSIRIS System Group

4.13.3 MTTR

The MTTR shall be shall be less than 2 hours

Source: OSIRIS System Group

4.14 Support Requirements

4.14.1 Maintenance Simplicity guideline

Maintenance tasks should be as simple as possible.

Justification: OSIRIS requirements

4.14.2 MPMNT

The Camera shall have a MPMNT of 0 hours

Source: OSIRIS System Group

4.15 Environmental Requirements

4.15.1 Environmental conditions

The Camera Unit shall be designed to operate and survive the conditions internal to the GTC telescope dome as stated in Table 5.1

	Nominal conditions	Limit of operation	Survival limit
Temperature	-2°C to +19°C	-6°C to +30°C	-15°C to +35°C
Thermal variation (at night) in 15 minutes	0°C to 0.9°C	N/A	N/A
Thermal variation (at night) in 1 hour	0°C to 1.8°C	N/A	N/A
Thermal variation (at night) in 2 hours	0°C to 2.4°C	N/A	N/A
Relative humidity	2% to 87%	90% (or condensation)	0% to 100% with condensation
Atmospheric pressure	770 to 790 mbar	N/A	N/A

Table 5.1 *Environmental conditions*

The Camera Unit requirements shall be fulfilled under the Nominal conditions. The Camera Unit shall be able to operate up to the limit of operation conditions but the specification may not be fulfilled. Under survival conditions the Camera Unit is supposed not to be in operation.

Justification: OSIRIS requirements

4.15.2 Earthquake survival

The Camera Unit mounted in OSIRIS shall be able to support earthquakes with the characteristics defined in regulation NCSE-94 for the ORM without suffering critical damage. A critical damage refers to any damage that can cause a structure collapse or a risk to produce it, or a decrease in the serviceability during the life cycle, that is, a damage that can produce the attainment of the limit states taken into account in the design of the structures.

A critical damage will be additionally any damage that prevents the Camera Unit to work within its specification or that constitutes a system failure, provided that this damage cannot be repaired within three times its MTTR

Justification: OSIRIS requirements

4.15.3 Load Requirements

The Camera Unit specifications shall be fulfilled in the following load cases:

- The gravity vector shall rotate 360° about X_{ca}
- The angle between the gravity vector and X_{ca} shall vary between 90° and 180°

Justification: OSIRIS requirements

4.16 Packaging, Handling, Storage and Transportation Requirements

4.16.1 Transport obligations

The Contractor shall be responsible, in cost and risk, to transport the equipment manufactured from its facilities to the IAC facilities. The package shall be designed to support normal air and sea transport condition. Table 5.2 shows this condition (TBC).

Condition	Value
Altitude	Sea level to 15500 m
Air temp induced by packing	-25°C to + 70°C
Temperature shock	±35°C
Wind speed	0 to 67 m/sec
Relative humidity	0% to 100% with condensation
Cleanliness	Occasional dust, sand and insects
Gravity orientation	All orientations
Vibration (PSD)	0.015 g ² /Hz, 10 to 40 Hz 0.00015 g ² /Hz, 500 Hz
Shock (only for fragile items)	Peak acceleration 15g all axes
Salinity	High level

Table 5.2 Handling and Storage Conditions

The package shall be also designed to be used for preventive maintenance tasks and in case of reparation. So, the package shall be designed to support at least 10 packing and 10 unpacking operation keeping all its performances.

Justification: OSIRIS requirements

4.16.2 Handling and storage requirements

The design of the items and packages shall prevent them from being damaged under the conditions shown in Table 5.3

Condition	Requirement
Altitude	2250 to 2300 m
Ambient air temperature step ¹	11°C
Cleanliness	Occasional dust, sand and insects
Temperature	-15°C to +35°C
Relative humidity	0% to 100% with condensation
Atmospheric pressure	770 to 790 mbar
Gravity orientation	All orientations
Vibration (PSD) (only for fragile items)	0.0008 g ² /Hz, 20 to 1000 Hz in all axes
Shock (only for fragile items)	Peak acceleration 10g all axes

Table 5.3 Handling and Storage Conditions

4.17 Verification Requirements

4.17.1 Temperature of Reference

All the measurement and verification tests shall be performed at 20 C. Dimensions and tolerances shall be converted from design values to values to be verified during the detailed design phase

Thermal cycling shall be made between 20 C and -2 C before each test, to verify the stability of the camera under temperature changes in the nominal range. Specifications shall NOT be tested at other temperatures inside the nominal range, unless otherwise specified in the Verification Matrix

Analysis shall be used, if necessary, to verify the performance at other temperatures from the measured values at 20 C

Source: OSIRIS Mechanical Group

Justification: According DIN 102

¹ Maximum day temperature variation expected at the ORM.

