



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL



“DISEÑO Y MANUFACTURA EN LA INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA: INTERFERÓMETRO DE MOTAS”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO MECÁNICO
PRESENTA
ARES ARGELIA GÓMEZ GALLEGOS

DIRIGIDA POR:
M. I. ALEJANDRO FARAH SIMÓN
DR. VALERI ORLOV ROMANENKO



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.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería, al Instituto de Astronomía y al Instituto de Materiales por brindarme la oportunidad de conocer y superarme día a día.

A mis padres, Argelia y Héctor, y a mi hermana Airé por todo el apoyo que me brindaron durante este camino. Este éxito es de ustedes.

A mi tío Miguel, mi tía Minda y May, por su especial apoyo y confianza en mí.

A Alejandro Farah, por todo su apoyo durante este proceso y ayudarme en cada momento.

Я хочу выразить искреннюю благодарность научному руководителю доктору Валери Орлов за оказанную поддержку, советы, у терпение, во время помощь диссертационной работы.

A mis amigos de la Facultad, que recorrieron junto a mí este proceso: Ale, Jaz, Toño, Fer, Misa, Ian, Jorge, Mau, Rene, Paco, Victor, Angy, Hector, David y Sergio.

A mis amigas del toda la vida, Paty, Gretel, Julieta y Araceli.

A mis amigos de Tiro con Arco y la Prepa, que me ayudaron a conocer el mundo: Misael, Antonia, Gabriel, Carlos, Sandra, Carlos Hidalgo, Marco, Bruno, Georges y Jorge Peña.

A mis compañeros del IA y del IIM que me ayudaron cada momento a aprender: Marco, Oscar, Dr. Said, Rocio, Venni.

A Germán que ha estado conmigo siempre, no tengo palabras para expresarte lo que has significado para mí.

Al Dr. Manuel Dorador, al M.I. Mariano García, al Dr. Valeri Voitsekhovich por las correcciones de esta tesis.

Al Dr. Arturo Barba, al Dr. Ubaldo Márquez, al M. I. Miguel Ángel Cruz y a todos mis profesores que sin sus enseñanzas no estaría aquí.

A la familia Gallegos y a la familia Gómez.

Y a todos los que por descuido no están en esta lista pero que me apoyaron durante este proceso.

¡¡GRACIAS!!

*Los científicos exploran lo que es.
Los ingenieros crean lo que nunca ha sido.*

T. von Karman

ÍNDICE

OBJETIVOS	4
RESUMEN Y ABSTRACT	5
1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	7
1.1 INTRODUCCIÓN	7
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	9
1.3 DESARROLLO ASTRONÓMICO.....	10
1.4 DESARROLLO TECNOLÓGICO	11
2. ANTECEDENTES	14
2.1 INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA	14
2.2 EL TELESCOPIO.....	22
2.3 CONCEPTOS IMPORTANTES	25
2.3.1 <i>Conceptos básicos del comportamiento de la luz</i>	29
2.3.2 <i>Estrellas asociadas por gravedad</i>	34
2.4 EL INTERFERÓMETRO	37
3. MARCO TEÓRICO	44
3.1 LA INTERFEROMETRÍA	44
3.2 EL INTERFERÓMETRO ASTRONÓMICO	48
3.3 UN POCO DE HISTORIA DEL INTERFERÓMETRO ASTRONÓMICO	48
3.4 TEORÍA DEL INTERFERÓMETRO DE MOTAS	50
3.5 DISEÑO	54
3.5.1 <i>Clasificación del diseño</i>	55
3.5.1.1 Diseño industrial	55
3.5.1.2 Diseño gráfico	55
3.5.1.3 Diseño artesanal	55
3.5.1.4 Ecodiseño.....	55
3.5.1.5 Diseño mecánico	56
3.6 METODOLOGÍA DEL DISEÑO MECÁNICO	56
3.6.1 <i>Proceso de diseño mecánico</i>	57
3.6.1.1 Reconocimiento de la necesidad	57
3.6.1.2 Definición del problema	57
3.6.1.3 Diseño conceptual.....	59
3.6.1.4 Diseño preliminar	60
3.6.1.5 Diseño crítico o de detalle.....	62
3.6.1.6 Manufactura.....	63
4. DISEÑO OPTOMECÁNICO DEL INTERFERÓMETRO DE MOTAS, TOHTLI 66	
4.1 LA NECESIDAD	66

4.2	DEFINICIONES BÁSICAS	67
4.2.1	<i>Interferómetro de motas</i>	67
4.2.2	<i>Envolvente mecánica</i>	67
4.2.3	<i>Interfaz mecánica</i>	67
4.2.4	<i>Ocular</i>	67
4.2.5	<i>Filtro</i>	67
4.2.6	<i>CCD</i>	68
4.2.7	<i>Resolución</i>	68
4.2.8	<i>Repetitibilidad</i>	68
4.3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	68
4.3.1	<i>Requerimientos</i>	69
4.3.1.1	Requerimientos Funcionales.....	69
4.3.1.2	Requerimientos Físicos	70
4.3.1.3	Forma geométrica de los componentes y de la estructura.....	71
4.3.2	<i>Indicar las especificaciones de diseño</i>	72
4.3.2.1	Especificaciones de desempeño óptico	72
4.3.2.2	Especificaciones mecánicas	74
4.3.2.3	Especificaciones físicas	77
4.3.2.4	Especificaciones ambientales	77
4.3.2.5	Especificaciones de materiales.....	78
4.4	DISEÑO CONCEPTUAL.....	79
4.4.1	<i>Generación de ideas</i>	79
4.4.2	<i>Evaluación de ideas</i>	80
4.4.2.1	Costo	85
4.4.3	<i>Determinación del concepto final</i>	86
4.5	DISEÑO PRELIMINAR	88
4.5.1	<i>Descripción general del sistema</i>	88
4.5.2	<i>Componentes que integran el sistema</i>	88
4.5.2.1	Componentes ópticos.....	88
4.5.2.2	Componentes mecánicas.....	92
4.5.3	<i>Peso estimado</i>	93
4.5.4	<i>Planos y explosivo</i>	94
4.5.5	<i>Proceso de manufactura</i>	94
4.5.6	<i>Ensamble y desensamble</i>	94
4.5.6.1	Acople de los subsistemas.....	94
4.5.6.2	Herramientas	98
4.5.6.3	Repetitibilidad	98
5.	CONCLUSIONES	99
5.1	RESULTADO	99
5.1.1	<i>Cálculo y elección de los componentes</i>	100
5.1.2	<i>Problemas detectados</i>	101
5.1.3	<i>¿Y ahora qué sigue?</i>	101
	REFERENCIAS	102
	ANEXO	104

OBJETIVOS

Establecer las especificaciones de un Interferómetro de motas que satisfaga las necesidades y los requerimientos establecidos para realizar investigación astronómica.

Realizar el Diseño Optomecánico de Tohtli cumpliendo las especificaciones establecidas. Para ello se aplicó una metodología de Diseño Mecánico, teniendo un especial cuidado en la etapa donde se plantean dichas especificaciones para que el instrumento satisfaga las necesidades y los requerimientos dados para realizar investigación astronómica.

Además se evaluará la factibilidad, costos y manufactura de la configuración propuesta.

RESUMEN Y ABSTRACT

Resumen

La distorsión que la luz de una estrella sufre cuando pasa a través de la atmósfera es uno de los factores más importantes que influyen en la calidad de la imagen de dicha estrella.

Es por ello, que en el Instituto de Astronomía (IA) de la UNAM se está diseñando un interferómetro de motas, Tohtli, con el cual se podrá reducir este problema cuando se obtienen imágenes directas.

El objetivo de este trabajo es realizar el Diseño Optomecánico de Tohtli cumpliendo las especificaciones establecidas. Para ello se aplicó una metodología de Diseño Mecánico, teniendo especial cuidado en la etapa donde se plantean dichas especificaciones para que el instrumento satisfaga las necesidades y los requerimientos dados para realizar investigación astronómica.

Este instrumento debe tener a diseño y manufactura simple, los componentes ópticos deben ser comerciales y las partes manufacturadas deben ser las menos posibles.

Tohtli será utilizado para medir la separación y la posición angular de estrellas binarias utilizando el método de interferometría de motas con el Telescopio de 1m de Tonanzintla, Puebla.

Abstract

The distortion that the star light suffers when it passes through the atmosphere is one of the most important elements that influences the quality of the image of the star.

Due to this fact, a Speckle Interferometer, Tohtli, is being designed in the Astronomy Institute of UNAM. This instrument will reduce the distortion problem when direct images are obtained.

The objective of this project is to make the Optomechanical design of Tohtli which satisfies the specifications established. For this, we apply a methodology of Mechanical Design, taking special care in the definition of those specifications, so the instrument fulfills with the necessities and the requirements established to make astronomical investigation.

This instrument must have a simple design and manufacture; the optical components must be commercial and the number of manufactured parts must be the minimum.

Tohtli is going to be used to measure the separation and the angle of position of binary stars by using the method of Speckle Interferometry in the 1m Telescope of Tonantzintla, Puebla.

1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

En este capítulo se da una pequeña introducción a lo que se va a desarrollar en este trabajo, incluyendo el desarrollo tecnológico y astronómico existente al momento de realizarlo.

Así mismo se plantea el contenido de cada uno de los capítulos que conforman este trabajo.

1.1 Introducción

La Ingeniería Mecánica tiene aplicación en áreas tan diversas que van desde la industria hasta a la Astronomía. Y es en esta última donde actualmente se están haciendo avances muy importantes, específicamente en el área de la instrumentación astronómica.

Muchos se preguntarán, ¿Porqué dedicarle tiempo a la investigación del universo, si todavía no se tiene un profundo conocimiento de la Tierra?, La respuesta es sencilla, desde un principio, el hombre se vio afectado por los cuerpos celestes y su trayectoria cíclica, los cuáles marcaron los fenómenos que sucedían en la tierra, y de conocerlos dependía su vida.

En el siglo XVII, se inventó el primer aparato que permitía una mejor observación de los astros, el telescopio, con el cual se avanzó en el conocimiento del universo y dando como resultado una redefinición del mismo.

Luego, con el desarrollo astronómico, se ha llegado a un conocimiento más profundo del universo, pero a la vez que se contestan las interrogantes que existen, surgen nuevas que son más difíciles de responder, y para hacerlo se requiere de nueva tecnología y el desarrollo de nuevos instrumentos astronómicos, que mejoran la sensibilidad y la resolución del telescopio.

Para obtener imágenes de buena calidad de objetos astronómicos débiles se tiene que incrementar el área colectora del telescopio y reducir las aberraciones debido al ambiente. El Telescopio Espacial Hubble (HST por sus siglas en inglés) fue puesto en órbita en 1990 para superar las aberraciones debidas a la turbulencia atmosférica, siendo posible alcanzar el límite de difracción como resolución óptica del instrumento. Sin estas perturbaciones atmosféricas, el HST provee una resolución 10 veces mejor que cualquier

telescopio en Tierra de 2.4 metros de apertura de reflexión, sin embargo, no sería sencillo ni práctico poner a todos los telescopios en órbita.

Por otro lado, para incrementar la resolución de un telescopio, se debe aumentar el tamaño efectivo del telescopio. La solución simple sería construir ópticos más grandes, pero el tamaño de la apertura del telescopio está limitado por el diámetro del espejo primario, que conforme va creciendo la dimensión del espejo, su manufactura se va haciendo más difícil, por lo que actualmente se están buscando nuevas técnicas que permitan superar estos obstáculos y así obtener imágenes de alta resolución.

Una de estas técnicas es la interferometría, específicamente, la interferometría de motas¹, la cual es una técnica que se basa en la obtención de una serie de imágenes de corta exposición de un cuerpo celeste luminoso, cada imagen obtenida es un patrón de múltiples imágenes de la fuente, llamadas "motas", y luego analizarlas para recuperar la información perdida, y lograr tener imágenes de resolución superior a las obtenidas por cualquier otro método.

El Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México, buscando estar a la vanguardia, está diseñando un Interferómetro de Motas (*Tohtli*, por el vocablo náhuatl que significa *halcón*), que pueda proporcionar imágenes de corta exposición de estrellas binarias o múltiples, que al ser analizadas nos den imágenes de alta resolución que nos permitan medir el ángulo de posición y la separación angular de dichos sistemas de estrellas y así profundizar nuestro conocimiento del Universo.

Para tener un adecuado diseño de *Tohtli* se requirió aplicar la metodología del diseño mecánico, sustentado por los antecedentes que se tienen del tema y la infraestructura con la que cuenta el Instituto.

El presente trabajo está compuesto por cinco capítulos centrales, más uno de conclusiones, y por último, uno de referencias.

En el primer capítulo se da una pequeña introducción al tema desarrollado en este trabajo, incluyendo el desarrollo tecnológico y astronómico existente al momento de realizar este trabajo.

En el segundo capítulo se tratan los antecedentes relacionados con el progreso de la instrumentación astronómica, haciendo énfasis en el Interferómetro.

En el tercer capítulo se expone el marco teórico que da las bases y la metodología a seguir para el desarrollo de este tema de tesis.

En el capítulo cuarto, se describen las etapas de diseño seguidas para obtener el diseño final del Interferómetro de Motas *Tohtli*. Se describe el equipo y se muestran imágenes del mismo.

En el capítulo de conclusiones, se hacen comentarios respecto a los ensayos hechos, problemas detectados durante el proceso. Se analizan los resultados obtenidos del proyecto, y se proponen otras alternativas para la continuación de esta línea de investigación.

Finalmente, se presentan las referencias utilizadas para realizar este trabajo.

1.2 Justificación

El éxito en las observaciones astronómicas depende de factores, tanto naturales como técnicos, que afectan la calidad de la imagen obtenida. Uno de estos es la distorsión que sufre el haz luz al pasar por la atmósfera, lo que nos impide obtener imágenes de larga exposición suficientemente nítidas.

Sin embargo, existen estudios que demuestran que la interferometría de motas nos permite superar este problema, ya que consiste en tomar una larga serie de imágenes de corta exposición en las cuales se congela la turbulencia atmosférica. Luego estas imágenes se procesan y se obtiene una imagen de muy alta resolución, la cual es muy útil en la investigación astronómica.

Buscando obtener este tipo de imágenes de alta resolución, el Instituto de Astronomía de la UNAM, está diseñando un Interferómetro de Motas de dimensiones adecuadas para su fácil manejo.

Se diseñará este instrumento con el fin de utilizarlo en la medición de la separación angular y el ángulo de posición de estrellas dobles y múltiples con el método de Interferometría de motas, empleando el Telescopio de 1m. de Tonanzintla, Puebla.

Con el método de interferometría de motas se obtiene una resolución 10 veces mayor a la resolución común del telescopio de 1m., la cual está limitada por la apertura del telescopio y por la distorsión de la luz al pasar por la atmósfera, mientras que con un interferómetro de motas, solo estaría limitada por la difracción del telescopio.



Figura 1.1 Telescopio de 1m de Tonanzintla Puebla.

Este instrumento se desarrollará utilizando sistemas de diseño, manufactura e ingeniería asistidos por computadora (CAD, CAM y CAE), ya que la utilización de estos permiten optimizar los tres principales aspectos del diseño: costo, tiempo y factibilidad de manufactura.

El contar con un Interferómetro de Motas como este en los telescopios de México, se vuelve cada día más necesario si se desean obtener datos de estrellas binarias o de baja luminosidad; por lo que el fin de este trabajo es dar las bases del diseño conceptual y preliminar de un instrumento de bajo costo, pero alta precisión que permita hacer mediciones astronómicas utilizando el método de interferometría de motas.

1.3 Desarrollo astronómico

La Astronomía se considera como la más antigua de las ciencias, ya que ha estado presente durante toda la historia de la humanidad. Desde el principio, el hombre primitivo tuvo que enfrentarse a las inclemencias del tiempo, por lo que la observación del cielo y el conocimiento del movimiento cíclico del Sol, la Luna y las Estrellas, pronto demostró su utilidad para la predicción de fenómenos tales como el día y la noche, y las estaciones del año, lo que al final determinó su supervivencia.

Para los grupos nómadas, este conocimiento era indispensable para conocer la época de migración de los animales y después, para los grupos sedentarios fue trascendental conocer cuando se debía sembrar y cultivar su alimento; así la Astronomía antigua constituyó las bases para el calendario y la medida de periodos temporales, como semana, mes o año.⁸

Los hombres antiguos también atribuyeron la posición y el movimiento de los astros a fenómenos astrológicos y los utilizó para diversos propósitos tales como rituales, premoniciones, señales de los dioses, etc.

La Astronomía antigua culmina con el desarrollo ordenado de la teoría Geocéntrica expuesta por Ptolomeo, iniciándose así la época clásica de la Astronomía. El avance de Astronomía se vio detenido por la época Medieval, pero resurgió con Nicolás Copernico (1473-1543), quien estableció la teoría Heliocéntrica, y continuó con Tycho Brahe (1546-1601) quien fabricó numerosos instrumentos astronómicos previos al telescopio.

Posteriormente Galileo Galilei (1564-1642) construyó su telescopio, basándose en un instrumento holandés e hizo las primeras observaciones de los cráteres de la luna, las lunas de Júpiter y las manchas solares. Paralelamente Johannes Kepler (1571-1630) expuso sus "Leyes de Kepler" y una generación después Isaac Newton (1642-1727), propuso una teoría que unió la Física con la Astronomía, ya que afirmó que las mismas fuerzas que hacían caer los cuerpos en la tierra, causaban el movimiento de los planetas y la luna.

Newton también descubrió que la luz blanca del Sol está compuesta por diversos colores, conocimiento que hasta la actualidad se utiliza en la Astronomía.

A principios del siglo XX, con los avances en el estudio de la luz y el desarrollo de la Astronomía, se descubrió la existencia de la Vía Láctea, así como de otras galaxias, y el desarrollo de la



Figura 1.2 Telescopio diseñado por Galileo Galilei, 1609

tecnología en la segunda mitad del siglo XX propició grandes avances en la instrumentación astronómica²⁸, desarrollando telescopios cada vez más grandes y más especializados, con lo que la observación Astronómica amplió nuestra visión del Universo y nuestra comprensión de él.

1.4 Desarrollo tecnológico

La calidad de las imágenes astronómicas es uno de los puntos clave par obtener observaciones astronómicas exitosas. Sin embargo, hay ciertos factores, tanto naturales como técnicos, que degradan la calidad de la imagen: la turbulencia atmosférica (Fried 1966; Roddier 1981⁹), la calidad del espejo del telescopio o los errores de orientación del telescopio. Por lo que, a fin de obtener la mejor calidad posible en las imágenes astronómicas, se necesita minimizar la influencia de los factores antes mencionados.

El método de la interferometría de Motas es capaz de resolver el problema de la distorsión de la imagen debido a la turbulencia atmosférica, por lo que se están desarrollando tecnologías para la aplicación de este método a los telescopios a nivel mundial. Un ejemplo de esto es el sistema interferométrico desarrollado y utilizado en 1999 en el Vainu Bappu Telescope (VBT) de 2.34 metros, situado en el Observatorio de Vainu Bappu, Kavalur, India, para obtener imágenes de motas de cuerpos celestes en la longitud de onda visible (Ver sección 3.2.1.1). Se tomaron las precauciones necesarias para la observación en el primer foco ($f/3.25$), así como en el foco de Cassegrain ($f/13$) del telescopio dicho.

Actualmente se está usando este instrumento para observar las motas de estrellas binarias muy juntas (la separación <1 segundo del arco).

La figura 1.3 muestra el diseño óptico de este Interferómetro de Motas. El frente de onda (Ver sección 3.2.1.1), cae en el plano focal de la superficie óptica hecha de vidrio de baja expansión con una apertura de aproximadamente 350μ , a un ángulo de 15° en su superficie. La imagen del objeto pasa por el objetivo para microscopio a través de esta apertura que reduce la escala de la imagen del telescopio al $f/130$. Un filtro colocado antes del buscador, para evitar el efecto borroso en el cromático. El campo circundante de la estrella de diámetro 10 mm, se refleja de la superficie óptica a un espejo plano y es reflejada en un CCD intensificado (ICCD) (Ver sección 4.2.5).