5. VERIFICATION

Verification shall be accomplished by one or more of the following verification methods:

1. **Test (T):** When requirements have to be verified by measuring product performance and functionality. The analysis of data derived from test shall be considered an integral part of the test.
2. **Demonstration (D):** Can be considered as test where qualitative operational performance and requirements are demonstrated.
3. **Analysis (A):** When verification is achieved by performing theoretical or empirical evaluation by accepted techniques, the method shall be referred to as "Analysis". An example is the modelling and computational simulation.
4. **Inspection (I):** When verification is achieved by visual determination of physical characteristics (such as construction features, hardware conformance to document drawings, etc) the method shall be referred to as "Inspection".

The Verification Matrix (**VM**) shows the method proposed to accept each one of the critical requirements.

NV means No Verification is needed

APÉNDICE C

Comparación entre FEA y ecuaciones experimentales:

Esta comparación se hace con el objetivo de verificar que los resultados de las simulaciones y de las fórmulas experimentales existentes sean congruentes.

Se analizó el caso radial del singlete 1 de la cámara de OSIRIS, véase la Figura C1. La Ecuación C1 propuesta por Yoder¹ se usa para estimar de manera aproximada el esfuerzo radial en un singlete debido a un gradiente térmico. El análisis por FEA puede ser engañoso, por eso se va a comprobar que estos resultados sean equiparables a los obtenidos analíticamente.

$$S_G = k_4 k_5 \Delta T \quad C1$$

donde

$$k_4 = \frac{(\alpha_M - \alpha_G)}{\left[\frac{1}{E_G} + \frac{r}{E_M t} \right]} \quad C2$$

$$k_5 = 1 - \left(\frac{2\Delta r}{D_G \Delta T (\alpha_M - \alpha_G)} \right) \quad C3$$

Las propiedades mecánicas y geométricas del singlete 1 y de un arillo que la sostiene son:

Lente

Material: S-FPL51Y
Módulo de Young: 71.6 GPa
Razón de Poisson: 0.302
CTE: $13.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Diámetro (D_G): 0.144 m

Arillo

Material: Aluminio 6061
Módulo de Young: 68.9358 GPa
Razón de Poisson: 0.33
CTE: $23.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Diámetro (D_G): 0.154 m

Comparación entre *FEA* y ecuaciones experimentales

Suponiendo que el ajuste entre el vidrio y el arillo es igual a cero ($r = 0$) y considerando un gradiente térmico de 1°C , tenemos que el esfuerzo al que está sujeto el vidrio es:

$$S_G = 158\,487 \text{ Pa}$$

Para el arillo de aluminio el esfuerzo está dado por:

$$S_M = S_G \frac{R_G}{t} \quad \text{C4}$$

Por lo que el esfuerzo es: $S_M = 2.282 \text{ MPa}$

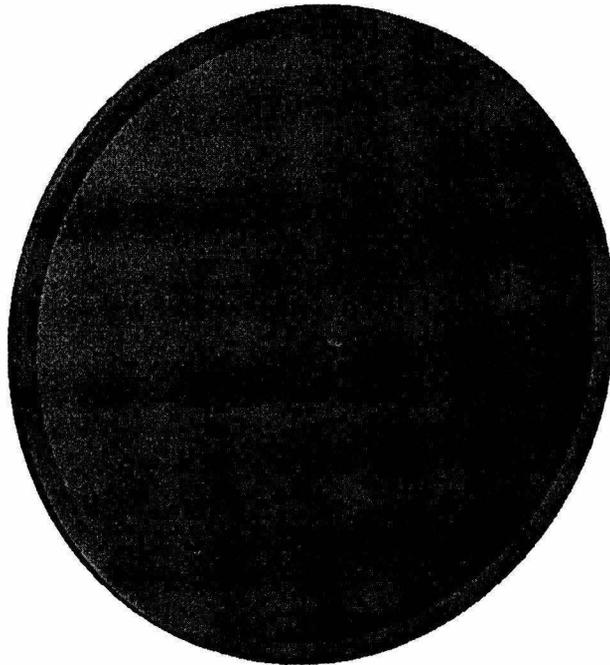


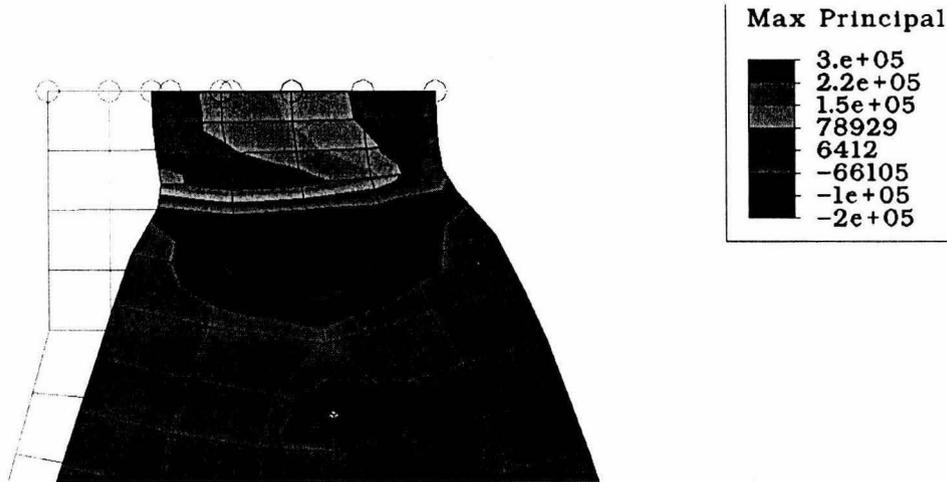
Figura C1 Ensamble del singlete 1 y el arillo.

Los criterios de falla más apropiados son el de Tresca y el de von Mises. El cual considera la posible contribución de cada una de las direcciones principales del tensor de esfuerzos. Sin embargo, para evitar la birrefringencia, las ecuaciones de Yoder solamente están analizando el caso del esfuerzo principal en la dirección radial (tensión-compresión). Esto es debido a las suposiciones involucradas en el modelo matemático propuesto por este autor para dicho cálculo.

Analizamos el modelo por elementos finitos utilizando dos softwares. En ALGOR la malla entre el lente y el arillo es la misma, esto es comparten nodos. En COSMOS existe malla de interfase entre el vidrio y el aluminio. A continuación se muestran los resultados obtenidos con ambos softwares:

Figura C2 Imágenes con el software ALGOR

Esfuerzo en el lente = -123 237 Pa, esfuerzo máximo principal

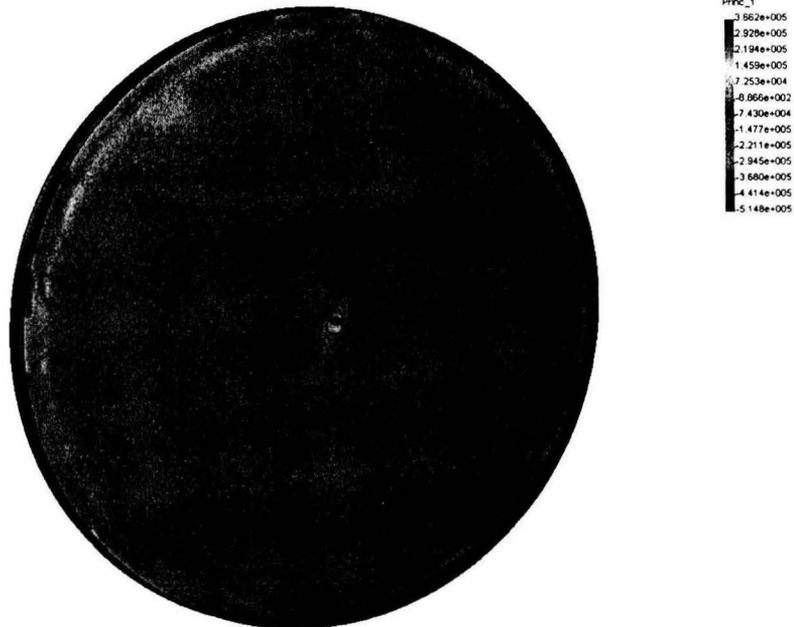


Esfuerzo en la periferia interna del arillo = -2.698 MPa, esfuerzo mínimo principal