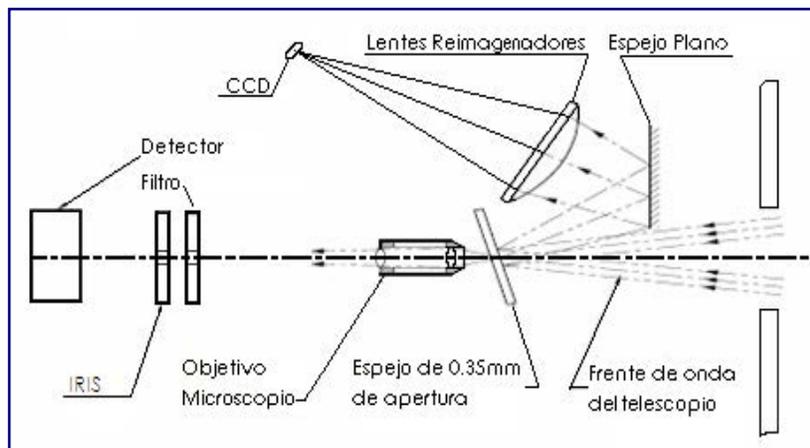


Figura 1.3 Diseño óptico del Interferómetro de Motas utilizado en el Observatorio de Vainu Bappu, India

Este instrumento es ligero pero rígido para evitar doblarse cuando está sujeto a cargas debido a las orientaciones múltiples del telescopio. La desviación del instrumento es mínima bajo su propio peso, así como cuando cuenta con todos los accesorios requeridos para la observación. Se tomaron todas las precauciones necesarias para lograr una convergencia fina de la imagen y así tener una buena resolución y claridad en la observación. Además este instrumento está ajeno a los efectos de temperatura. El instrumento está hecho de Acero inoxidable martensítico (SS410), un material con bajo coeficiente de expansión lineal (aproximadamente la mitad que el de acero normal).¹⁴

También en Rusia, desde el año 2002, se está trabajando con un Interferómetro de Motas digital, el cual estudia la estructura de cuerpos celestes de tamaño pequeño (aprox. 1") con una resolución espacial correspondiente al límite de difracción de un telescopio de 6m. Este interferómetro toma una larga serie de imágenes de motas de corta exposición. La corta exposición congela la distorsión del haz de luz al pasar por la atmósfera, y así se obtiene información de alta resolución del promedio de la intensidad del espectro de las imágenes de motas (Labeyrie, 1970).

Este arreglo consta de los siguientes componentes:

Un objetivo para microscopio (2), un obturador y filtros (3), un prisma de compensación (4), un sistema detector (5-8) y un control por PC.¹¹

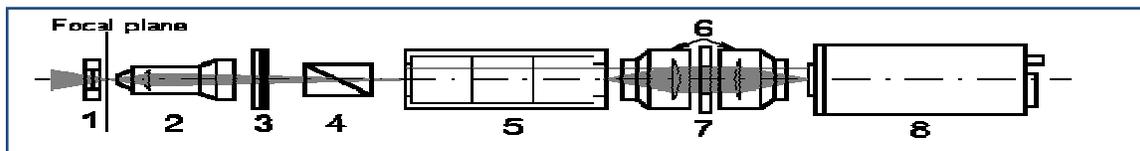


Figura 1.4 Diseño óptico del Interferómetro de Motas utilizado en el Observatorio de Rusia

En el 2006, en el Instituto de Astronomía de la UNAM se realizaron las primeras observaciones con el método de interferometría de motas. Para ello modificaron el equipo astronómico Dragon¹⁰.

El equipo Dragon es un instrumento que permite llevar a cabo muchos tipos de investigación experimental relacionada con la óptica adaptativa, la óptica activa, la Astronomía observacional y la instrumentación astronómica.³⁶ El equipo consiste en tres canales ópticos independientes pero sincronizados temporalmente, con lo que se amplía su campo de posibles aplicaciones⁴⁷, entre ellas, la interferometría de motas¹. Se presenta a continuación un esquema del equipo.

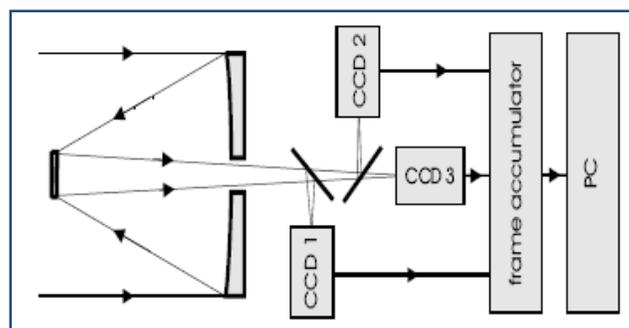


Figura 1.5 Esquema general del equipo experimental Dragon

La luz de una estrella concentrada por el telescopio es dividida en tres haces con dos divisores de haz. Cada uno de los haces es dirigido a la cámara CCD, la cual graba las imágenes, las digitaliza y las manda al canal correspondiente del acumulador de imágenes. Después de terminar un experimento, la información concentrada por el acumulador es reescrita desde la memoria interna del disco duro de la PC. La PC además controla todas las operaciones que realiza el equipo, y permite que se le asignen todos los parámetros para un experimento y así realizar la reducción de datos.

Continuando con esta línea de investigación, el Instituto de Astronomía de la UNAM, da un paso más y propone el desarrollo de Tohtli, un Interferómetro de Motas de dimensiones adecuadas para su fácil manejo y transporte, que permita la medición de la separación y el ángulo de posición de estrellas dobles y múltiples, utilizando el telescopio de 1m de Tonanzintla, Puebla y que pueda ser manejado por una PC portátil.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se tratan los antecedentes relacionados con el progreso de la instrumentación astronómica, haciendo énfasis en el Interferómetro, en el comportamiento de la luz y el concepto de estrella doble, que es el objeto de estudio del interferómetro de motas Tohtli.

2.1 Instrumentación astronómica

La Astronomía, ciencia que trata de cuanto se refiere a los astros, y principalmente a las leyes de sus movimientos³¹, requiere del monitoreo constante del cielo en la búsqueda de objetos no estudiados o de aspectos y detalles de otros ya estudiados que permitan entender sus orígenes y su evolución. Una herramienta fundamental en este trabajo es el telescopio.

La función fundamental del telescopio es concentrar la luz procedente de los objetos celestes, logrando una imagen amplificada de ellos; la cantidad de luz concentrada es directamente proporcional al diámetro del telescopio. Es decir, duplicar el diámetro de un telescopio implica cuadruplicar la capacidad de colección de luz.

Por otro lado, dado que los objetos celestes emiten radiación electromagnética de diversas longitudes de onda (la luz es radiación electromagnética), otro aspecto a considerar en un telescopio es el intervalo de longitudes de onda en el que va a utilizarse.



Figura 2.1 Gran Telescopio Milimétrico, Puebla, México.

La UNAM cuenta actualmente con cuatro telescopios de uso científico que se emplean con luz visible e infrarroja. Tres de ellos, de 0.84m, 1.5m y 2.12m, se encuentran ubicados en el Observatorio Astronómico Nacional en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California y el cuarto, de 1 m de diámetro, se encuentra en Tonantzintla, Puebla. Pero, también

existen, los telescopios que se utilizan para estudiar ondas cuya longitud es similar a la de las ondas de radio que se emplean en telecomunicaciones. Estos son los radiotelescopios. Un ejemplo de esta clase de radiotelescopios es el recién inaugurado Gran Telescopio Milimétrico, ubicado en la Sierra Negra, de Puebla, México, a más de 4500 metros de altura, y a 18° latitud Norte, este radiotelescopio es el más grande del mundo.¹⁹

También existen los telescopios que estudian luz ultravioleta, los cuales tienen que trabajar en el espacio, pues la atmósfera no permite el paso de la radiación cuya longitud de onda sea menor que 300 nanómetros. De hecho, aunque el Universo emite luz en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético, la mayor parte no nos llega a la superficie de la Tierra, pues la atmósfera se encarga de bloquearla.

Los telescopios ópticos se pueden clasificar por la manera de captar la luz: Los telescopios refractores usan lentes y los reflectores usan espejos.

Actualmente los astrónomos no utilizan mucho los refractores, debido a que si se quiere concentrar mucha luz de un objeto tenue, se necesitaría una lente muy grande. La única forma de soportar una lente es alrededor de su borde y la fuerza de la gravedad la deformaría al mover el telescopio. El telescopio refractor más grande del mundo posee 1 metro de diámetro, y está ubicado en el Observatorio Yerkes de la Universidad de California. Fue construido en 1897 por Alvan Clark e Hijos, siendo en su tiempo una pieza clave para la determinación de la forma de nuestra galaxia.



Figura 2.2 Telescopio refractor de Yerkes, Chicago, EU

El telescopio del Antiguo Observatorio de Greenwich es un refractor de 28 pulgadas. (El primer telescopio construido, que se atribuye al holandés Hans Lippershey era refractor, pues estaba construido con dos lentes. ¹⁹ También el telescopio utilizado por Galileo en 1609 era de este tipo).

Se sabe que fue el matemático escocés James Gregory quien describió por primera vez un telescopio con un espejo reflector en 1663 y el físico y matemático inglés Isaac Newton construyó el primer telescopio reflector en 1668. Para evitar que el ocular y la cabeza del observador intercepten gran parte de los rayos incidentes, la luz reflejada por el espejo cóncavo debe llevarse a un punto de visión conveniente al lado del instrumento o debajo de él. Gregory ya había solucionado esta dificultad en su diseño interponiendo un segundo espejo cóncavo, para enviar los rayos de luz a un ocular. ³² Al primer espejo recolector se le conoce como primario y al segundo como secundario.

En 1931, el óptico alemán Bernard Schmidt inventó un telescopio combinado reflector-refractor que puede fotografiar con nitidez amplias áreas del cielo. Este telescopio contiene en un extremo una lente delgada y un espejo cóncavo con una placa correctora en el otro. El mayor telescopio Schmidt, con una lente de 134 cm y un espejo de 200 cm, está en el Observatorio Karl Schwarzschild, en Alemania.¹⁹

Telescopios gigantes y de nueva tecnología

En la actualidad, los telescopios con los espejos más grandes del mundo superan los 8 metros de diámetro. Por ejemplo, los Gemini, dos telescopios de 8,2 metros, uno en Hawái y otro en Chile; Subaru, telescopio japonés de 8,4 metros ubicado en Hawái; VLT, un conjunto de cuatro telescopios de 8,2 metros situado en los Andes Chilenos; y el LBT, una especie de “súper binocular”, aún en construcción, con dos espejos de 8,4 metros en el Observatorio de Monte Graham, en Estados Unidos.

En el VLT (Very Large Telescope), los telescopios podrán utilizarse de forma independiente, pero en principio han sido diseñados para que funcionen totalmente sincronizados, a fin de combinar en modo interferométrico la luz captada por los cuatro y la de cuatro telescopios auxiliares de 1.8 m. Una vez que esté totalmente operando (aún faltan tres de los telescopios auxiliares), el arreglo tendrá una resolución angular muy alta, equivalente a la de un único telescopio con un diámetro igual a la distancia máxima entre ellos (200 m)¹⁹ Tal resolución angular será del orden de milisegundos de arco, que corresponde casi a la resolución necesaria para ver un astronauta en la Luna.

La técnica será la misma que se empleará en el LBT (large binocular telescope), donde sus dos espejos primarios comparten la misma montura. Este telescopio aún se encuentra en la última etapa de su construcción.

Sin embargo, dado el gran tamaño de estos espejos monolíticos, se han adoptado diseños que prefieren los espejos delgados. Esto tiene dos ventajas: la primera es el relativamente bajo peso del espejo y la segunda es el hecho de poder deformar el espejo, dentro de ciertos límites. Esto último, a su vez, permite corregir de manera dinámica las deformaciones del espejo, tanto las que surgen de origen en su manufactura, como las que producen la acción de la gravedad y los cambios de temperatura. La rama de la óptica que se dedica a corregir este tipo de deformaciones se llama óptica activa.

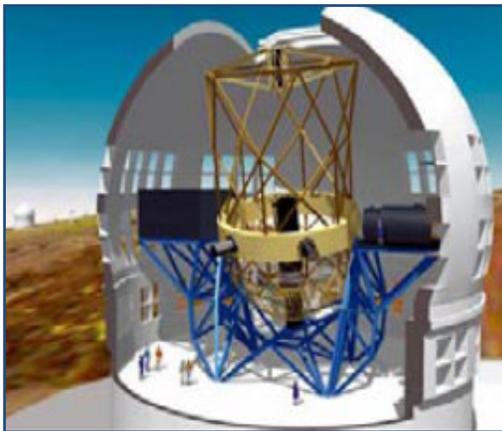


Figura 2.3 Representación artística del Gran Telescopio de Canarias.

Desde la década de los 70 se sabe que los efectos de la turbulencia atmosférica es un factor que limita la calidad de las imágenes astronómicas. De hecho, se encontró que no eran tanto los efectos atmosféricos lejanos en las capas altas de la atmósfera sino los efectos locales, es decir, las corrientes de aire cercanas a los edificios y los flujos de aire caliente en el interior de los mismos. Así, el diseño de estos telescopios ya incluye aspectos como el uso de ventiladores especiales, aire acondicionado para el día, enfriado de pisos, eliminación de fuentes de calor, etc., lo que ha logrado reducir sustancialmente los efectos de la turbulencia atmosférica.¹⁹

Para disminuir los efectos atmosféricos residuales, ha nacido la óptica adaptativa, que ha permitido obtener en estos telescopios imágenes de gran nitidez, muy aproximadas a las obtenidas en el espacio.

Existen telescopios aún más grandes, pero con el espejo primario segmentado. Entre ellos están los dos telescopios Keck ubicados en la cumbre del Observatorio de Mauna Kea, en Hawai, cuentan con 36 segmentos hexagonales con un diámetro equivalente de 9.82 metros; el HET (Hobby-Eberly Telescope) y el SALT (Southern African Large Telescope), en Texas y en Sudáfrica, respectivamente, con 9 metros de apertura; y el Gran Telescopio Canarias, con 10.4 metros, actualmente en sus últimas etapas de construcción y del cual México es participante a través de la UNAM y el INAOE.

El éxito de estos proyectos ha hecho estudiar, la posibilidad de construir telescopios ópticos de 30 (CELT), 50 (Euro50) o incluso de 100 metros (OWL) de diámetro. A estos telescopios se les llama "Telescopios Extremadamente Grandes", pero para ello, habrá que superar algunos retos tecnológicos importantes, ya no tanto relacionados con la óptica en sí misma, sino con la mecánica que debe soportarla, con los sistemas de control y el resto de infraestructuras necesarias.¹⁹

Radiotelescopios

Los radiotelescopios detectan radiación cuya longitud de onda es similar a la de las ondas de radio. La montura usada en ellos generalmente es del tipo acimutal. Existen muchos radiotelescopios individuales en el mundo, pero a unos 80 km al oeste de Socorro, Nuevo México (EEUU), existe un arreglo de ellos conocido como el VLA (very large array o arreglo muy grande), formado por 27 antenas móviles, dirigibles. Cada una de ellas tiene 25 metros de diámetro y se encuentran colocadas en tres brazos de 21 km, con una configuración en forma de Y. Combinando las señales de las 27 antenas, el VLA tiene un poder de resolución mucho mayor que el de cualquier antena única.³³

También existe el VLBA (Very Long Baseline Array), el cual está formado por un conjunto de 10 antenas situadas desde Hawai hasta las islas Vírgenes de Estados Unidos. El VLBA, que se terminó de construir en 1993, se basa en el mismo principio que el VLA, combinando las señales de sus 10 antenas para crear imágenes de muy alta resolución. El mayor radiotelescopio dirigible en el mundo cuenta con una antena de 100 m y se ubica en el Instituto Max Planck de RadioAstronomía, cerca de Bonn, Alemania.²⁰

El radiotelescopio más grande del mundo está fijo. Tiene 305 m de diámetro y fue construido en una hondonada natural en las montañas cercanas a Arecibo, Puerto Rico. El dispositivo detector en el foco del telescopio está suspendido sobre el reflector por tres soportes de acero. Este radiotelescopio se terminó en 1963 y es operado por la Universidad de Cornell.³²

Telescopios infrarrojos

Sir Frederick William Herschel, músico y astrónomo alemán emigrado a Inglaterra, construyó varios telescopios para observar el cielo, con lo que publicó varios catálogos de estrellas dobles y nebulosas y descubrió el planeta Urano en 1781. Después, mediante ingeniosos experimentos, descubrió lo que llamó "rayos caloríficos",²⁸ los cuales existían en la luz procedente del Sol más allá de la región roja del espectro visible y que eran reflejados, refractados, absorbidos y transmitidos de la misma manera que la luz visible. Estos "rayos caloríficos" fueron posteriormente denominados rayos infrarrojos o radiación infrarroja (el prefijo infra significa debajo).

La fuente primaria de la radiación infrarroja es el calor o radiación térmica. Cualquier objeto que tenga una temperatura superior al cero absoluto (-273.15 °C), como es el caso de todos los objetos celestes, irradia ondas en el infrarrojo. Incluso los objetos que se consideran muy fríos, como un trozo de hielo, emiten en el infrarrojo. Cuando un objeto no es suficientemente caliente para irradiar ondas en el espectro visible, emite la mayoría de su energía como ondas infrarrojas.¹⁹

Aunque la atmósfera bloquea la mayor parte de la luz infrarroja, pues es absorbida por el vapor de agua y el dióxido de carbono que hay en la atmósfera, un rango muy estrecho de longitudes de onda pueden llegar (al menos parcialmente) a los telescopios infrarrojos terrestres.

El infrarrojo está dividido en tres regiones espectrales: cercano, mediano y lejano infrarrojo. Las fronteras entre uno y otros son algo arbitrarias, pero están determinadas principalmente por el tipo de tecnología que emplean los detectores.¹⁹

Región espectral	Intervalo de longitudes de onda (micras)	Intervalo de temperaturas (Kelvin)	Lo que se puede observar
Cercano Infrarrojo	(0.7-1) a 5	740 a (3,000-5,200)	Estrellas frías rojas Gigantes rojas El polvo es transparente
Mediano Infrarrojo	5 a (25-40)	(92.5-140) a 740	Planetas, cometas y asteroides Polvo calentado por la luz estelar
Lejano Infrarrojo	(25-40) a (200-350)	(10.6-18.5) a (92.5-140)	Discos protoplanetarios Emisión del polvo frío Regiones centrales de galaxias Nubes moleculares muy frías

Tabla 2.1 Regiones Espectrales del infrarrojo

En el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir existen 2 sistemas para la detección de luz infrarroja. El primero de ellos, denominado CAMILA, cuenta con un detector NICMOS3. Este sistema se acopla a una cámara-espectrógrafo, llamado CAMALEON, con el cual se pueden tomar imágenes directas y espectros en el infrarrojo. También se le puede acoplar un interferómetro de Fabry-Perot o un polarímetro, con lo cual se ha convertido en un instrumento muy versátil con el que se han obtenido resultados científicos muy interesantes. Este instrumento ha sido construido en el Instituto de Astronomía de la UNAM.

El segundo instrumento en cuestión es un sistema infrarrojo denominado CID (cámara infrarroja doble), el cual fue diseñado para el estudio astronómico en el infrarrojo cercano y medio. Éste cuenta con dos detectores, un BIB y un InSb que comparten el mismo contenedor criogénico. El primero de ellos se emplea en el modo de imagen directa y el segundo puede emplearse tanto en imagen directa como en espectroscopia.¹⁹

Espectroscopía

Mediante técnicas espectroscópicas es posible conocer la composición química, la temperatura y el movimiento de estrellas y galaxias. Estos cuerpos están emitiendo constantemente energía en forma de ondas de luz visible, infrarroja, ultravioleta y, con frecuencia, ondas de radio y rayos X. Esta energía viaja a través del espacio y nos trae gran cantidad de información sobre la constitución de tales cuerpos. Al fraccionar esta luz en sus colores constituyentes se obtiene un espectro y es estudiando estos espectros que los astrónomos han podido hacer sus descubrimientos más importantes.³⁵

El espectro más familiar es el arco iris, espectáculo que se produce cuando la luz del Sol rebota dentro de cada una de millones de gotas de lluvia y en el proceso es fraccionada en sus colores constituyentes.