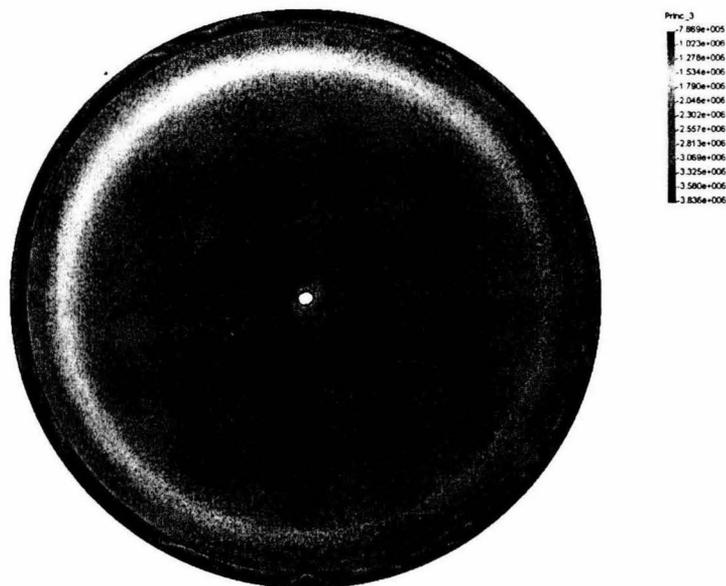


Figura 3C Imágenes con el software COSMOS:

Esfuerzo en el lente de -147 000 a -514 000 Pa, esfuerzo máximo principal



Esfuerzo en la periferia interna del arillo = de -2.8 MPa a -3.8 MPa, esfuerzo mínimo principal



El comportamiento elástico y plástico, los criterios de falla y de fluencia, entre otros, son repetibles y descritos simplemente por un estado de carga, como un espécimen a tensión o a torsión. Bajo cualquier caso de carga, sin embargo, ninguna componente de esfuerzo

o deformación puede ser usada para describir el estado de esfuerzos únicamente. Esto es, los criterios de fluencia, flujo o ruptura deben ser obtenidos por una combinación de todas las componentes de los esfuerzos y deformaciones, sus derivadas y su historia de cargaⁱⁱ.

Los valores de los esfuerzos obtenidos en el *FEA* son similares a los previstos por el modelo matemático. De esto podemos concluir que nuestra simulación puede servir para hacer un estudio comparativo entre diversos modelos y para la toma de decisiones.

Nuevamente, con fines de comprobación, se analiza el caso térmico del modelo en elementos finitos. Para un gradiente térmico de un grado centígrado, si el CTE es $13.6 \text{ e-}6 \text{ } ^\circ\text{C-}1$ y el radio es de 0.072 m , tenemos una expansión térmica radial de $9.792\text{E-}07 \text{ m}$. Del *FEA* para el mismo sistema tenemos $9.792 \text{ E-}7 \text{ m}$, lo cual nos da un error del 0% de error en la aproximación de desplazamientos radiales.

En el caso del desplazamiento lateral, tenemos al centro un espesor de 0.024992 m , por lo que da una expansión de $3.3989\text{E-}07$. El resultado *FEA* es $3.29 \text{ e-}7$, alrededor del 3.2% de error.