El dispositivo más elemental para dispersar la luz es un prisma triangular de vidrio, cuya acción es más familiar, pero en aparatos científicos se emplea más comúnmente una rejilla de difracción. El instrumento completo para este trabajo se llama espectrógrafo o espectrómetro.¹⁹

Isaac Newton fue el primero en entender que los colores producidos cuando la luz blanca pasa a través de un prisma son una propiedad de la luz misma, y no consecuencia de algo producido por el vidrio. La secuencia va de manera continua del violeta al rojo, pasando por el azul, verde, amarillo y anaranjado. La combinación de estos colores da como resultado luz blanca. La luz del Sol está compuesta de luz de todos estos colores, aunque predominando la luz amarilla (el color de luz que nuestros ojos detectan mejor). A cada color le corresponde diferente longitud de onda. La longitud de onda de la luz visible es aproximadamente la mitad de una micra.³⁴

Pero Joseph Fraunhofer observó que el espectro solar tiene muchas líneas oscuras, como si faltaran algunos colores y concluyó que las líneas oscuras del espectro del Sol coinciden con las líneas brillantes de los espectros de algunos tipos de lámparas.

Luego, Bunsen y Kirchhoff mostraron que distintas sustancias producen distintas líneas en el espectro. Es decir, distintos elementos químicos emiten su propio y característico espectro, que viene a ser la "huella digital" de átomos y moléculas.³⁵ Malacara, D., Malacara, J., 1995, "Telescopios y Estrellas," (Enero, 2007) pp. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/057/htm/sec13.html>

³⁵ Lo más notable del hallazgo de Kirchhoff era que permitía la identificación de los elementos presentes en el Sol lo cual permitiría eventualmente conocer la composición química de los astros.

Así, si se observa el espectro de un objeto astronómico y se encuentran las líneas características de un elemento en particular, es posible decir inmediatamente que ese elemento está presente ya sea en la estrella o galaxia misma o, en algunos casos especiales, en el espacio entre la estrella y nuestro telescopio.

Mediante el uso del espectrógrafo pueden estudiarse también los movimientos de los objetos astronómicos. Por ejemplo, para medir su movimiento a lo largo de la línea de visión, su velocidad radial, simplemente se emplea el efecto Doppler.

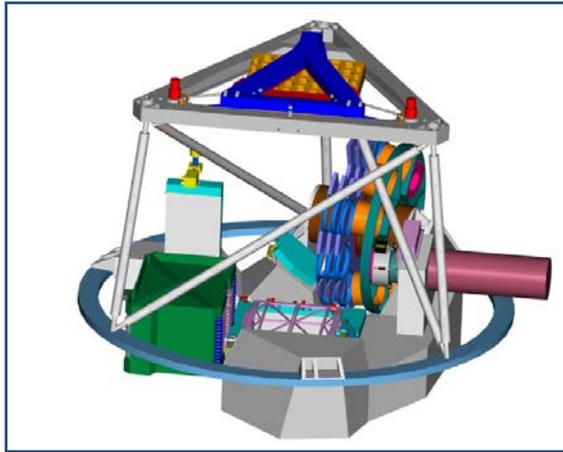


Figura 2.4 Optical System for Imaging and low Resolution Integrated Spectroscopy (OSIRIS)

Algunos de los espectrógrafos astronómicos modernos pueden ser instrumentos muy grandes y complejos, incluso pueden ser de un tamaño cercano al de un automóvil pequeño, pero los componentes ópticos deben mantenerse en posición con una precisión del orden de una milésima de milímetro.²⁰

Actualmente, en el Instituto de Astronomía de la UNAM, se está trabajando en el desarrollo de ESOP, el cuál es un espectrógrafo que surgió como respuesta a una amplia lista de proyectos planteados que superan los requerimientos ópticos y de funcionamiento del espectrógrafo B&Ch que es el actualmente utilizado, en el telescopio de 2 metros de San Pedro Mártir, Baja California.¹⁹

Interferometría

La idea de utilizar la interferometría en la Astronomía se remonta a 1868, cuando Fizeau propuso un arreglo que consistía en colocar dos divisores de haz en frente de un telescopio, su separación, cuando los patrones de interferencia que cruzaban la imagen de la estrella desaparecían, se podía usar para calcular el ángulo subtendido por la estrella. Desafortunadamente, este experimento no funcionó debido a que la apertura del telescopio no era lo suficientemente grande.

Luego, Michelson tomó la propuesta de Fizeau y la aplicó exitosamente para medir el diámetro de los satélites de Júpiter en 1890; y en 1921 se obtuvo el diámetro de Betelgeuse y otras seis estrellas, utilizando un interferómetro de 6 metros montado en el telescopio de 2.5 metros en Mt. Wilson.

Un intento de Michelson por extender esta técnica a puntos de partida más grandes, falló debido a problemas con la estabilidad del equipo y a la turbulencia atmosférica. Por lo que el siguiente avance en este rublo se obtuvo mediante otra metodología: medir el ángulo de correlación de la intensidad de fluctuación de dos puntos en el campo (Brown and Twiss, 1954) para lo cual se utilizó un Interferómetro de Intensidad (Brown et al., 1954). Otro enfoque, surgió con el desarrollo de los láseres y está basado en las técnicas heterodineas (Jonson, Betz, and Townes, 1974; Townes 1984)²¹.

Otros desarrollos en este campo son las técnicas de la Interferometría de Motas (Labeyrie, 1970) y la Holografía de Motas (Lui and Lohmann, 1973), las cuales han hecho posible determinar la estructura de muchos grupos compactos de estrellas.

Más recientemente, versiones más modernas del interferómetro estelar de Michelson, han sido construidas con bases mayores a 600 metros (Lawson, 1997); otras técnicas han sido desarrolladas para combinar imágenes provenientes de arreglos de varios telescopios, para así obtener una imagen con la resolución que tendría un solo telescopio con apertura igual a la distancia entre los instrumentos relacionados (Baldwin et al., 1996).²⁰

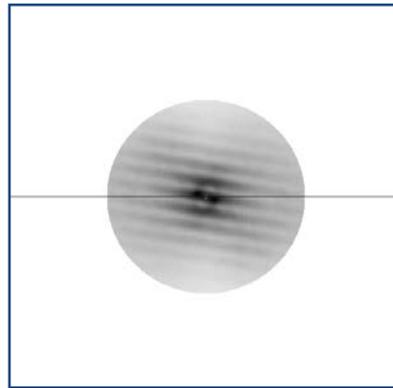


Figura 2.5 Estrella ADS 7142 Reconstruida con Interferometría de motas utilizando el equipo Dragon del IA

Software de control

En cuanto al software de control de instrumentos y telescopios hay que mencionar el rápido declinar de los entornos EPICS (*Experimental Physics and Industrial Control System*), que hoy en día están siendo sustituidos por las tecnologías orientadas a objetos, C++, Java, CORBA. Los grandes telescopios que en su día adoptaron EPICS todavía tardarán un tiempo en cambiar. El Gran Telescopio Canarias es el primero que desde su concepción está adoptando estas nuevas tecnologías y es un punto de referencia que está siendo seguido con gran interés por los otros grupos. Los planteamientos del proyecto GTC en este sentido son pioneros y van adquiriendo credibilidad.²¹

Detectores

En el mundo de los detectores astronómicos, las tecnologías han seguido avanzando y se ha podido constatar que las decisiones tomadas por los proyectos OSIRIS y EMIR desarrollados para el GTC son las adecuadas dentro de sus longitudes de onda de trabajo.²⁰

No obstante, los sistemas de adquisición de datos para estos detectores de última generación no son fáciles de conseguir. Varios grupos que ya tienen una tradición en estos desarrollos han adoptado la estrategia de seguir desarrollando ellos mismos sus sistemas de adquisición, lo que les permite estar en la cresta de la ola en estas tecnologías, pero a un coste alto en infraestructura y recursos humanos.

Nuevos materiales

La ausencia de grandes novedades tecnológicas en el campo de la instrumentación infrarroja y óptica para telescopios tiene su contrapartida con los desarrollos para el *Next Generation Space Telescope* (NGST). En este proyecto se están produciendo innovaciones tecnológicas en los campos de la optomecánica y la óptica con el uso, principalmente, de nuevos materiales. Estos materiales y los procesos para su tratamiento todavía no están al alcance, económicamente hablando, de los proyectos en telescopios terrestres. Por

otro lado, sus prestaciones técnicas se adecuan más a los problemas presentes en la Astronomía espacial y que tienen otras soluciones técnicas en los telescopios terrestres.²⁰

Otras técnicas ópticas

Desde hace algunos años existen comercialmente los espejos deformables que permiten hacer correcciones debidas a la turbulencia atmosférica. Para finales del 2003 aparecieron los primeros sistemas refractores líquidos, es decir, lentes líquidas.

Estos sistemas ópticos son cápsulas de algún líquido inmerso en un campo eléctrico que permiten cambiar de radio de curvatura y, por lo tanto, de distancia focal. Estos nuevos elementos inician la carrera en el diseño de sistemas complejos que puedan ser incorporados a un instrumento para observación astronómica.²⁰



Figura 2.6 Lentes líquidas deformables mediante campos eléctricos a) con voltaje b) sin voltaje

La idea de hacer declaradamente combinaciones entre electrónica y óptica no es nueva, pues existe una gran tendencia hacia la combinación de estas disciplinas. En la actualidad, la gran demanda que hay de cámaras digitales en teléfonos celulares ha conducido a los diseñadores a usar el mínimo número de lentes con la finalidad de ocupar el menor espacio posible.

2.2 El telescopio

Un telescopio es un instrumento óptico que capta cierta cantidad de luz y la concentra en un punto. La cantidad de luz captada por el instrumento depende fundamentalmente de la apertura del mismo (el diámetro del objetivo). Para visualizar las imágenes se utilizan los oculares, los cuales se disponen en el punto donde la luz es concentrada por el objetivo (plano focal). Son estos los que proporcionan la ampliación al telescopio. La idea principal en un telescopio astronómico es la captación de la mayor cantidad de luz posible, necesaria para poder observar objetos de bajo brillo.



Figura 2.7 Telescopio reflector newtoniano

En la figura 2.7 se muestran las principales partes de un típico telescopio reflector newtoniano con montura ecuatorial alemana.¹⁵

Los telescopios se dividen en dos tipos según el tipo de objetivo que utilizan: los reflectores y los refractores. El componente óptico principal de un telescopio, si es refractor se conoce como objetivo o si es reflector como espejo primario, en estos últimos, el espejo más pequeño que hace converger la luz, se conoce como diagonal o simplemente como espejo secundario.

Los reflectores se constituyen de un espejo principal (espejo primario u objetivo), el cual no es plano como los espejos convencionales, sino que fue provisto de cierta curvatura (parabólica) que le permite concentrar la luz en un punto. Aunque existen muchos tipos de telescopios reflectores, el más común es el Newtoniano, inventado por el físico Inglés, Sir Isaac Newton.¹⁸

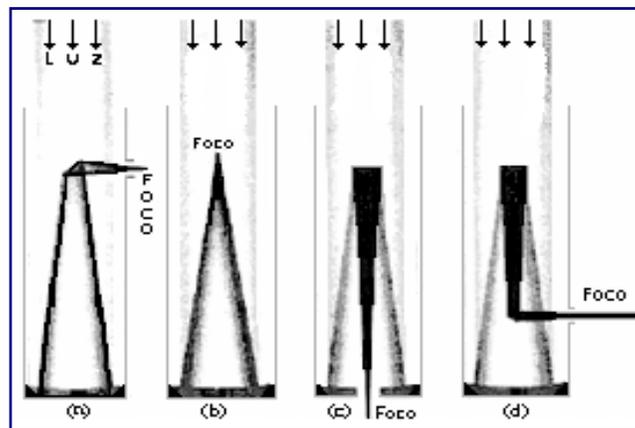


Figura 2.8 Telescopios Reflectores: Cuatro de los más populares diseños ópticos.
a) Foco Newtoniano b) Foco primario c) Foco Cassegrain y d) Foco Coude

El espejo primario (objetivo) está especialmente diseñado para reflejar la mayor cantidad de luz posible. A través del proceso de aluminización una fina película de aluminio es depositada sobre la superficie del objetivo. A este tipo de espejos es posible brindarles diferentes curvaturas para responder a distintas necesidades. La curvatura influye en la distancia focal, la distancia entre el objetivo y el plano focal.

El telescopio reflector es el más utilizado por los astrónomos profesionales, dado que es posible construir y dar forma a espejos de grandes dimensiones, no sucede así con los refractores, donde el peso de la lente objetivo se vuelve excesivo y la dificultad de producir una lente de calidad de tales dimensiones es casi imposible y altamente costoso.

Existen dentro de los reflectores varios diseños de telescopios. Los más conocidos y populares entre los aficionados son el reflector Newtoniano y el reflector Schmidt-Cassegrain.³⁷ La principal diferencia radica en la configuración óptica. El reflector Newtoniano dispone de dos espejos, el primario (parabólico) y el secundario (más pequeño y plano), mientras que los Schmidt-Cassegrain poseen un espejo primario también parabólico, pero con una perforación en su centro, para recibir la luz proveniente del espejo secundario, el cual es convexo. Muchos también poseen una placa correctora en la entrada de luz del telescopio.

Los diseños Newtonianos son más económicos que los Schmidt-Cassegrain, pero se vuelven muy voluminosos al aumentar el diámetro del objetivo. A mayor diámetro la distancia focal aumenta. La ventaja de los Schmidt-Cassegrain es que su diseño es más compacto, pudiendo tener distancias focales muy grandes en tamaños reducidos.³⁷

Los telescopios refractores poseen como objetivo una lente (o serie de lentes) que de forma análoga al funcionamiento de una lupa, concentran la luz en el plano focal.

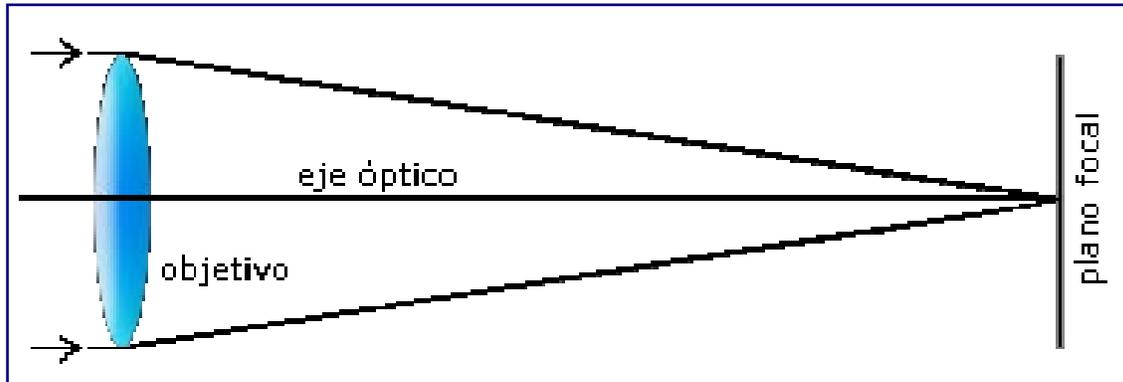


Figura 2.9 Diagrama del funcionamiento de un telescopio refractor de diseño Kepleriano.

En la figura 2.9 se puede ver el funcionamiento simplificado de un típico telescopio refractor de diseño Kepleriano. Este es un sistema muy simple donde los rayos convergen en el plano focal y es ahí donde se dispone el correspondiente ocular para ampliar la imagen. Los rayos de los extremos del objetivo son los que sufren la mayor refracción, mientras que en el eje óptico (o eje de simetría), la luz no es desviada.¹⁵

A su vez, los telescopios refractores se dividen en distintos tipos (ver figura 2.10)⁴.

Una de las ventajas de los telescopios refractores sobre los reflectores es que carecen de obstrucción central (debida al espejo secundario, el cual le "hace sombra" al primario) Esto hace que las imágenes sean más nítidas, y eso se vuelve especialmente adecuado para la observación planetaria y lunar, donde los detalles más finos son los más apreciados. Pero tienen la desventaja de que al querer construir y dar forma a espejos de grandes dimensiones, el peso de la lente objetivo se vuelve excesivo y la dificultad de producir una lente de calidad de tales dimensiones es casi imposible y altamente costoso.

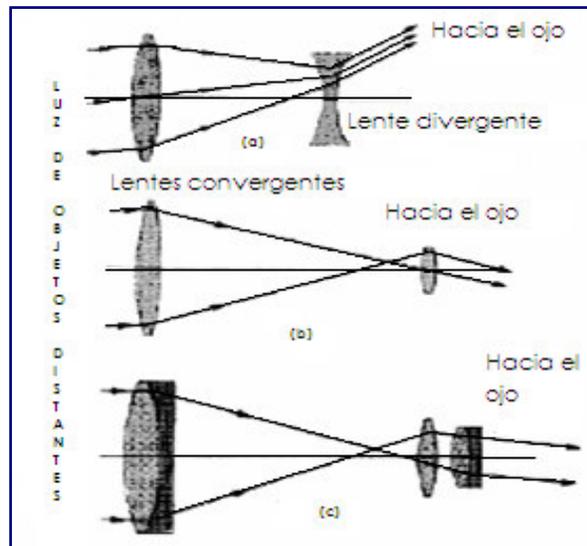


Figura 2.10 Arreglos de lentes de los telescopios refractores. a) convergente-divergente, b) convergente-convergente, c)refractor astronómico moderno.

2.3 Conceptos importantes

Además de lo anterior, para comprender el comportamiento de un telescopio y del interferómetro de motas propuesto en este trabajo, es necesario conocer ciertos conceptos.

Apertura

La apertura de un telescopio es el diámetro del haz de luz que entra en él. Que eventualmente llega el punto de observación (foco). La apertura es normalmente del mismo diámetro que el objetivo o espejo primario del telescopio.⁴

Distancia focal

La distancia focal es distancia comprendida entre el objetivo del telescopio (sea un reflector o refractor) y el plano focal del mismo. Esta medida varía según el diámetro del objetivo y del diseño del mismo (la curvatura del espejo, por ejemplo) Este dato esta siempre presente en los telescopios, incluso impreso sobre los mismos dado que es fundamental para determinar muchas características adicionales del equipo. La medida se suele dar en milímetros y sirve para calcular cosas como el aumento, la razón focal, etc.⁴

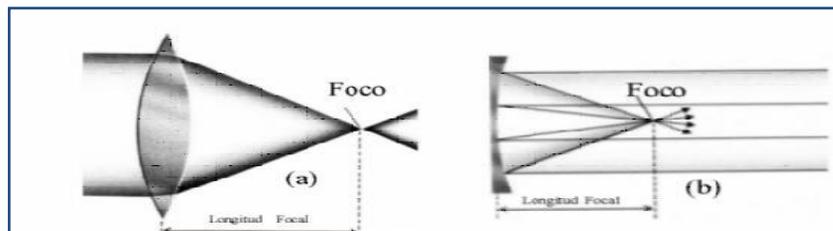


Figura 2.11 Diagrama de la distancia focal. a) en un lente cóncavo, b) en un lente convexo.

Razón focal

La razón focal (o F/D) es un índice de cuán luminoso es el telescopio. Esta medida esta relacionada con la distancia focal y el diámetro del objetivo. Cuanto más corta es la distancia focal y mayor el objetivo, más luminoso será el telescopio.

Para calcular la razón focal de un telescopio solo hay que dividir la distancia focal entre el diámetro del objetivo, todo en las mismas unidades¹⁵:

$$\frac{F}{D} = \frac{F \text{ [m m]}}{D \text{ [m m]}} \quad (2.1)$$

Por ejemplo un telescopio de 15 cm de apertura y una distancia focal de 120 cm, tiene una razón focal de 8 y su espejo es $f/8$. Este valor sin unidades representa cuán luminoso es un telescopio.

Muchas veces es llamada la "velocidad" del telescopio: se dice que es un telescopio rápido cuando su razón focal es baja (no tiene nada que ver con las características mecánicas del mismo, sino la velocidad de recolección de luz). Esto es especialmente importante en la astrofotografía, donde se pueden reducir sustancialmente los tiempos de exposición si se utilizan sistemas de F/D bajos.

Resolución

Se llama resolución o poder separador a la capacidad de un telescopio de mostrar de forma individual a dos objetos cuya imagen se ve muy próxima entre sí, usualmente llamada "límite de Dawes".¹⁵ Esta medida se da en segundos de arco y está estrechamente ligada al diámetro del objetivo, dado que a mayor diámetro mayor es el poder separador del instrumento.

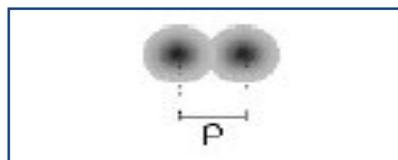
Para calcular la resolución de un telescopio se utiliza la siguiente fórmula:

$$\rho ["] = \frac{4.56}{D (pu\ lg)} \quad (2.2)$$

En donde ρ es la resolución en segundos de arco, D es la apertura (diámetro del objetivo o espejo primario del telescopio) en pulgadas, y 4.56 es una constante. Hay que notar que el resultado del cálculo es totalmente teórico, dado que el poder separador de cualquier instrumento instalado sobre la superficie terrestre está severamente influenciado por la atmósfera. Así, un telescopio de 114 mm de diámetro (4.5 pulgadas), posee una resolución teórica de aproximadamente 1 segundo de arco, pero en la práctica esta se ve disminuida muchas veces a más de la mitad.

Cuando se habla de que un telescopio tiene una resolución de 1 segundo de arco se está refiriendo a que esa es la mínima separación que deben poseer dos objetos puntuales para ser observados de forma individual. Hay que destacar que no depende de la ampliación utilizada, o sea que no se aumenta la resolución por utilizar mayores aumentos, un instrumento posee cierto poder separador intrínseco definido por las características técnicas que lo componen¹⁵.

Otra forma de calcular la resolución (ρ) en radianes es utilizando la fórmula 2.3.



$$\rho [rad] = 1.22 \frac{\lambda}{D [m]} \quad (2.3)$$

Donde λ es la longitud de onda en la que se realiza la observación.

Magnificación o Aumentos

Los aumentos o ampliación no son la cantidad de veces que más grande se observa un objeto, como suele creerse, sino que se refiere a como sería observado si nos ubicásemos a una distancia "tantas veces" más cercana al objeto¹⁵.

Por ejemplo: si se observa a la Luna con 36 aumentos (36x, nombrado 36 "por") y se sabe que esta se localiza a unos 384.000 kilómetros de distancia, aparecerá tal cual sería observada desde solo 10.666 kilómetros. Esto se calcula dividiendo la distancia por la ampliación utilizada.

Para saber cuántos aumentos se están utilizando debe conocerse la distancia focal del telescopio y la distancia focal del ocular dispuesto, dado que son estos últimos los que proveen de la ampliación a cualquier telescopio. A menor distancia focal, mayor será la ampliación utilizada. Para calcular los aumentos implementados debe dividirse la distancia focal del telescopio por la distancia focal del ocular¹⁵:

$$A = \frac{F_t [m m]}{F_o [m m]} \quad (2.4)$$

Donde A son los aumentos, F_t la focal del telescopio y F_o la focal del ocular. Por ejemplo: si se utiliza un telescopio de 910 mm de focal, con un ocular típico de 25 mm, la ampliación es de 36.4x.

La elección de los aumentos con los cuales operar en el curso de las observaciones astronómicas es esencial para el buen éxito de éstas. Si se dirige la atención sobre objetos nebulares y difusos, como las nebulosas, los cúmulos de estrellas, las lejanas galaxias, es preferible elegir aumentos medio-bajos que aseguran una mayor luminosidad; para las observaciones lunares y planetarias es posible trabajar con los máximos aumentos.

La elección del aumento está condicionada también por las condiciones ambientales del lugar de observación. Una atmósfera transparente y límpida, y un cielo oscuro, permiten la gama más amplia de observaciones y el mejor aprovechamiento de la potencia del telescopio. Con un cielo turbulento, perturbado por iluminaciones ciudadanas, también la elección de la magnificación está limitada a los valores medio-bajos.¹⁷

Pero existe un límite para los aumentos en un telescopio, el cual está dado por el diámetro del objetivo, a mayor diámetro mayor será la posibilidad de utilizar grandes ampliaciones. Si se sobrepasa el límite recomendado se hace imposible obtener imágenes nítidas y aparece la llamada "mancha de difracción", una aberración óptica producto del exceso de aumentos.

Magnificación límite

Esta característica está íntimamente ligada al diámetro del objetivo, a mayor diámetro mayor será el poder concentrador de luz el cual permitirá observar objetos más débiles. Para calcularla se emplea la siguiente fórmula¹⁵:

$$M_{\text{límite}} = 7.5 + 5 \cdot \log D [cm] \quad (2.5)$$

Donde $M_{\text{LÍMITE}}$ es la magnificación límite, y D es el diámetro del objetivo en cm.

Hay que notar que el dato obtenido esta dado para magnitudes estelares (objetos puntuales) y no para objetos con superficie como galaxias, nebulosas, cúmulos globulares, etc, dado que en los catálogos el dato que aparece como magnificación está referido a la magnificación integrada del objeto, pero como posee superficie esta se distribuye en ella. Por eso, aunque una galaxia posea magnificación 10 probablemente no será observable porque su brillo se distribuye sobre su superficie. El cálculo es válido para estrellas, asteroides y ese tipo de objetos puntuales (también con planetas lejanos como Urano y Neptuno)¹⁵.

Las condiciones atmosféricas y de polución lumínica así como la agudeza visual del observador cambian sustancialmente la magnificación visual límite observable.

Oculares

Los astrónomos usan combinaciones de lentes para examinar la imagen que se forma en los telescopios. Estos lentes, son acoplados en elementos metálicos, y se denominan oculares.

El ocular es la parte del telescopio que transforma los rayos de luz concentrados, en imágenes visibles para el ojo humano. La distancia focal (distancia media entre el objetivo y el foco) del ocular es el factor que nos permite conocer el aumento del sistema óptico. A mayor longitud focal, menor aumento se conseguirá y viceversa.

Los oculares son intercambiables, según las necesidades del observador. Los telescopios modernos que se usan con fines de investigación no utilizan oculares simples, sino que son arreglos muy complejos de lentes, electrónica y piezas mecánicas, que por lo general ya no se denominan oculares, sino: espectógrafos, fotómetros, cámaras CCD (Charge Coupled Device), etc. Este tipo de instrumentos tienen relaciones muy concretas de distancias focales⁴.



Figura 2.12 a) oculares comerciales para telescopios pequeños, b) equipo CCD.

Campo visual

Se denomina campo visual al tamaño de la porción de cielo observado a través del telescopio con cierto ocular y trabajando bajo cierta ampliación. Para calcularlo se deben conocer los aumentos provistos con el ocular utilizado y también el campo visual del ocular (un dato técnico que depende del tipo de ocular y es provisto por el fabricante)¹⁵.

Por ejemplo: si se utiliza un ocular de la marca Plössl de 25 mm, el cual posee unos 50 grados de campo en un telescopio de 910 mm de distancia focal la ampliación es de unos 36x. Para calcular el campo visual se divide el campo aparente del ocular (50 grados en este caso) por la ampliación utilizada (36x), obteniéndose un campo real de unos 1.38 grados. Así se puede deducir que en esa configuración se podría observar perfectamente la Luna completa (que como promedio solo posee 0.5 grados de diámetro angular)¹⁵.

$$Cr [^\circ] = \frac{Ca [^\circ]}{A} \quad (2.6)$$

Donde **Cr** es el campo real en grados, **Ca** el campo aparente del ocular en grados y **A** es la ampliación que provee ese ocular. La formula es viable siempre y cuando no se estén utilizando multiplicadores de focal como los Barlows.

La importancia de saber con cuanto campo cuenta nuestra observación radica a la hora de seleccionar el ocular adecuado. Para observar un cúmulo abierto es conveniente utilizar oculares de campo amplio, con pocos aumentos. En observaciones planetarias o lunares algo de campo visual para obtener más ampliación es aceptable, sobre todo porque estos cuerpos son brillantes (recordar que al aumentar la ampliación se pierde algo de luz y algo de campo visual).

2.3.1 Conceptos básicos del comportamiento de la luz

La radiación electromagnética emitida por los objetos del Universo es con lo que cuentan los astrónomos para realizar sus investigaciones. Esta radiación puede ser de radio, microondas, infrarroja, luz visible, ultravioleta, rayos X o rayos gamma. Lo que diferencia a estas radiaciones entre sí es la longitud de onda (λ) de cada una de ellas. La longitud de onda es la distancia entre dos crestas consecutivas de una onda. La longitud de onda de la luz visible se encuentra entre 430 y 690 nanómetros³⁸.

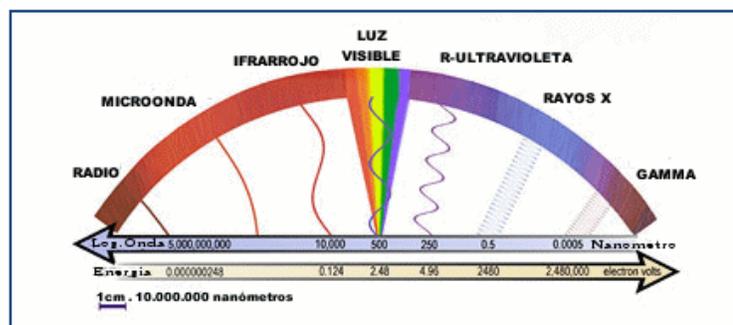


Figura 2.13 Espectro Electromagnético

A fines del siglo XVII se propusieron dos teorías para explicar la naturaleza de la luz, la teoría de las partículas (corpúscular) y la teoría ondulatoria. El principal defensor de la teoría corpúscular fue Sir Isaac Newton. La teoría ondulatoria era apoyada por Christian Huygens (1629-1695), que era un matemático y científico holandés.

De acuerdo con la teoría corpuscular, las partículas muy pequeñas, de masa insignificante, eran emitidas por fuentes luminosas tales como el sol o una llama. Estas partículas viajaban hacia fuera de la fuente en líneas rectas a enormes velocidades. Huygens, por otra parte, explicó la propagación de la luz en términos del movimiento de una perturbación a través de la distancia entre una fuente y el ojo³⁹.

Considerando a la luz como una onda electromagnética y bajo ciertas condiciones se puede suponer que viaja en línea recta; estas líneas son llamadas rayos, y de su estudio se encarga la óptica geométrica. La propagación de la luz y otros fenómenos pueden explicarse mediante un modelo geométrico conocido como principio de Huygens, el cual dice:

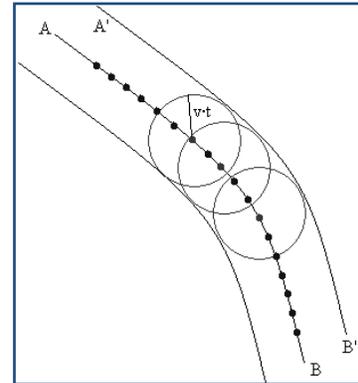


Figura 2.14 Principio de Huygens

“Todos los puntos de un frente de onda se pueden considerar como puntos fuente, que producen ondas esféricas secundarias. Después de un tiempo t , la posición del nuevo frente de onda, será la superficie tangente a estas ondas secundarias.”⁴⁰

Un frente de onda es la superficie que se genera por todos los puntos donde las ondas tienen la misma fase; los rayos son ortogonales a los frentes de onda.

Cuando una onda al propagarse encuentra un obstáculo o una abertura, cuyo tamaño es comparable a su longitud de onda, la onda experimenta un cambio de dirección, a este fenómeno se le llama difracción.

Por otro lado, cuando una onda incide sobre la superficie de separación de dos medios distintos, parte de la onda vuelve al medio inicial (reflejada) y parte se transmite al otro medio (refractada).

Cómo se muestra en la figura 2.15, los rayos se encuentran en un plano, llamado de incidencia, y en ese plano también se encuentra la normal. La normal es una línea imaginaria que es perpendicular a la superficie y pasa por el punto de incidencia, o el punto donde cae el rayo⁴¹.

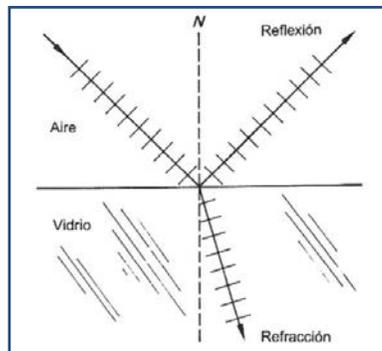


Figura 2.15 Cuando la luz incide en el plano de incidencia o frontera entre dos medios, puede reflejarse, refractarse o absorberse.

La relación entre los ángulos de incidencia, el de reflexión y el de refracción es la siguiente:

$$\theta_1 = \theta' \quad \text{reflexión} \quad (2.7)$$

$$n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2 \quad \text{refracción} \quad (2.8)$$

Donde n_1 es el índice de refracción del medio 1 respecto al vacío y n_2 es el índice de refracción del medio 2 respecto al vacío. La ecuación 2.8 se conoce como Ley de Snell.

Mediante el principio de Huygens se puede explicar el fenómeno de refracción. Los frentes de onda viajan a una velocidad V_1 en el aire y la luz tiene una longitud de onda λ_1 , en el vidrio viajan a una velocidad V_2 y tiene una longitud de onda λ_2 .

La figura 2.16 muestra un ejemplo de esto; cuando las ondas planas golpean la superficie del agua con cierto ángulo, los puntos A, C y E se vuelven las fuentes de nuevas ondas pequeñas. El frente de onda de estas pequeñas ondas secundarias indica un cambio en la dirección.⁴¹ Se puede elaborar una construcción similar para explicar la reflexión.

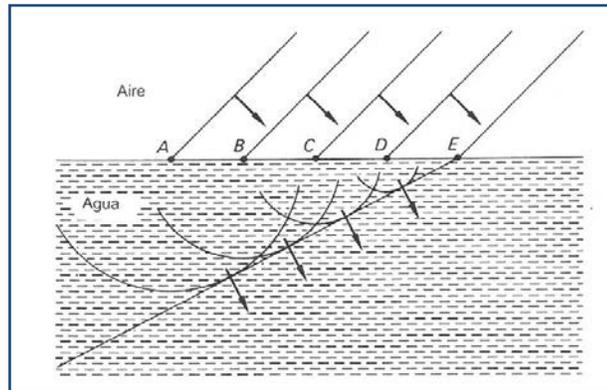


Figura 2.16 Explicación de Huygens acerca de la refracción en términos de la teoría ondulatoria

Un modelo para determinar la difracción producida al pasar la luz por una abertura circular fue ideado por George Biddell Airy. Para describir este patrón de difracción Airy empleó la irradiancia. La irradiancia es la potencia promedio por unidad de área que cruza una superficie.

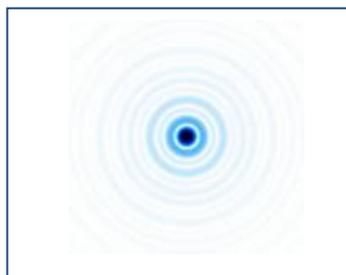


Figura 2.17 Disco de Airy

El disco formado dentro del primer anillo oscuro recibe el nombre de disco de Airy. Su radio se conoce mediante:

$$r = 1.22 \frac{f \lambda}{D} \quad (2.9)$$

Donde:

r es el radio del disco [m]

f es la distancia entre el plano del agujero y el plano de observación [m]

λ es la longitud de onda [nm]

D es el diámetro del agujero [m]

Para fines prácticos se considera la longitud de onda de la luz amarilla (550nm) y el resultado se obtiene en segundos de arco.

En la expresión 2.9 se observa que al aumentar el diámetro disminuye la distancia angular del disco de Airy, con lo que la resolución mejora al aumentar la apertura del telescopio⁴¹.

Longitud de onda

La longitud de onda es la distancia entre dos crestas de ondas luminosas, electromagnéticas o similares. A menor longitud, mayor frecuencia. Su estudio aporta muchos datos sobre el espacio.

Frente de onda

Se denomina frente de onda al lugar geométrico en que los puntos del medio son alcanzados en un mismo instante por una determinada onda.

Difracción

La difracción es el fenómeno del movimiento ondulatorio en el que una onda de cualquier tipo se extiende después de pasar junto al borde de un objeto sólido o atravesar una rendija estrecha, en lugar de seguir avanzando en línea recta.

La difracción sólo se observa si el obstáculo que encuentran las ondas es del mismo orden que la longitud de onda del movimiento ya que cuando es mayor, las ondas siguen con una propagación rectilínea. La expansión de la luz por la difracción produce una borrosidad que limita la capacidad de aumento útil del telescopio.⁴

Luz coherente

En la luz coherente se basa en la coherencia que es la propiedad de las ondas electromagnéticas que están en fase tanto en el tiempo como en el espacio. La luz coherente tiene Monocromaticidad y pequeña divergencia del haz, y se puede concentrar a elevadas densidades de potencia.⁴

Efecto de la distorsión de la luz al pasar por la atmósfera

Cuando una onda plana pasa a través de la atmósfera, esta sufre una fluctuación de fase y llega a la entrada de la pupila del telescopio con ajustes aleatorios en el desplazamiento de la fase.

Debido a las fluctuaciones del movimiento y la temperatura en el aire que está sobre la apertura del telescopio se desarrolla un conjunto de heterogeneidades, las cuales tienen el efecto de romper la apertura en celdas con diferentes valores de índice de refracción que son movidos por el viento en la apertura del telescopio. Si la atmósfera es congelada en una imagen en un momento específico, cada parte de la onda actuará de manera independiente del resto, resultando en muchos puntos brillantes. Estos puntos son conocidos como motas y están esparcidos sobre el área definida por la imagen de larga exposición.¹³

Motas

El término motas se refiere a la estructura granular que se observa cuando la superficie irregular de un objeto es iluminada por una fuente de luz coherente. Un ejemplo del fenómeno de motas se puede observar en una alberca cuando muchos nadadores están en ella. Cada nadador emite ondas y la interferencia aleatoria entre ellas causa un campo de ondas salpicadas de manchas en la superficie del agua. Dependiendo de la aleatoriedad de la fuente, espacial o temporalmente las motas tienden a aparecer. El moteado espacial puede observarse cuando todas las fuentes vibran a la misma frecuencia constante pero con diferente amplitud y fase, mientras que el moteado temporal se produce si todas las fuentes son uniformes en amplitud y fase. Con un espectro de vibración no monocromático, en el caso de las fuentes de luz aleatorias, se produce un moteado espacio-temporal.⁹

El número de motas obtenidas depende del tamaño del telescopio y de la distorsión del haz debido a la atmósfera.

La iluminación terrestre producida por cualquier estrella tiene motas fluctuantes, conocidas como motas estelares. Estas son muy rápidas y pálidas, por lo que no pueden ser observadas directamente. Las motas producidas por la atmósfera pueden ser observadas fácilmente en la imagen de una estrella tomada por el foco de un telescopio largo utilizando un lente sólido. La imagen de la estrella parece un sartén con agua hirviendo. Si una imagen de corta exposición es tomada, las motas pueden ser grabadas. El tamaño de las motas está en el mismo orden de magnitud que el disco de Airy del telescopio en ausencia de turbulencia.¹³

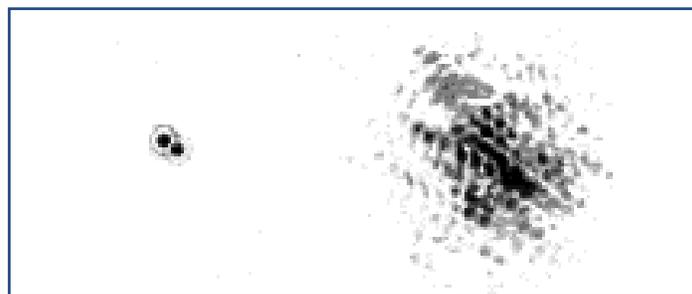


Figura 2.18 Estrella doble: Izquierda, sin atmósfera; derecha, a través de la atmósfera con $D/r_0 = 10$.