Referencias

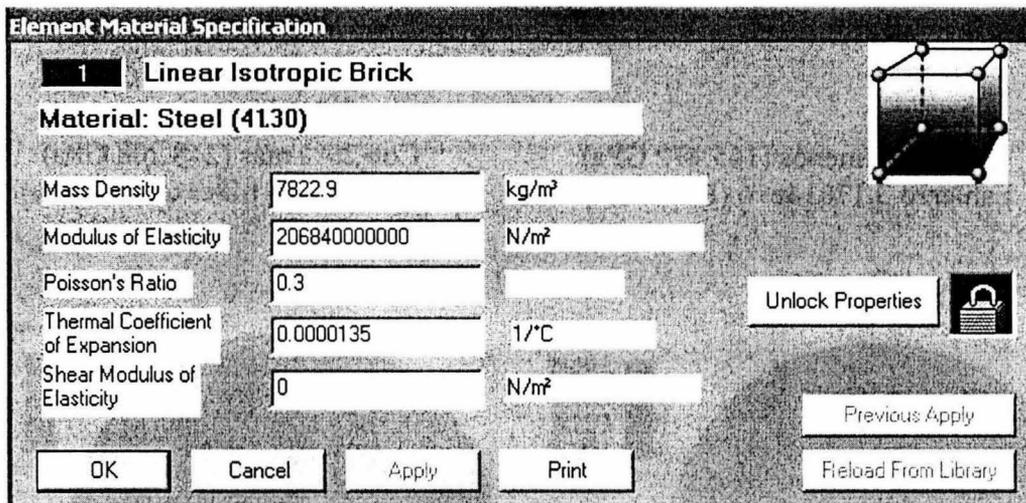
- i Yoder, Paul R., "*Mounting Lenses in Optical Instruments*", SPIE Optical Engineering Press, 1995.
- ii Rothbart, "*Mechanical Design and systems*", Mc Graw Hill, 1985

APÉNDICE D

Posibles errores de las propiedades del material del arillo

Las propiedades mecánicas de cualquier material pueden ser diferentes a los valores nominales que reporte el proveedor. Los esfuerzos en los lentes, si el CTE o el módulo de Young son diferentes al especificado, pueden aumentar y variar con respecto a los obtenidos por *FEA*. A continuación se muestra el análisis de D1L1 con diferentes propiedades mecánicas:

Tabla D1: Propiedades mecánicas del acero 4130



The image shows a software dialog box titled "Element Material Specification". It is for a material named "Linear Isotropic Brick" (ID 1) with the material type "Steel (4130)". The dialog lists several mechanical properties with their values and units:

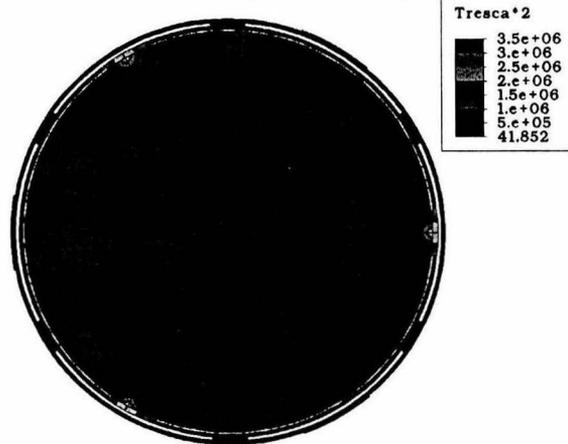
Property	Value	Unit
Mass Density	7822.9	kg/m ³
Modulus of Elasticity	206840000000	N/m ²
Poisson's Ratio	0.3	
Thermal Coefficient of Expansion	0.0000135	1/°C
Shear Modulus of Elasticity	0	N/m ²

At the bottom of the dialog are buttons for "OK", "Cancel", "Apply", "Print", "Previous Apply", "Reload From Library", and "Unlock Properties" (with a padlock icon).

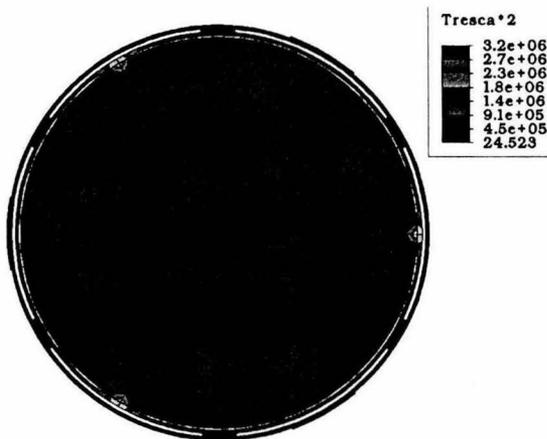
Debido a una variación del Módulo de Young (+/-20%)

Estos valores son los máximos presentados en el análisis de D1L1. El comportamiento en la apertura óptica presenta los mismos porcentajes de variación y los valores de esfuerzo son menores.