2.3.2 Estrellas asociadas por gravedad

La mayoría de las estrellas en el Universo no están solas. Muchas de ellas aparecen juntas, formando parejas o pequeños grupos, a las que se les llama estrellas dobles o múltiples. Algunas no son más que el resultado de la proyección en la misma región del espacio de dos estrellas que se encuentran a distancias claramente diferentes, y entre las que no puede existir ninguna ligadura gravitatoria: son las *dobles ópticas*.

Las dobles ópticas, por ser simples alineaciones, dependen de la situación del observador. Durante mucho tiempo se pensó que todas las estrellas dobles eran de esta clase, pero a medida que se progresó en la catalogación del cielo, la abundancia de las estrellas dobles se hizo tan anormalmente grande, que la explicación de meras proyecciones se volvió insostenible⁴².

A mediados del siglo XVIII ya había astrónomos que discrepaban. Finalmente las primeras medidas cuidadosas de William Herschell en 1779 pusieron definitivamente en manifiesto que existían verdaderos sistemas físicos, que suelen ser las dobles más difíciles de observar. Herschell comprobó que las componentes secundarias de algunos de estos sistemas describían pequeñas elipses en torno a las luminosas primarias, hecho que irrefutablemente demostraba que existía una conexión verdadera entre ambas. Cuanto más próximas se encuentran las componentes, tanto más probable es que formen un sistema físico.

Hoy se sabe que más de la mitad de las estrellas conocidas se encuentran formando grupos ligados por la gravedad mutua; se les llama *dobles físicas*. La mayor parte de ellas son sistemas que con sólo técnicas muy elaboradas e instrumentos de gran diámetro se consigue resolver, y esto sólo en los casos más cercanos. La mayor profundidad en el estudio del firmamento ha cambiado las apariencias una vez más: se ha pasado de considerar habituales a las estrellas aisladas a considerarlas excepcionales.

Muchas órbitas requieren cientos de años (Mizar¹), o muchos miles (Epsilon Lyrae¹), para completarse, mientras otras duran apenas unas horas (U Geminorum¹). Consecuentemente, las distancias de separación a veces son tan pequeñas que se desarrolla una envoltura común al sistema y la materia se escapa por el plano ecuatorial formando espirales (Beta Lyrae¹), que se pierden en el espacio. En tales casos la proximidad causa importantes deformaciones en las estrellas componentes por fuerzas de marea. Y existen sistemas binarios aún más extraños, formados por estrellas muy compactas que absorben gas de estrellas normales y que a veces estallan o deflagran de un modo cataclísmico (RS Ophiuchi¹). Otros curiosos casos incluyen estrellas neutrónicas (SS433¹), inmensas nubes oscuras en torno a sistemas neutrónicos (Epsilon Aurigae¹), o agujeros negros (CygnusX-1¹).

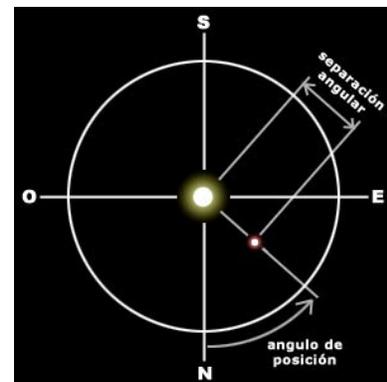


Figura 2.19 Medidas utilizadas para caracterizar un sistema de estrellas dobles.

¹ Nombres de Estrellas o Sistemas de Estrellas conocidos.

El estudio de estrellas dobles a través de telescopios fue una tarea muy importante hasta principios del siglo XX. Se pueden caracterizar a las componentes del sistema mediante dos medidas:

- La separación angular entre ellas, generalmente expresada en segundos de arco.
- El ángulo de posición, que es el ángulo en grados que forma la línea de unión entre la componente primaria del sistema y la menor que se considera (radio vector), respecto de la dirección del Polo Norte Celeste girando en sentido Norte-Este-Sur-Oeste.

Con estas medidas se puede reproducir la órbita y calcular sus elementos definitorios, y finalmente, gracias a las leyes de Kepler, se puede averiguar las masas de las componentes, siempre que la distancia del sistema sea conocida. Cuando sea posible seguir total o parcialmente las evoluciones con telescopios, y así reconstruirse la órbita, nuestra doble se llamará *binaria visual*.⁴³



Figura 2.20 Principio de la Espectrografía.

Se han encontrado otros medios muy ingeniosos para determinar la duplicidad de una estrella aparentemente única. El método quizás más importante es el análisis de su luz mediante un dispositivo de dispersión, aparato que según el dispositivo de detección final se llama espectrómetro, espectrofotómetro, espectrógrafo o espectroscopio.

Cuando la luz blanca pasa a través de un prisma de cristal, se forma una franja coloreada, exactamente como el arco iris, cuyo fundamento final es el mismo: en ese caso, las gotitas de lluvia actúan de prisma diminuto. El nombre de esa franja coloreada es "espectro" porque aparecen colores donde aparentemente no había nada más que luz blanca.⁴³

Curiosamente, cuando la luz de las estrellas es dispersada en sus colores fundamentales no se ve tan sólo la franja coloreada: aparece surcada por una serie de líneas brillantes y oscuras que no se ven en la luz procedente de una bombilla de incandescencia.

Estas líneas son características de cada elemento y especie compleja química, y nos permiten averiguar la composición, temperatura, densidad y otras características. Las líneas aparecen siempre en una disposición característica, y en el laboratorio ocupan posiciones fijas respecto a los colores de fondo. Sin embargo, cuando en lugar de una fuente de luz inmóvil se tiene a una en movimiento, las cosas cambian, ya que conforme la estrella, se aleja de nosotros, las rayas espectrales se desplazan de sus posiciones habituales hacia el color rojo, mientras que si se acerca, se desplazan en dirección contraria, hacia la zona de los tonos azulados. A este fenómeno se le llama "efecto Doppler"⁴³ en honor a su descubridor. La magnitud del desplazamiento nos permitirá medir la velocidad orbital. A estas binarias, cuya naturaleza se pone de manifiesto mediante las líneas espectrales, se las llama *binarias espectroscópicas*.

Este fenómeno no es tan extraño como parece: todos hemos experimentado este mismo fenómeno con sonido en lugar de luz, cuando oímos el silbato de un tren que se acerca.

Mientras se dirige hacia nosotros tiene un tono claramente más agudo que cuando se encuentra en reposo, para hacerse más grave cuando se aleja.

No siempre se puede evidenciar por estos procedimientos a un sistema doble o múltiple. En 1844 Bessel anunció un descubrimiento sensacional. Como se sabe, todas las estrellas orbitan en torno al corazón de la Vía Láctea, pero yacen tan lejos que este movimiento tarda en apreciarse a simple vista cientos de años, salvo excepciones. Con un telescopio es más fácil apreciarlo, al amplificar pequeñas desviaciones.

Bessel comprobó que Sirio, la estrella más brillante del cielo, se desviaba de la trayectoria prevista cíclicamente, describiendo una senoide en lugar de una línea recta. La estrella que apartaba a la brillante Sirio debía ser casi tan pesada como el Sol, pero tardó en descubrirse casi 20 años. La razón fue que la acompañante de Sirio brillaba mucho menos de lo esperado, casi quinientas veces menos que el Sol, y pertenecía a un nuevo tipo de estrella: las enanas blancas.⁴³

El método desarrollado permitió descubrir compañeros oscuros en torno a otras estrellas aparentemente únicas. A estas binarias, detectadas por el desplazamiento cíclico en torno a la trayectoria prevista se las llama *binarias astrométricas*. Sólo en ocasiones excepcionales se ha llegado a identificar directamente a la estrella secundaria en este tipo de binarias, ya que suele estar demasiado próxima y en general es muy oscura.

Muchos de estos compañeros oscuros son del tamaño de un gran planeta. Quizás cuando se disponga de grandes telescopios en órbita este método permita descubrir planetas en torno a otras estrellas.

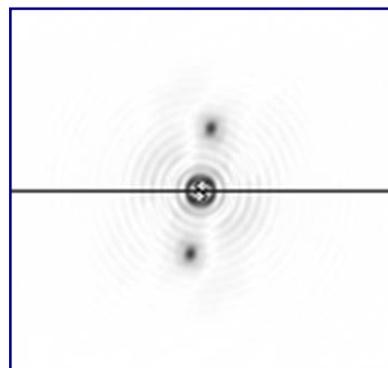


Figura 2.21 Imagen de una estrella doble tratada con interferometría de Motas

También en algunos casos, por ejemplo en Capella (la estrella más luminosa de la constelación de Auriga), ha sido detectada una estrella secundaria por anomalías en la imagen vista a través de un interferómetro (*dobles interferométricas*). Un interferómetro es un instrumento especial, en el que se hace coincidir la luz de un objeto lejano procedente de dos objetivos separados. La superposición produce una serie de franjas claras y oscuras, que permiten medir la distancia del emisor. Una imagen irregular en un interferómetro pone en evidencia a una segunda estrella invisible gracias a la mayor apertura efectiva del telescopio.⁴³

Al igual que sucede en telescopios normales, cuyo poder de resolución es proporcional al diámetro del objetivo, en un interferómetro es proporcional a la distancia entre los dos objetivos colectores de luz (a veces dos espejos, una lente partida, etc.). La imagen no parece tener nada que ver con el original, pero la información está ahí, oculta en esas franjas luminosas.

Todos los tipos de estrellas dobles que se mencionaron hacen referencia a la visión desde la Tierra o al modo de detección, pero no contemplan la verdadera naturaleza física del sistema. Una clasificación mucho más correcta y significativa es la de sistemas abiertos, y sistemas cerrados. En los *sistemas abiertos* las componentes están lo suficientemente separadas como para que no se pueda dar intercambio de materia, de modo que la vida de las estrellas transcurre igual que si estuvieran aisladas. En cambio, en los *sistemas cerrados* las evoluciones son interdependientes (esta definición es contraria a los convenios físicos usuales de intercambio de materia y energía). La transferencia de gases de una a otra estrella cambia las perspectivas evolutivas de ambas, a veces de un modo muy drástico.

Un sistema doble o múltiple puede tener diferentes orígenes. La mayor parte se producen durante el nacimiento de la estrella. Hay cuatro mecanismos principales de generación de un sistema doble o múltiple: por fragmentación de la nube protoestelar, por gemación si la nube gira demasiado rápidamente, por inestabilidades en la fase de acreción, y por consolidación simultánea de más de un foco de concentración.⁴³

2.4 El interferómetro

El Interferómetro es un instrumento que emplea la interferencia de ondas de luz para la medida ultraprecisa de longitudes de onda de la luz misma, de distancias pequeñas y de determinados fenómenos ópticos.⁴⁴

Un interferómetro trabaja bajo el principio de la interferencia que dice que cuando dos ondas con la misma fase coincidan, estas se amplificarán, mientras que si estas dos ondas tienen fases opuestas, se cancelarán, asumiendo que las dos tienen la misma amplitud. Al principio, la mayoría de los interferómetros usaron las fuentes blancas de luz (por ejemplo, experimento de la apertura doble de Young en 1805)⁸.

Prácticamente casi todos hemos estado en contacto con el fenómeno de la interferometría, por ejemplo en las distribuciones de color que resplandecen sobre una mancha de aceite en el pavimento mojado o las marcas que se ven en una pequeña película de aire encapsulada entre dos platos de cristal que están en contacto. Este último fenómeno es comúnmente conocido como "Aros de Newton", pero realmente fueron descritos por primera vez por Boyle, e independientemente, por Hook, en la segunda mitad del siglo XVII.¹² Sus observaciones pueden ser consideradas como el punto inicial de la interferometría.

Ahora se sabe que las marcas observadas por Boyle y Hooke son producidas por la interferencia de las ondas de luz reflejadas de las dos superficies de la película de aire. Sin embargo, aunque Hooke intentó explicar este fenómeno con la teoría de ondulatoria que Huygens propuso en 1690, esta no progresó debido a que oponía a la teoría de Newton.

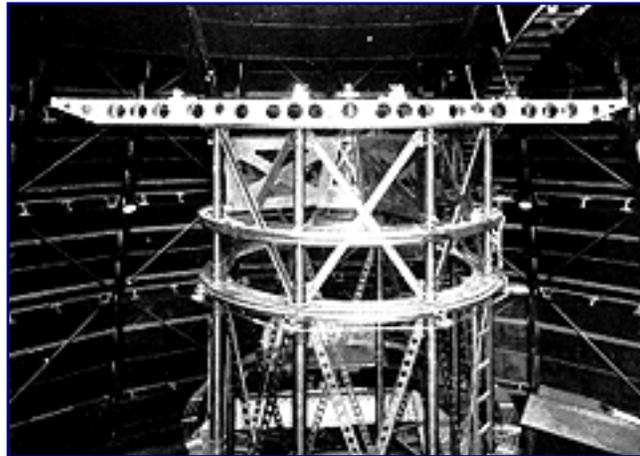


Figura 2.22 Interferómetro Hooker de 20 pies

Luego, Young, en sus conferencias de Bakerian de 1801 a 1803, fue el primero en romper con las barreras para aceptar la teoría ondulatoria de la luz, ya que en ellas expuso el principio de la interferencia y demostró que la superposición de dos rayos de luz pueden originar oscuridad (Young 1804).⁸

El punto que marcó el cambio fueron las memorias de Fresnel sobre la difracción, en 1818, donde se perfeccionaba el tratamiento de la interferencia, y el descubrimiento de Arago y Fresnel de que dos haces ortogonales y polarizados no pueden causar interferencia. Además Young y Fresnel llegaron a la conclusión de que las ondas de luz eran ondas transversales. Debido a que solo las ondas longitudinales pueden propagarse en un fluido, Fresnel postuló que las ondas de luz eran propagadas a través de un sólido elástico difundándose en toda la materia - "éter luminoso".

La mayoría de los principales físicos del siglo XIX apoyaban la teoría del éter, aunque esta originaba preguntas cuya respuesta no era obvia. Fizeau llevó a cabo un experimento en 1851 con un interferómetro, en el cual dos haces de luz atravesaban dos flujos de agua, un haz siempre se movía con la corriente mientras que el otro se movía en su contra. Este experimento, que fue repetido más tarde por Jamín y Michelson, mostró un patrón de la magnitud esperada. Con base en estos resultados Maxwell predijo en 1880 que el movimiento de la tierra a través del éter debería resultar en un cambio en la velocidad de la luz proporcional al cuadrado de la razón de la velocidad de la Tierra a la de la luz.

Mientras Maxwell pensaba que este efecto era muy pequeño para ser detectado experimentalmente, Michelson estaba seguro de que podía ser observado usando el incremento de la exactitud obtenida con el interferómetro. Esto dio origen en 1881 al famoso experimento de Michelson, el cual fue diseñado para demostrar el "flujo del éter", pero la nula obtención de resultados, provocó el rechazo del concepto de un éter [Shankland, 1973].²⁰

Mientras tanto, con motivaciones muy diferentes e independientes, Albert Einstein (1879-1955), nacido en Ulm, Alemania, elaboró su *teoría de la relatividad especial*, que postulaba que la velocidad de la luz era siempre exactamente la misma en el vacío,

independientemente de las velocidades relativas de la fuente luminosa y del observador. Esta teoría hacía completamente innecesaria la hipótesis de la existencia del éter.

Albert Michelson hizo una gran multitud de experimentos meteorológicos, que sin lugar a dudas lo hacen merecedor del nombre de padre de la interferometría. Otro de sus trabajos importantes fue la medición de longitudes por medio de interferómetros, superando la precisión de cualquier medida efectuada hasta entonces. Michelson recibió el premio Nobel de física por sus trabajos interferométricos de precisión, en 1901.⁴⁴

Hoy día, investigadores usan a menudo las fuentes monocromáticas de luz como el láser, e incluso las ondas de la materia pueden explotarse para construir el interferómetro. Uno de los primeros ejemplos de interferómetros de la materia fue el interferómetro de electrones, después seguidos por el interferómetro de neutrones.

Por décadas, muchos tipos de interferómetros han sido diseñados para satisfacer la variedad de requerimientos. Entre ellos encontramos a los siguientes⁸:

Interferómetro de Newton

El original y más simple interferómetro es el Interferómetro de Newton, donde la superficie de prueba y de referencia están en contacto. El patrón franjas característico de la interferometría se forma por la delgada capa de aire que queda entre la superficie de prueba y la de referencia, y las franjas son generalmente visibles a simple vista. Este método ha sido usado por ópticos por al menos un siglo y se siguen usando hasta ahora.

Una de las principales desventajas del interferómetro de Newton es la posibilidad de rayar las superficies cuando están en contacto. Además, las superficies de prueba son solo útiles para verificar la calidad de superficies individuales. No es posible verificar la calidad de todo el sistema de un telescopio con el interferómetro de Newton.

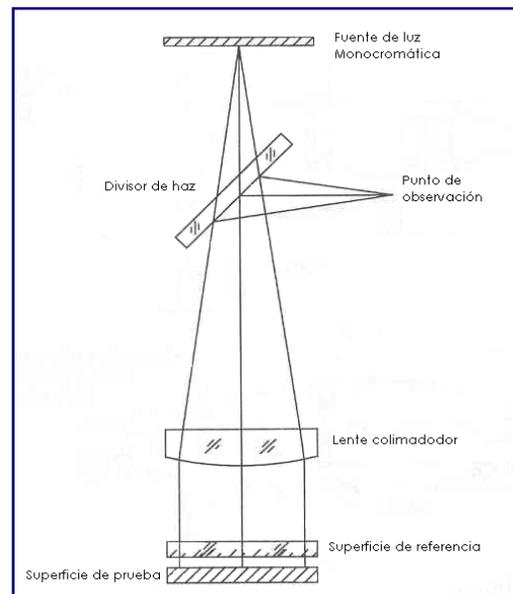


Figura 2.23 Diagrama del interferómetro de Newton

Interferómetro de Michelson

Este interferómetro está construido por una fuente monocromática (emitiendo luz u ondas de la materia), un detector, dos espejos y un espejo semitransparente (a menudo llamado divisor de haz). Éstos se reúnen como se muestra en la figura 2.24.

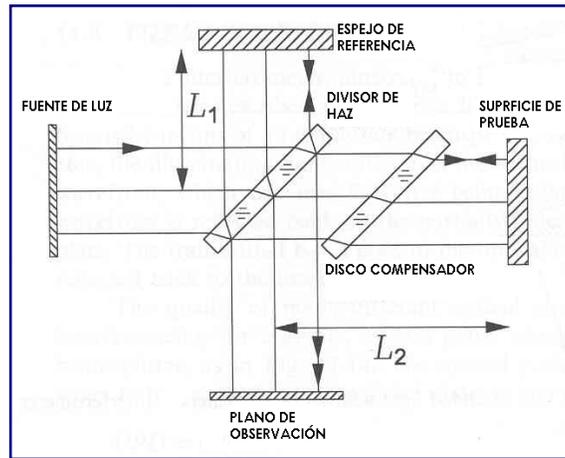


Figura 2.24 Interferómetro de Michelson

El haz de luz recorre dos caminos desde la fuente hasta el detector. Un haz se refleja del espejo semi-transparente, va al espejo superior, entonces se refleja, y pasa por el espejo y llega al detector. El otro, primero pasa por el espejo semi-transparente, luego al espejo derecho, se refleja al espejo semi-transparente, y entonces se refleja al detector.¹²

El efecto de la interferencia es alterar la porción de la luz reflejada que se dirige hacia el detector y el resto que van en dirección de la fuente.

El arreglo del interferómetro mostrado se usó en el experimento de Michelson-Morley, con lo que mantuvo la evidencia la relatividad espacial. En tiempos de Michelson, el patrón de la interferencia se obtuvo usando una lámpara de descarga de gas, un filtro, y una hendidura delgada o agujero de alfiler. En una versión del experimento de Michelson-Morley, ellos pusieron a funcionar el interferómetro incluso sin la luz de las estrellas. La luz de las estrellas es luz incoherente, pero dado que es una fuente puntual se producirá un patrón de interferencia.

Interferómetro de Twyman-Green

Otro campo de aplicación del interferómetro fue abierto por Twyman en 1916, cuando él utilizó una modificación del interferómetro de Michelson para probar componentes ópticos. En este, la luz monocromática es colimada por lentes y luego es separada en dos utilizando un divisor de haz para formar un haz de referencia y uno de prueba. Las franjas son visibles en el foco de imagen de los lentes.

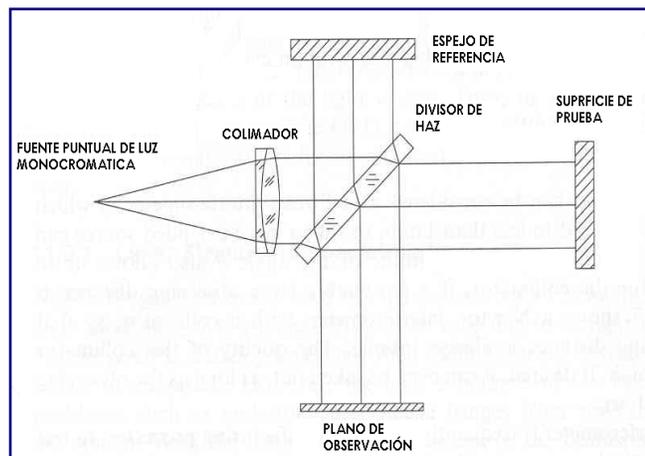


Figura 2.25 Interferómetro de Twyman-Green

El interferómetro de Twyman-Green es capaz de producir patrones sin necesidad de tener contacto entre las superficies de prueba y de referencia⁸.

Interferómetro de Fizeau

Si las franjas del interferómetro de Newton son vistas desde una distancia corta, estas se distorsionan. Para una máxima exactitud, la luz monocromática debe chocar en la superficie con una incidencia normal o perpendicular, lo que significa que el frente de onda de la luz debe tener casi la misma forma que la de los ópticos que están siendo probados. En el caso de las superficies de prueba, el frente de onda de la luz debe ser plano. Los lentes en el Interferómetro de Fizeau coliman los rayos de luz que divergen de la fuente, causando que choquen en los planos con el ángulo correcto.

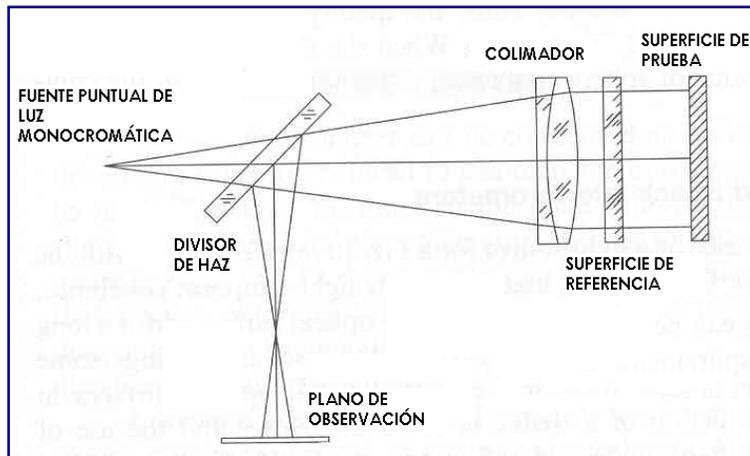


Figura 2.26 Interferómetro de Fizeau

Las franjas en el interferómetro de Fizeau pueden ser observados en el foco del colimador. Esta posición de vista asegura que el ojo (o cámara) está viendo adecuadamente la luz colimada, eliminando la posibilidad de distorsión causada por una incorrecta distancia de visualización.⁶

Interferómetro de Mach-Zehnder

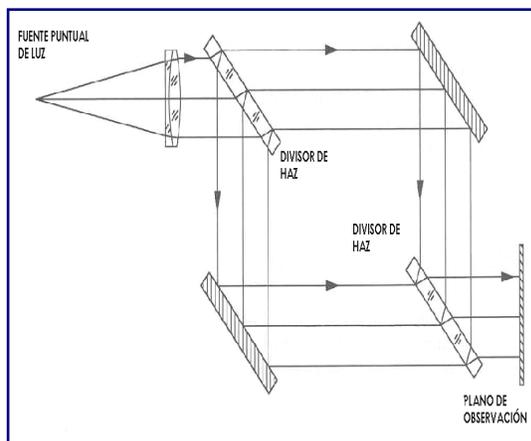


Figura 2.27 Interferómetro de Mach-Zehnder

La configuración del interferómetro de Mach-Zehnder consiste en dos divisores de haz y dos espejos completamente reflectivos. El haz de luz que viene de la fuente es dividido y las dos ondas resultantes viajan por caminos separados. Una inclinación ligera de uno de los divisores de haz producirá una diferencia en su camino y por lo tanto un cambio en el patrón de interferencia. El interferómetro de Mach-Zehnder puede ser muy difícil de alinear, sin embargo esta sensibilidad se agrega a sus numerosas aplicaciones. El interferómetro de Mach-Zehnder puede ser la base de una amplia variedad de dispositivos, como los sensores o los interruptores ópticos.¹²

Interferómetro de Sagnac

Un interferómetro de Sagnac es una configuración interferométrica en la que un haz de luz es dividido y los dos haces resultantes siguen una trayectoria en direcciones opuestas, encerrando un área al actuar como un anillo. Al retornar al punto de entrada, se le permite al haz de luz salir el aparato de tal manera que se obtiene un patrón de interferencia. Este interferómetro es muy fácil de alinear y estable.

En la configuración de Sagnac, la posición de las franjas de interferencia depende de la velocidad angular del arreglo. Esta dependencia se causa porque la rotación efectiva acorta la distancia entre camino de un haz, mientras alarga el otro. Un interferómetro de Sagnac fue utilizado por Alberto Michelson y Henry Gale para determinar la velocidad angular de la Tierra⁸.

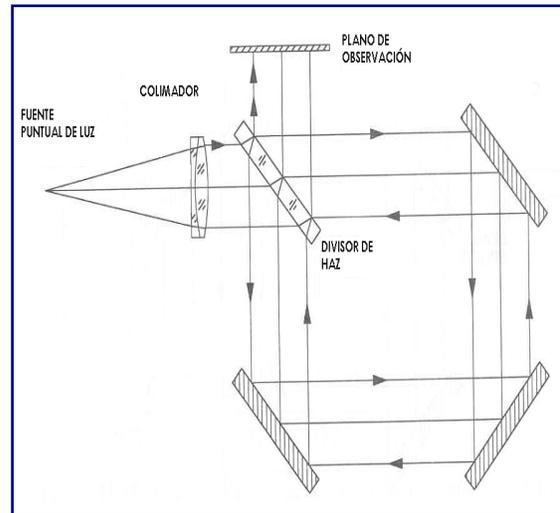


Figura 2.27 Interferómetro de Sagnac

Interferómetro de Fabry-Perot

Un interferómetro de Fabry-Pérot o el etalon es típicamente hecho de una superficie circular transparente con dos superficies reflejantes, o dos espejos paralelos altamente reflejantes. (Técnicamente el anterior es un etalon y el último es un interferómetro, pero la terminología se usa a menudo indistintamente.) Su espectro de transmisión como una función de las crestas de la longitud de onda de larga transmisión, corresponde a la resonancia del etalon. Nombrado así después de Charles Fabry y Alfred Pérot.

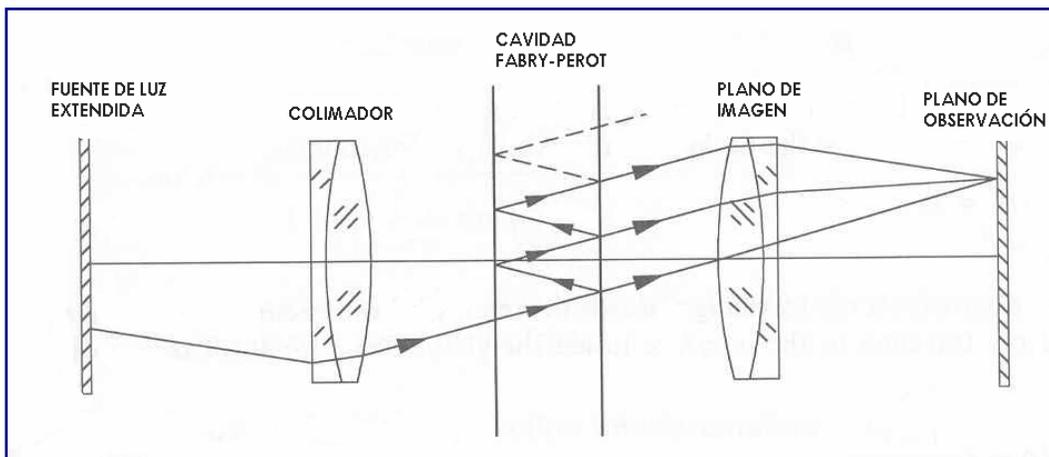


Figura 2.28 Interferómetro de Fabry-Perot

Los interferómetros de Fabry-Pérot son utilizados ampliamente en las telecomunicaciones, láser y espectroscopía para controlar y medir la longitud de onda de luz. Los recientes adelantos en la técnica de fabricación permiten la creación de un muy preciso interferómetro de Fabry-Pérot ajustable. Los interferómetros de Fabry-Pérot también forman el tipo más común de cavidad óptica usado en la construcción del láser. ⁸

Además de los anteriores existen muchos tipos de interferómetros. Todos trabajan con los mismos principios básicos, pero la geometría es diferente para cada tipo distinto.

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se expone el marco teórico que da las bases y la metodología a seguir para el desarrollo de este tema de tesis.

3.1 La interferometría

La interferometría es la ciencia de combinar dos o más ondas de luz que se dice que interfieren entre sí. En términos de onda, el patrón de la interferencia es un estado que depende de la amplitud y fase de todas las ondas que contribuyen.⁸ Aunque el fenómeno de interferencia de ondas es muy general, existen muchas aplicaciones de la interferometría en una amplia variedad de campos, tales como la Astronomía, las fibras ópticas, la metrología óptica, los estudios de mecánica cuántica como la interferometría del neutrón, la interferometría del neutrino y la interferometría de la teoría de la secuencia.

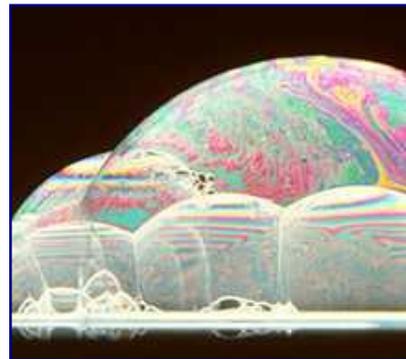


Figura 3.1 Interferencia de la luz en burbujas de jabón

Si observamos con detenimiento a las burbujas de jabón nos damos cuenta de que muestran diversos colores.

A menudo pueden verse franjas coloreadas en la superficie de las burbujas de jabón. Estas franjas se deben a la interferencia entre los rayos de luz reflejados en las dos caras de la delgada película de líquido que forma la burbuja. En una parte de la burbuja, vista desde un cierto ángulo, la interferencia puede intensificar ciertas longitudes de onda, o colores, de la luz reflejada, mientras que suprime otras longitudes de onda. El color que se ve depende de las intensidades relativas de las distintas longitudes de onda en la luz reflejada. En otras zonas, vistas desde otros ángulos, las longitudes de onda que se refuerzan o se cancelan son otras. La estructura de las franjas de colores depende del espesor de la película de líquido en los distintos puntos.⁴⁴

Este fenómeno es ejemplo de *interferencia* de luz, fenómeno que ocurre cuando dos haces de luz llegan a la misma región del espacio.

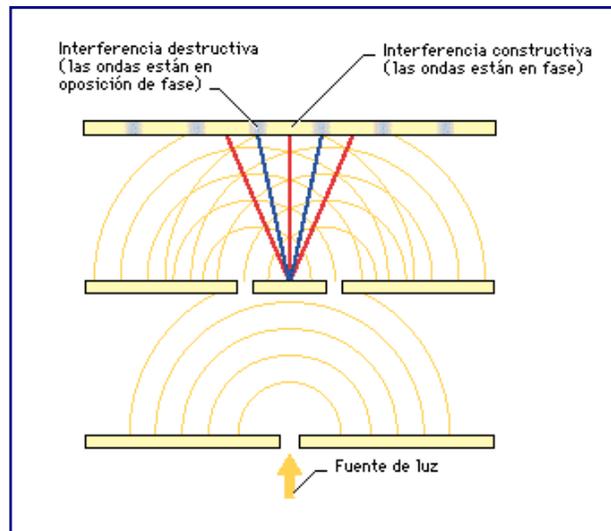


Figura 3.2 Difracción e interferencia de la luz

Difracción e interferencia de la luz

Cuando la luz pasa a través de una rendija cuyo tamaño es próximo a la longitud de onda de la luz, ésta se difracta y se produce un cambio en la forma de la onda. Cuando la luz pasa a través de dos rendijas, las ondas procedentes de una rendija interfieren con las ondas que vienen de la otra.⁴⁴ La interferencia constructiva tiene lugar cuando las ondas llegan en fase, es decir, cuando las crestas (o los valles) de una onda coinciden con las crestas (o los valles) de la otra onda, formando una onda con una cresta (o un valle) mayor. La interferencia destructiva se produce cuando las ondas llegan en oposición de fase, es decir, cuando la cresta de una onda coincide con el valle de la otra onda, cancelándose mutuamente para producir una onda más pequeña o no producir onda alguna.

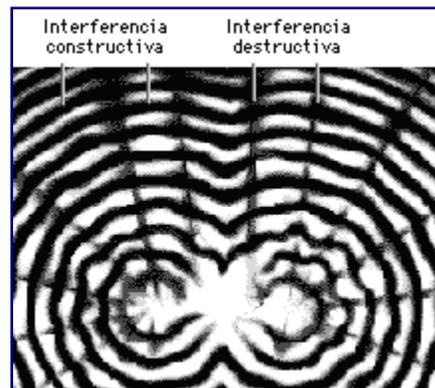


Figura 3.3 Interferencia

Se debería mantener en mente que para observar un patrón de franjas las dos fuentes necesitan no estar en fase entre ellas.

Tipos de interferometría⁸

Interferometría coherente

Este tipo de Interferometría usa una fuente de luz coherente (ver II.3.1.1) (por ejemplo, un laser de helio-neón), y puede hacer la interferencia con la diferencia grande que hay entre los retrasos en la longitud de onda del patrón del interferómetro. Con interferencia se pueden tomar medidas muy exactas (nanómetros) al recuperar la fase.

Uno de los métodos más populares de recuperación de la fase interferométrica es desfasándola con un transductor piezoeléctrico (PZT) a una fase escalón. Escalonando la longitud de la trayectoria por varias fases conocidas (mínimo tres) es posible recuperar la fase de la señal de interferencia, con $2\pi = \lambda / 2$.

La Interferometría coherente padece un problema de ambigüedad en 2π : es decir, si entre dos mediciones de la fase interferométrica salta por más de 2π , la medida de la fase es incorrecta.

Las aplicaciones de la Interferometría coherente son amplias: perfilado nanométrico de superficie, medición de esfuerzos y deformaciones mecánicas, medición de la velocidad.

Interferometría de baja coherencia

La Interferometría de baja-coherencia utiliza una fuente de luz con baja coherencia temporal como la luz blanca (por ejemplo, LED/SLD, lámpara de halógeno) o el láser de femtosegundos de alta especificación. La interferencia sólo se logrará cuando el retraso de la longitud de la trayectoria del interferómetro se empareja dentro del tiempo de coherencia de la fuente de luz.

La principal ventaja de la interferometría de baja coherencia es que no padece la ambigüedad de 2π de la interferometría coherente, y se satisface por consiguiente para perfilar pasos y superficies ásperas. La resolución axial del sistema es determinada por la longitud de coherencia de la fuente de luz y está típicamente en el rango de los micrómetros.

La tomografía de coherencia óptica es una técnica médica de procesamiento de imágenes basada en el interferómetro de baja coherencia dónde el reflejo de la luz bajo la superficie se analizadas para dar la visualización de la tomografía. En los recientes adelantos se han esforzado por combinar la recuperación de la fase nanométrico con el rango de la interferometría de baja coherencia.

Interferometría óptica astronómica

Los proyectos están empezando a usar interferómetros para buscar los planetas extrasolares, o para hacer mediciones astronómicas del movimiento recíproco de las estrella (tal y como es usado por el Palomar Testbed Interferometer y el VLTI) o a través del uso de anulaciones (como será usado por el Keck Interferometer y Darwin).

En los años noventa, se obtuvieron impresionantes resultados, al obtener con el Mark III para la medición de los diámetros de 100 estrellas y muchas posiciones estelares exactas, COAST y NPOI producen imágenes de muy alta resolución, e ISI mide las estrellas la en el

medio-infrarrojo. Los resultados adicionales incluyen mediciones directas de los tamaños de y distancias a las estrellas inconstantes Cepheid, y los cuerpos celestes jóvenes.

Los interferómetros son vistos por astrónomos como instrumentos muy especializados, capaces hacer observaciones dentro de un rango muy limitado. Se dice a menudo que un interferómetro logra el efecto de un telescopio del tamaño de la distancia entre las aberturas; esto sólo es verdad en el sentido limitado de la resolución angular. Los efectos combinados del área limitada de apertura y la turbulencia atmosférica limitan al interferómetro a observaciones de estrellas comparativamente luminosas y núcleos lácteos activos. Sin embargo, han demostrado utilidad para hacer mediciones de muy alta precisión de parámetros estelares simples como el tamaño y posición (astrometría) y para la obtención de imágenes de las estrellas gigantes más cercanas.

Interferometría de motas

En los sistemas ópticos, un patrón de motas es un patrón de campo-intensidad producido por la interferencia de haces parcialmente coherentes que están sujetos a pequeñas fluctuaciones temporales y espaciales. Este efecto de motas es normalmente observado en el campo de las fibras ópticas.

Aplicaciones astronómicas del interferómetro

En la Astronomía (como con el telescopio Keck), el radio-interferómetro se usa para combinar la luz de dos o más telescopios para obtener las mediciones con una resolución más alta que la que podría obtenerse individualmente con cualquier telescopios. Esta técnica es la base para el interferómetro astronómico, la cual presenta detalladamente un área amplia y puede producir una imagen con una resolución similar o equivalente a un solo telescopio con el diámetro del cobertor combinado de los telescopios juntos. Esto incluye las series de radio telescopios y más recientemente el interferómetro óptico astronómico como el COAST, el NPOI y el IOTA, produciéndose así las imágenes ópticas de más alta resolución ópticas logradas en la Astronomía. Se espera que pronto el interferómetro VLT produzca sus primeras imágenes en usando la síntesis de la apertura, seguido por otros interferómetros como el CHARA y el interferómetro del observatorio de Magdalena Ridge, el cual consiste en 10 telescopios ópticos.

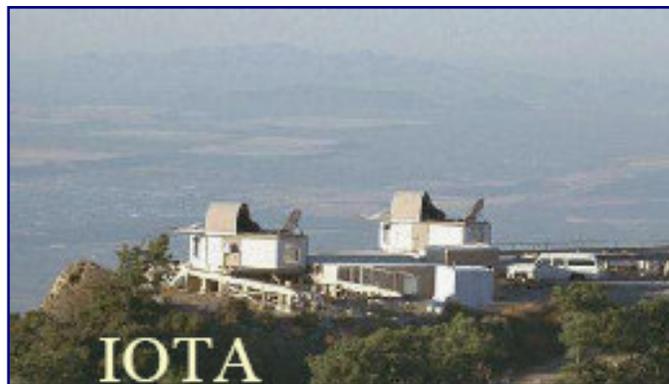


Figura 3.4 Interferómetro IOTA

3.2 El interferómetro astronómico

Es muy difícil tomar imágenes de un planeta tan pequeño como la Tierra en órbita alrededor de una estrella distante. El pequeño planeta es muy tenue debido a que sólo refleja la luz de la estrella y no tiene brillo propio. Además, este débil planeta aparece tan cercano a su brillante estrella que es casi imposible verlo por separado. Si aún así queremos saber qué apariencia tienen esas Tierras lejanas necesitaremos desarrollar otros métodos diferentes a los telescopios tradicionales. Uno de estos métodos, llamado interferometría óptica, ha sido identificado como una tecnología clave en la búsqueda de la NASA de nuevos mundos.