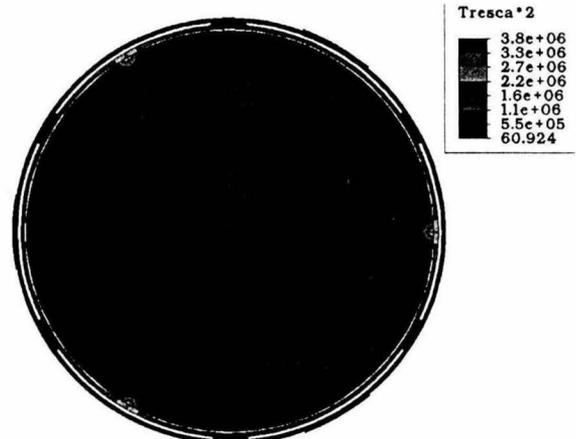
Con 206.840 GPa
Esfuerzo (3.5314 e+6) Pa



Con 20% menos (165.472 GPa)
Esfuerzo 3.17614e+6 (89.93%)

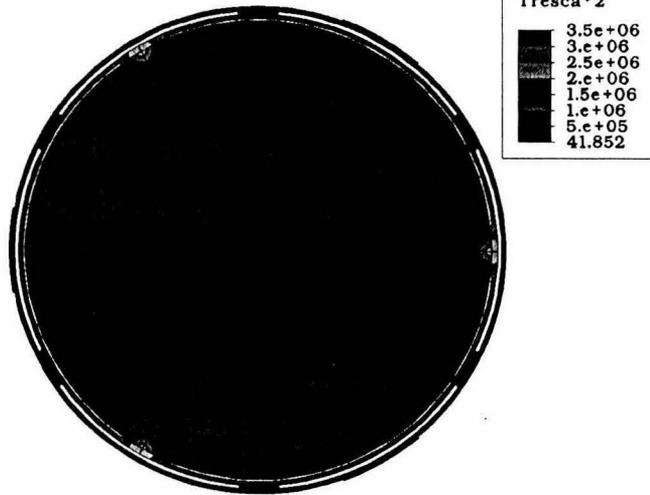


Con 20% más (248.208 GPa)
Esfuerzo 3.84148e+6 (108.78%)

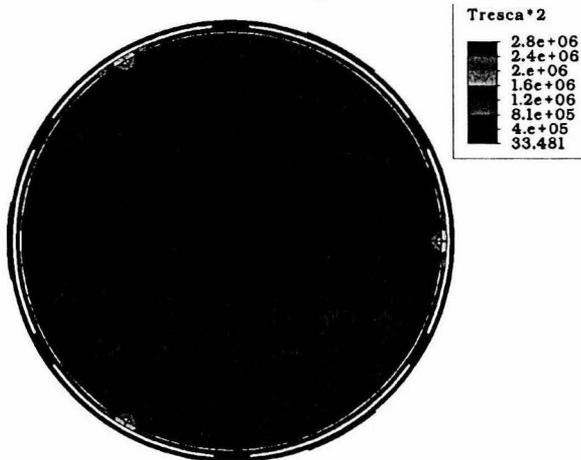


Debido a una variación del CTE (+/-20%)

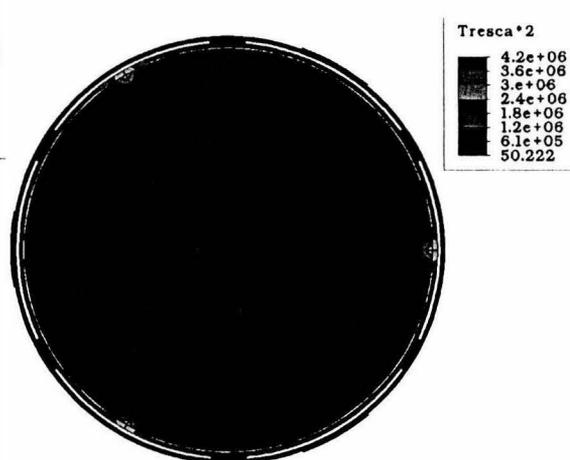
Con $13.5e-6$
Esfuerzo ($3.5314 e+6$)



Con 20% menos ($10.8e-6$)
Esfuerzo $2.82552e+6$ (80%)



Con 20% más ($16.2e-6$)
Esfuerzo $4.23829e+6$ (120%)



Se presenta linealidad, si el CTE aumenta o disminuye 20% los esfuerzos lo hacen proporcionalmente (comportamiento esperado y que verifica el *FEA*).