La interferometría óptica, esencialmente, combina la luz de múltiples telescopios para realizar el trabajo que haría un solo telescopio mucho más grande. Esto es posible debido a la interacción de las ondas de luz, también llamado interferencia. Esa interacción puede ser utilizada para cancelar el cegador resplandor de las estrellas o para medir distancias y ángulos de manera muy precisa.⁴⁴

La interferometría a longitudes de onda de radio ha sido utilizada para observar la estructura de galaxias distantes por sus emisiones de radio durante casi medio siglo. Pero las técnicas para llevar a cabo la interferometría en longitudes de onda ópticas, usando computadoras y sensores de luz de tecnología de punta, ha madurado tan sólo en los últimos 15 años.

3.3 Un poco de historia del interferómetro astronómico

En 1779 William Herschel se dio cuenta de que la imagen de las estrellas que se formaba en su telescopio aparentaba ser de mayor tamaño que con el que se deberían ver, pero no supo el porqué. Luego cuando Thomas Young demostró la interferencia y la naturaleza de la luz en 1803, Herschel dirigió una extensa serie de experimentos en su jardín en Slough, examinando a través de su telescopio pequeños globos de diferentes tamaños y materiales puestos en un árbol a unos 800 pies (aprox. 244m) (Herschel 1805)⁸.

Herschel encontró que, si solamente la parte interna de la apertura del telescopio fuera usada, los diámetros relativos, de los globos o de las estrellas, serían más grandes. Si la apertura completa fuera empleada, los diámetros serían más pequeños aún, y si sólo una apertura anular exterior fuera usada, los diámetros todavía serían más pequeños. Este experimento descubrió que pueden usarse diferentes aberturas del telescopio para obtener una alta resolución angular, lo que permanece hasta hoy como la base esencial para las imágenes interferométricas en la Astronomía.

La justificación teórica de este resultado vino después con el análisis de Airy del patrón de la difracción de una apertura circular (Airy 1835), y tomó 30 años para que se desarrollara

la idea de usar las aberturas múltiples. En un estudio anterior el Reverendo W. R. Dawes notó que él había encontrado una gran ventaja del uso de una placa multiperforada al hacer sus observaciones y que cuando se observaba Venus se producía perfectamente la imagen del planeta centrada y sin color (Dawes 1866)⁸. Pero le dejó a Fizeau, la misión de que frente a la Comisión del Prix Bordin del año siguiente, enfatizara en que existe "*une relation remarquable et nécessaire entre la dimension des franges et celle de la source lumineuse* (una relación notable y necesaria entre la dimensión de las franjas y la celda de fuente de luz)" y sugirió que usando una combinación interferométrica de la luz de dos aberturas separadas "*il deviendra possible d'obtenir quelques données nouvelles sur les diamètres angulaires de ces astres (Será posible obtener algunos nuevos datos de los diámetros ondulares de estos astros)*" (Fizeau 1868).⁸

En 1919, Albert Michelson siguió los pasos para la aplicación práctica de estas técnicas en la Astronomía óptica, y definió la "visibilidad" de las franjas de la interferencia obtenidas de una fuente de tamaño angular finito (Michelson 1890) y siguió un año después con la medida de los diámetros angulares de los satélites de Júpiter (Michelson 1891). Finalmente, 30 años después, las predicciones de Fizeau se volvieron una realidad cuando la medida directa interferométrica de un diámetro estelar fue obtenido por Michelson & Pease (1921) con su interferómetro de 20 pies (aprox. 6.1m) montado en el Telescopio Hooker de 100 pulgadas de la Montaña Wilson, este interferómetro tenía pequeños espejos en la partes superior, con lo que se incrementó el diámetro efectivo del telescopio y por lo tanto la resolución del telescopio.⁴⁴ Esto marco el inicio de la interferometría en la astronomía ya que fue aplicada para superar las limitaciones de los instrumentos existentes.

Johnson, Betz y Towns (1974) extendieron este método para hacer mediciones usando telescopios separados en el rango infrarrojo y por Labeyrie (1975) en el rango visible. La estrella gigante roja, Betelgeuse, fue la primera en tener su diámetro determinado de esta manera entre 1920 y 1921. En la década de 1940, la radio interferometría fue utilizada para realizar las primeras observaciones radio astronómicas de alta resolución. Y por las siguientes tres décadas la investigación de la interferometría astronómica estuvo dominada por la investigación de las longitudes de onda de radio, conduciendo al desarrollo de instrumentos grandes como el "Very Large Array" y el "Atacama Large Millimeter Array".

La interferometría Óptico-infrarroja se extendió a la medición usando telescopios separados, esto lo realizaron Johnson, Betz y Towns (1974) en el campo infrarrojo y por Labeyrie (1975) en el campo visible. A finales de 1970 las mejoras en el procesando computacional permitió al primer interferómetro "rastreador de franja" operar lo suficientemente rápido para seguir los efectos de falta de definición debido a la distorsión del haz de luz al pasar por la atmósfera, conduciendo así a la serie de interferómetros Mk I, II y III. Técnicas similares han estado hasta ahora aplicadas en otras series de telescopios astronómicos, como el Keck Interferometer y el Palomar Testbed Interferometer.⁸

En los años ochenta la técnica de obtención de imágenes interferométrica por la síntesis de apertura se extendió a la luz visible y a la Astronomía infrarroja por el Cavendish Astrophysics Group, proporcionando las primeras imágenes de muy alta resolución de estrellas cercanas. En 1995 esta técnica se utilizó por primera vez en una serie de telescopios ópticos separados, obteniendo una mejora en la resolución, y permitiendo la proyección de imágenes de superficies estelares. Las mismas técnicas actualmente son aplicadas en otras series de telescopios astronómicos, incluso el Interferómetro Óptico Prototipo de la Armada y el arreglo IOTA, y pronto los interferómetros VLTI, CHARA y MRO.⁸

Los problemas que se podían atacar con la interferometría hace 10 años estaban limitados por el alcance del lente del instrumento. Todos los Very Long Baseline interferometers (VLBI) que estaban en operación, solo permitían una observación por cada receptor por vez. La mayoría permitía tener los últimos datos desde el otro receptor para ser combinados para su análisis, pero en todos los casos los datos abarcaron amplitudes de visibilidad de franja sin la información de la fase. Una consecuencia directa de esto era una separación de los programas astronómicos en dos distintas categorías.

En la primera, los datos podían ser colocados por un número muy pequeño de parámetros dando una descripción adecuada del punto que se quería observar, por ejemplo el diámetro angular de la estrella tratado como si fuera un disco brillante y uniforme o la separación angular, ángulo de posición o brillo relativo de dos componentes de un sistema binario, cada uno de los cuales no podían ser individualmente captados por un interferómetro. En la segunda categoría están las observaciones apuntadas tentativamente para entender algún aspecto de la situación física, por ejemplo la geometría básica, en los casos donde no se tenga buen modelo, o como extensión espacial o distribución radial de materia circumestelar cercana a una estrella.⁷ La llave del avance buscada aquí es esencialmente de calidad, no de cantidad. La aguda distinción entre las dos categorías era la característica esencial de la interferometría.

Actualmente, existe una gran variedad de interferómetros para aplicaciones astronómicas, entre ellos están los interferómetros de motas (Labeyrie, 1970) y la Holografía de Motas (Lui and Lohmann, 1973)⁸, los cuales han podido superar las aberraciones debido a la turbulencia atmosférica, con lo que se ha podido obtener imágenes de muy alta resolución, superior a las obtenidas con cualquier telescopio terrestre y así ha sido posible determinar la estructura de muchos grupos compactos de estrellas.

3.4 Teoría del Interferómetro de Motas

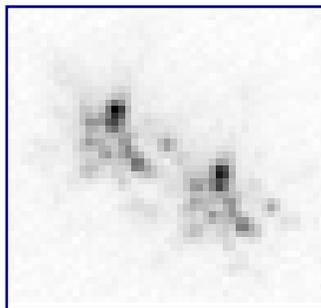


Figura 3.5 Imagen de corta exposición de Zeta Bootis

La imagen que se muestra es la típica imagen de corta exposición de una estrella binaria (Zeta Bootis en este caso), y se ve de esta manera debido a la distorsión del haz de luz al pasar por la atmósfera. Cada estrella debe aparecer como un solo punto, pero la atmósfera causa que las imágenes de las dos estrellas se fragmenten en dos patrones de

motas. Las motas se mueven rápidamente alrededor, por lo que cada estrella parecería como una sola mancha difusa en las imágenes de larga exposición.⁹

Antoine Émile Henry Labeyrie (nacido 1943), astrónomo francés graduado del "École supérieure d'optique", fue quien inventó la Interferometría de Motas¹, y actualmente trabaja con interferómetros astronómicos. Esta técnica ha sido un parte aguas en la en la obtención de imágenes estelares, permitiendo así, hacer mediciones de una gran variedad de cuerpos celestes (Barlow et al., 1986, Word et al., 1987).⁹

La Interferometría de motas se basa en tomar imágenes de muy corta exposición de objetivos astronómicos, con lo que se congelan los efectos debido a la distorsión del haz de luz al pasar por la atmósfera¹ y se imprime como un patrón de motas.

Luego esas imágenes son analizadas por Interferometría de Motas, para recuperar la información perdida, y así tener imágenes de resolución superior a las obtenidas por cualquier otro método, 10 veces mejor que la obtenida con un telescopio común de 1m.

El uso de esta técnica llevó a numerosos descubrimientos, e incluso miles de estrellas binarias que de otra forma parecerían una sola estrella, aunque se trabajara con un telescopio similar en tamaño.

En teoría, el límite de la resolución de un telescopio está una función del tamaño del espejo principal. Esto produce que imágenes de cuerpos celestes distantes parezcan una mancha dispersa conocida como el disco Airy (ver II.3.1.1). Cuando se utilizan telescopios más grandes la resolución mejora y no sólo se obtiene la imagen de cuerpos celestes más oscuros, ya que ellos concentran más luz al utilizar un espejo más grande, sino también son capaces de obtener imágenes de cuerpos celestes más pequeños.²¹

Por muchos años el tamaño fue una limitante del aumento de resolución del telescopio, debido a las restricciones mecánicas existentes, hasta que la introducción de la interferometría de motas y las ópticas adaptables brindaron caminos para quitar esta barrera, y se superan los límites prácticos impuestos por la atmósfera.

La obtención de imágenes de motas recrea la imagen original a través de una técnica de procesamiento de datos. La base de esta técnica, fue encontrada por el astrónomo americano David L. Fried en 1966, y consiste en tomar imágenes muy rápidas en las cuales la atmósfera es eficazmente "congelada". Para las imágenes infrarrojas, los tiempos de exposición están en el orden de 100 ms, pero para la región visible disminuyen a tan solo 10 ms. En las imágenes obtenidas en esta escala, o más pequeña, el movimiento de la atmósfera está demasiado difuso para tener un efecto; las motas grabadas en la imagen son muestra de la distorsión de la luz al pasar por la atmósfera en ese instante. En 1970, Labeyrie mostró que se podía obtener información sobre la estructura de alta resolución del objeto a través de los patrones de motas utilizados en el análisis de Fourier (Interferometría de motas), y en los 1980s se desarrollaron métodos que permitieron reconstruir interferométricamente las imágenes de los patrones de motas.²¹

Las de técnicas de obtención de imágenes astronómicas de alta resolución basadas en el método de cambio-y-adición ("imagen apilada"), en el método de obtención de imágenes afortunadas o en el método de Interferometría de Motas, pueden aumentar la resolución de los telescopios terrestres dramáticamente.

En la técnica de cambio-y-adición, las imágenes de corta exposición son alineadas con respecto a la mota más luminosa y se promedian para dar una sola imagen.

En la técnica de obtención de imágenes afortunadas, sólo las mejores exposiciones cortas se seleccionan.

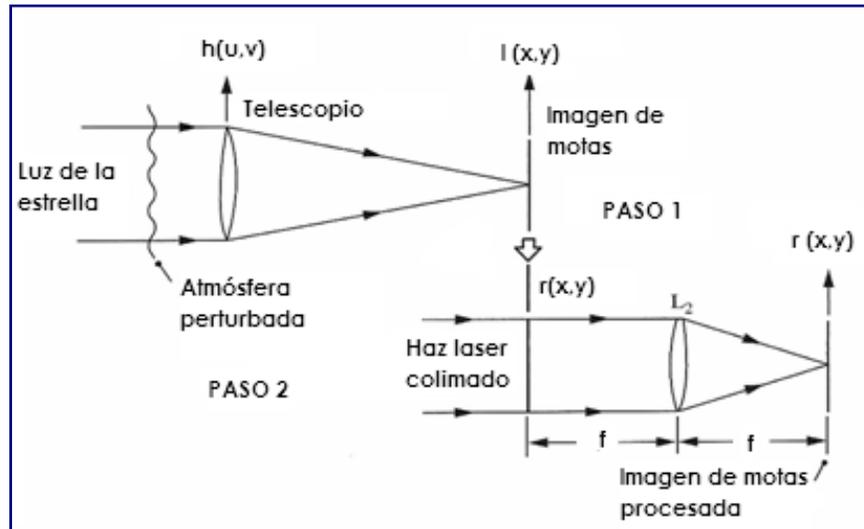


Figura 3.6 Diagrama del funcionamiento del interferómetro de motas.

Un tipo de interferometría de motas llamada enmascarando de motas involucra el cálculo del bispectrum o del cierre de fases de cada una de las imágenes de corta exposición. Los "promedio del bispectrum" pueden calcularse y luego invertirse para obtener una imagen. Esto trabaja muy bien utilizando máscaras de apertura. En este arreglo la apertura del telescopio es bloqueado dejando solamente unos agujeros a través de los cuales se permite que pase la luz, creándose así un interferómetro óptico pequeño con mejor poder de resolución que el telescopio tendría en otro caso. Esta técnica de enmascaramiento de la apertura fue puesta en práctica por el Cavendish Astrophysics Group.

La desventaja de la interferometría de motas es que es muy difícil obtener imágenes a tan corta exposición, y si el cuerpo celeste es demasiado oscuro, no se capturará suficiente luz para hacer el análisis. Los primeros usos de esta técnica a principios de los setentas eran hechos en una escala muy limitada utilizando técnicas fotográficas, y como las películas fotográficas capturan sólo aproximadamente el 7% de la luz entrante, podían procesarse de esta manera sólo los cuerpos celestes más luminosos.⁸ La introducción del CCD en la Astronomía, que captura más de 70% de la luz, disminuyó enormemente la barrera de las aplicaciones prácticas, y hoy, esta técnica se usa ampliamente en los cuerpos celestes luminosos (por ejemplo las estrellas y sistemas de estrellas).

Otra limitante de la técnica es que requiere un procesamiento computacional extenso de la imagen, que también era difícil de obtener al principio. El casi-universal Data General Nova funcionaba con eficacia en este proceso, pero era bastante lento, por lo que se limitaba su la aplicación a sólo "objetos importantes". Esta limitación ha ido desapareciendo rápidamente durante estos años, y hoy día las computadoras tienen suficiente poder para hacer del procesando de las imágenes una tarea trivial.

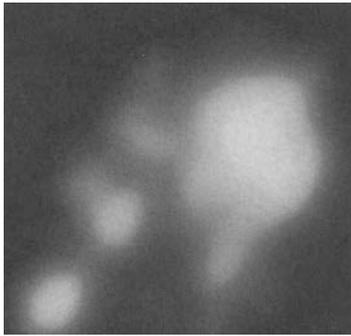
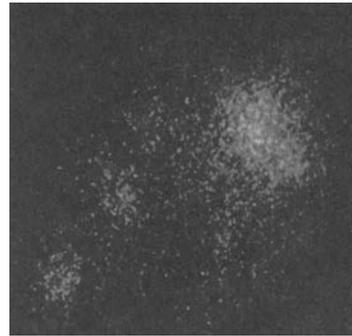


Imagen de larga exposición centrada de R136



Muestra de una imagen interferométrica de motas de R136



Imagen de R136 limitada por la difracción reconstruida por la interferometría de motas (sin deconvolución adicional)

Figura 3.7 Comparación de las imágenes de R136 tratadas por Interferometría de motas. ⁽²⁷⁾

El hecho de que muchos de los métodos de obtención de imágenes de motas tengan múltiples nombres resulta de que muchos astrónomos aficionados re-inventan las técnicas de obtención de imágenes de motas existentes y les dan nuevos nombres.

Más recientemente, otro uso de esta técnica se ha desarrollado para aplicaciones industriales. Haciendo brillar un láser (cuyo frente de onda liso es una simulación excelente de la luz de una estrella distante) en una superficie, el patrón de motas resultante puede procesarse para recobrar las imágenes detalladas sobre las fallas en el material.⁸

3.5 Diseño

Diseño.

La palabra diseño viene de la palabra latina "*designare*", que significa "designar, marcar,..."

Diseño

Idear, determinar la forma concreta de algo.

Larousse Conciso Ilustrado

Diseño

"El arte de imaginar y crear cosas útiles capaces de satisfacer necesidades, manifiestas o latentes, del individuo o de la comunidad".

International Council of Societies of Industrial Design (I.C.S.I.D.)²

Diseño de ingeniería

"Un acto creativo dedicado a seleccionar, combinar, convertir, restringir, modificar, manipular y conformar ideas, resultados científicos y leyes físicas en proyectos o procesos útiles"

Harrisberg³

Diseño en la ingeniería

"Es el uso de principios científicos, información técnica e imaginación en la definición de una estructura mecánica, una máquina o un sistema que cumpla con las funciones pre-especificadas con la mayor economía y eficiencia"

Feilden²²

Adoptaremos la definición del International Council of Societies of Industrial Design para la realización de este proyecto. La habilidad de diseñar implica ciencia y arte; la ciencia puede ser aprendida a través de técnicas y procedimientos; el arte solamente se aprende diseñando.

Un diseño es producto de la planeación y el trabajo, y tiene el objetivo de satisfacer una necesidad. Se debe recalcar que un diseño puede, o no, involucrar una invención.

Un buen diseño requiere de análisis y síntesis. El análisis incluye poder calcular y prever el comportamiento de lo diseñado usando las disciplinas apropiadas y las herramientas necesarias. La síntesis abarca el ensamble de todos los elementos que contéplale diseño como un todo. Los problemas reales que el diseño espera poder resolver, abarcan muchas disciplinas técnicas como: mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, electromagnetismo, entre muchas otras; y disciplinas tales como: economía, finanzas, derecho, etc.⁴ Los datos de entrada deben ser fragmentados lo mejor posible, para así resolver el problema de una manera más sencilla y rápida.

3.5.1 Clasificación del diseño

Diseñar es una experiencia humana común, nuestros antepasados necesitaron diseñar sus utensilios para satisfacer sus necesidades, hasta el diseño actual que reúne y acomoda cosas nuevas y ya existentes de manera nueva para satisfacer las necesidades actuales que tiene la sociedad.

Ciertamente, un ingeniero practica el diseño por definición, pero también lo hace un artista, un escultor, un compositor y cualquier otro miembro creativo de nuestra sociedad. A continuación se muestran algunos tipos o modalidades del diseño.

3.5.1.1 Diseño industrial

Es la disciplina que busca resolver la forma de objetos tridimensionales, producidos en serie, y que afectan de manera intrínseca al ser humano. Está esencialmente orientado a proyectar desde una doble capacidad expresiva y funcional objetos que se puedan fabricar a través de un proceso industrial.²

3.5.1.2 Diseño gráfico

El diseño gráfico integra la edición, la publicidad y la identidad, se proyecta en un plano, impresos, pantallas de computadora, etc., mientras que el anterior se proyecta principalmente en volúmenes. Sus principales aplicaciones son: publicidad, packing, y la imagen corporativa de una empresa.²

3.5.1.3 Diseño artesanal

El aspecto de producción en serie es el que distingue al diseño industrial de la artesanía. Un objeto de artesanía no está, ni necesita ser definido antes de comenzar su producción, los objetos producidos artesanalmente sobre la base de una misma idea original resultan distintos, y el operario al elaborar el objeto artesanal, modifica a voluntad la forma de éste.

3.5.1.4 Ecodiseño

La atención del problema ecológico en el diseño implica que en el mismo se considere críticamente el uso de materiales que dan lugar a desechos tóxicos, y cuando esto sea inevitable, que sea contemplada la forma en que deberán ser abandonados y tratados tales desechos para evitar consecuencias ambientales indeseadas, y no afectar gravemente a las personas o al ambiente. La consideración del problema ecológico como requerimiento fundamental del diseño ha tomado un gran impulso en la última década, especialmente a partir de la declaración de principios emanados de la Conferencia de la Tierra de Río de Janeiro en 1992.²

3.5.1.5 Diseño mecánico

Es la disciplina que crea objetos cuya forma debe ser siempre consecuencia de la función aunque, cumplida la función, la estética tiene cada vez más importancia en el proceso de comercialización del proyecto.²

En general el proceso de diseño tendrá muchas entradas y a lo sumo dos salidas: La documentación y un prototipo. Son entradas del diseño las exigencias y regulaciones aplicables al proyecto, las cuales deben estar documentadas desde su inicio.

Los requerimientos inconsistentes, ambiguos, o incompletos deben ser resueltos con los responsables de tales requerimientos antes del inicio del proyecto. Asimismo, deben ser parte de las entradas del diseño los objetivos de fiabilidad, durabilidad y mantenimiento planteados para el proyecto, y los criterios de aceptación.

La documentación es la salida del diseño más importante. Debe definir la configuración del equipo y los elementos necesarios para su fabricación, estableciendo cuales características son cruciales para el buen funcionamiento del proyecto, en cuanto a su operación, almacenamiento, manipuleo, mantenimiento y atender además la disposición final. Debe estar expresada en términos que permitan la verificación y validación contra los requerimientos de entrada. La salida debe resultar de un proceso de optimización del diseño, buscando simplificar, mejorar, innovar, y reducir desperdicios.³

3.6 Metodología del diseño mecánico

Desde siempre se ha reconocido la necesidad de seguir una metodología para lograr una exitosa ejecución de un diseño, y a ese fin se han propuesto diversos modelos, pero se la mayoría se basan en el expuesto por Morris Asimov.⁴

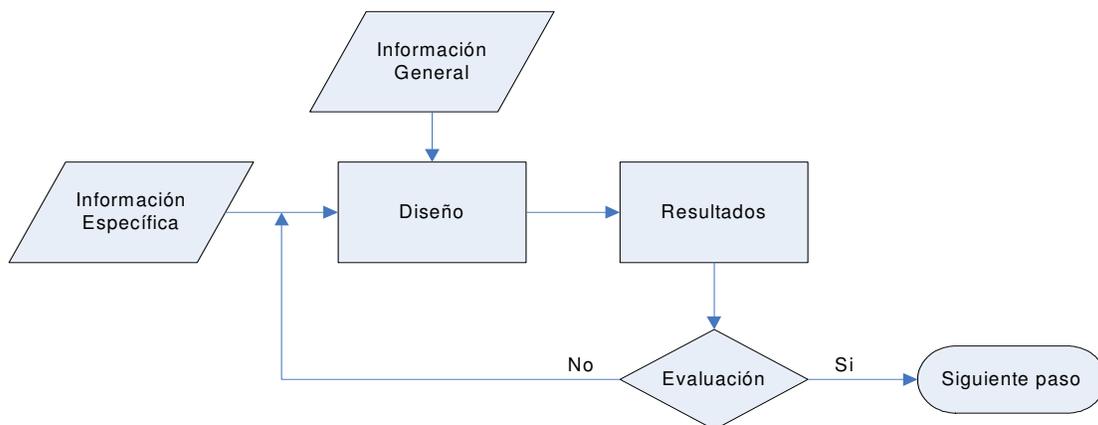


Figura 3.8 Diagrama de la metodología de diseño expuesta por Morris Asimov.

Para la solución de los problemas de ingeniería se han desarrollado a través del tiempo diferentes aproximaciones. Muchas de ellas son solo pequeñas variaciones alrededor de una forma de pensar, o paradigma. Un paradigma es una manera de resolver los problemas.⁴ La forma en que se conciben las soluciones no sólo cambia porque se deben tomar en cuenta nuevos avances científicos y tecnológicos, sino también porque el comportamiento de la sociedad es distinto y demanda soluciones no sólo mejores sino también diferentes.

3.6.1 Proceso de diseño mecánico

El proceso de diseño se realiza en una serie de fases que se pueden concretar en:

- Reconocimiento de la necesidad.
- Definición del problema.
- Diseño conceptual.
- Diseño preliminar.
- Diseño crítico o de detalle.
- Manufactura.

En cada fase se efectuará secuencialmente la evaluación de los resultados que determine la decisión de continuar o abandonar el proyecto, o reciclar el proceso a etapas anteriores.⁴

3.6.1.1 Reconocimiento de la necesidad

El proceso de diseño parte del reconocimiento de una necesidad insatisfecha, mal satisfecha, o susceptible de mejorar en algún sentido. Los problemas que resuelve un ingeniero son para cubrir esa necesidad y no están claramente definidos en su origen, por ello deben identificarse antes de abordar su solución.³

Reconocer la necesidad lo más concreta y exactamente posible, nos permite saber que tan factible es resolver el problema.

3.6.1.2 Definición del problema

Probablemente la parte más crítica en el proceso de diseño es la definición del problema. Mientras mejor se defina se podrán vislumbrar soluciones, a veces inusuales, y así innovar.⁴

Los apartados que deben revisarse en esta fase son:

- Identificar los requerimientos del usuario.
- Definir los objetivos de diseño.
- Indicar las especificaciones de diseño.

Un ingeniero resuelve problemas con el fin de cubrir una necesidad, pero dichos problemas suelen no estar claramente definidos en su origen, por ello deben identificarse antes de abordar su solución.²

3.6.1.2.1 Identificar los requerimientos del usuario

Los proyectos arrancan y terminan siempre con documentos. El primero de estos documentos, y además elemento clave de cualquier proyecto, es el que define los requerimientos del proyecto. El último es la memoria del proyecto, documentación probatoria que sirve para validar los cálculos y decisiones asumidas en el desarrollo del proyecto.

Para no arribar a la solución perfecta para el problema equivocado, el primer paso de cualquier proyecto debe ser entonces asegurarse de que el problema quede bien definido en un documento.³

Un diseño parte siempre de las premisas que la necesidad le impone, por lo que éstas deben estar muy bien enfocadas y estructuradas, sin dejar lugar a interpretaciones, para que el diseño realmente resuelva el problema y así la necesidad se vea satisfecha.⁴

Reconocer la necesidad lo más concreta y exactamente posible, nos permite saber que tan factible es resolver el problema.

“Entender las necesidades humanas es la mitad del trabajo que se necesita para satisfacerlas”.

3.6.1.2.2 Indicar los requerimientos de diseño

Establecer las especificaciones de diseño es una de las actividades más complicadas, difíciles e importantes, pues ellas determinan la capacidad final del proyecto y su costo. Deben fijarse en las etapas más tempranas del proceso de diseño, basándose en la definición de proyecto, y deben ser lo más específicas posibles. Son imprescindibles para el manejo y control del diseño, y las mismas deben contemplar gran diversidad de aspectos, tales como:³

- Condiciones ambientales: temperatura, presión, humedad, presencia de polvo o agresivos químicos, resistencia a insectos, ruidos, vibración, y tipo de trato previsto por el usuario.
- Características operativas y funcionales, en las cuales se define el fin para el cual va a servir el proyecto, con detalle de los modos de operación del proyecto básico, y las previsiones para futuras opciones.
- Interfase con el operador, donde se describe la interacción del operador con el proyecto.
- Características estandarizadas, en las cuales se contempla la compatibilidad con otros equipos del mercado, y las normas nacionales e internacionales.
- Tiempo operativo o ciclo de trabajo: tiempo en el que se supone que el equipo va a estar en servicio, estimado en horas diarias.
- Mantenimiento: concepción del equipo en cuanto a su mantenimiento.
- Tamaño y forma, básicamente buscando que no haya restricciones condicionantes.
- Peso y modo de fijación.
- Apariencia y terminación: estética del proyecto.

- Aspectos ergonómicos, vinculados con su interacción con las personas, disposición y tipos de controles y visualizaciones; momentos y esfuerzos mecánicos mínimos y máximos de accionamiento, etc.
- Instalación: accesorios necesarios y exigencias para que la instalación sea compatible con los demás equipos con los cuales debe interactuar.
- Documentación: manuales a generar: de usuario, de instalación, de mantenimiento.

3.6.1.3 Diseño conceptual

Esta fase consta, a su vez, de varias subfases que se desarrollan a continuación.

3.6.1.3.1 Generación de ideas

La fase de conceptualización, imprescindible en el proceso de diseño, abarca aspectos como la exploración de las diferentes posibilidades existentes para llegar a un resultado o la redefinición del problema de partida. La creatividad es la característica fundamental.⁴ Existen muchos métodos de creatividad, entre los más sencillos se pueden destacar el método intuitivo y la tormenta de ideas.

3.6.1.3.2 Evaluación de ideas

En la etapa de evaluación se hace un análisis crítico del total de las ideas generadas, y de los proyectos similares y sustitutivos ya existentes, debiendo responder cada idea a una necesidad del mercado, manifiesta o latente, para ello se utilizan matrices de comparación, MEF, hojas de cálculo, QFD, programas de CAD y CAM, etc.

Los métodos gráficos son otra forma de análisis de una solución, los planos dibujados a escala y los diseños en 3D por computadora, ayudan a establecer la interrelación de los movimientos de las partes y la estética en la evaluación del diseño. En otros casos la evaluación puede involucrar pruebas experimentales a modelos o prototipos.²

La toma de decisiones como, hasta donde optimizar o donde detener el diseño, dependen de consideraciones de tiempo y dinero.

3.6.1.3.3 Determinación del concepto final

En esta etapa, el proyecto se desmenuza en todas sus piezas y se detallan las operaciones productivas y de montaje necesarias para cada una de ellas, lo que permite un cálculo preciso de los esfuerzos necesarios que va a originar su uso, su accesibilidad, visibilidad, ruido, nivel de seguridad, mantenimiento, y costos.²

3.6.1.4 Diseño preliminar

Durante el diseño preliminar se concretiza una solución al problema; se define la configuración total del sistema y se hace la selección de los componentes que integran el proyecto, teniendo en cuenta disponibilidad, costo, limitaciones y facilidades de manufactura, metas de fiabilidad, etc. y se obtienen formas específicas, materiales propuestos y se desarrollan los diferentes planos, esquemas y/o documentos generales que representan al producto como un conjunto organizado de piezas, componentes, enlaces y acoplamientos. Los requerimientos que se establezcan en esta fase del proceso serán la base de las especificaciones finales, aunque es importante tener en cuenta los siguientes conceptos:

1. Es imposible especificar correctamente al comienzo de un desarrollo todos los requerimientos del sistema, por lo que será necesario un refinamiento iterativo a medida que se avance en el proceso de desarrollo.
2. Se deben aceptar las frecuentes y sucesivas realimentaciones como una manera de ir refinando el diseño.
3. Es usual en la etapa del diseño preliminar apoyarse en paquetes de simulación específicos (CAD/CAM/CAE, ópticos, hojas de cálculo, etc.) con la finalidad de validar conceptos de solución. Estos programas, se basan en modelos que, aunque muy potentes, requieren normalmente una posterior comprobación experimental, que, de ser negativa, obligara al replanteo de la solución.

El diseño preliminar es, usualmente, llevado a cabo por un pequeño núcleo de profesionales que representan las distintas disciplinas involucradas en el proyecto, los cuales una vez finalizada la etapa preliminar continuarán trabajando en la fase siguiente (diseño detallado).³

3.6.1.4.1 Descripción general del sistema

Para hacer una descripción general del sistema es necesario plasmar en papel cuales son las características generales del sistema, tales como componentes que lo integran, características del sistema en general, materiales con los que fue fabricado, elementos de sujeción, cuidados de manejo y transporte, advertencias de seguridad, instrucciones de ensamble y los planos generales y de las piezas del sistema.⁴

3.6.1.4.2 Componentes que integran el sistema

El diseño preliminar incluye una descripción de cada uno de los componentes que integran el sistema, donde se explica cómo y dónde va colocado el componente en cuestión, cuales son las características de este, cual es su función dentro del sistema, y que especificaciones cumple.

Se deben establecer modelos para el cálculo de los elementos, a fin de determinar la carga a la que se ven sometidos.⁴

Así la selección de los componentes estándar que giran alrededor de los componentes principales que integran el núcleo del proyecto deberá hacerse teniendo en cuenta:

- Resistencia
- Costo (considerando el volumen)
- Calidad y fiabilidad (niveles de AQL y tasa de fallas)
- Características funcionales específicas (tolerancia, comportamiento térmico, etc.)
- Disponibilidad en el mercado (tiempo de entrega)
- Exigencias de manufactura (tipo de montaje y soldadura)
- Racionalización (gama preferida de valores)
- Etc.

3.6.1.4.3 Materiales y peso estimado

Se debe especificar cuáles son los materiales utilizados para la fabricación del sistema, y se debe justificar su elección basándose en las propiedades, disponibilidad y costo del material elegido.

Además se debe incluir una lista de componentes en la que se debe incluir el peso estimado de cada uno de los elementos, material con el que están fabricados, así como el peso total del sistema.

3.6.1.4.4 Planos y explosivo

Para una adecuada manufactura de los componentes del sistema, se generan planos de conjunto con dimensiones generales pero que aporten los detalles suficientes para justificar su producción.

Además, con ellos se aporta información sobre las especificaciones del componente, y su relación con los demás elementos del sistema.

En la mayoría de los casos se anexa un plano explosivo en el que se detalla cómo se acoplan los componentes dentro del sistema.⁴

3.6.1.4.5 Proceso de manufactura

En este apartado se plantea todos los procesos de maquinado que se emplearán para la manufactura de cada uno de los componentes que sea necesario fabricar.

También se tiene que especificar las tolerancias de cada uno de los procesos de maquinado e indicar los equipos y herramientas empleadas para cada proceso.

3.6.1.4.6 Ensamble

Se plantea la metodología a seguir para el correcto ensamble y desensamble del sistema, estableciendo detalles como las herramientas a emplear, la presión de los tornillos y empalmes, el adhesivo utilizado, elementos de sujeción, entre otros, esto con el fin de que se pueda obtener una repetitibilidad del ensamble confiable y dentro de las especificaciones.⁴

3.6.1.5 Diseño crítico o de detalle

El propósito de esta etapa del proyecto es:

- documentar los problemas detectados en las etapas de verificación, y las acciones de corrección correspondientes.
- documentar los resultados de los ensayos de validación efectuados sobre prototipos.
- generar la documentación y las especificaciones que describan completamente el diseño, etc.
- generar los planos de detalle de las piezas a manufacturar y verificar su factibilidad de manufactura.

En otras palabras, en esta etapa, diferentes grupos de profesionales y departamentos de la organización de diferentes disciplinas trabajan activamente en procesos de síntesis y análisis de las soluciones, realizando evaluaciones de componentes para validar los requerimientos establecidos previamente, generando todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución y estimando los efectos de los distintos componentes en el sistema. Se elaboran planos con detalles de terminación, con medidas y datos de los ensayos a los que está sujeta cada parte, y donde por lo general el número de plano se convierte en el número de parte.

Los planos de detalle deben incluir toda la información necesaria para producir y verificar el componente; además deben mostrarse las vistas de las piezas que serán necesarias para la manufactura.³

3.6.1.5.1 Problemas detectados

Durante las etapas de validación y de verificación, suelen salir a la luz los errores del proyecto, los cuales deben servir para revalorarlo, y si estos no son causa de que se tenga que rediseñar, se puede seguir adelante con el proyecto, no sin antes haber documentado los errores y las acciones de corrección.

3.6.1.5.2 Resultados de los ensayos de validación

Actualmente existen herramientas computacionales capaces de simular las condiciones físicas bajo las que está sometido algún elemento, aunado a las propiedades del material que lo compone para así predecir el comportamiento y suponer desde una etapa temprana del diseño, la viabilidad del mismo.⁴⁵

Se deben de documentar los resultados de los ensayos de validación efectuados sobre el instrumento, ya que estos resultados son la base que sustente y justifique la fabricación del instrumento.

Estos ensayos de validación pueden ser hechos utilizando programas como ZEMAX y ALGOR, y sus resultados deben ser analizados por los diseñadores, ya que aunque se utilice el mejor programa de análisis de las piezas, los resultados no sirven de nada si no se sabe interpretarlos adecuadamente.

3.6.1.5.3 Especificaciones del diseño

Una vez que se tiene el concepto final, es necesario generar la documentación y las especificaciones que describan completamente el diseño, etc.

Las especificaciones deben basarse en la definición de proyecto, y deben ser lo más detalladas posibles.² Son imprescindibles para el manejo y control del instrumento, y por lo tanto deben estar debidamente documentadas para el correcto uso y manejo de este.

3.6.1.5.4 Planos de detalle

Debido a que actualmente se cuenta con programas de diseño asistido por computadora (CAD), generar los planos de detalle de las piezas a manufacturar es mucho más sencillo, pero aun así los planos deben incluir toda la información necesaria para producir y verificar el componente.

También deben mostrarse las vistas de las piezas y un plano explosivo que detalle el ensamble completo, y se debe verificar su factibilidad de manufactura.

3.6.1.6 Manufactura

Después de que ya se tiene el diseño del instrumento en CAD, se empieza con el proceso de manufactura; actualmente este proceso puede llevarse a cabo con herramientas de Manufactura Asistido por Computadora, CAM.

Esta fase consiste en pensar y definir cómo va a ser fabricado el producto, escogiendo el proceso de fabricación de los componentes, y el montaje del producto. En esta fase hay que trabajar con proveedores en el caso de que se decida usarlos, o ver la forma de fabricar internamente los componentes. En este último caso es posible que sea necesario diseñar y desarrollar a su vez líneas de producción, así como también equipamiento y herramientas especiales.⁴⁵

El diseño deberá considerar el tipo de manufactura, diferenciando a cuál de los tres tipos básicos corresponde el producto que se va a desarrollar:

- producto único, el proyecto termina con la construcción
- por lotes, (normalmente se produce a pedido, comercial o ventas empuja a
- producción)
- producción continua

ya que esto influirá, entre otras cosas, en:

- la selección de componentes
- selección de las herramientas
- el tratamiento de las tolerancias
- la adaptación de los procesos

Cuando la producción es por lotes o continua, la misma se basa en un plan maestro, denominado a veces MPS (Master Production Schedule), el cual se apoya en un plan de requerimiento de materiales, el MRP (Material Requirement Plan). En el MRP se combinan inventarios, el listado de materiales emitido por ingeniería, conocido como BOM (Bill of Materials) y el plan de producción. Es decir, el MRP identifica el tipo de componente y la cantidad necesaria para la manufactura de un producto, el proveedor, los costos, existencias de inventario y fechas en las que se deben realizar los pedidos de compra para satisfacer el requerimiento de producción.² Su meta es evitar demoras y bajar costos de fabricación.

Esto requiere que los sectores de Ingeniería, Compras, y Manufactura operen con una base de datos unificada, parte integrante de un sistema de fabricación ayudado por computadora (CIM).

Para ello es importante la integración del sistema de CAD para hacer posible que la etapa de diseño genere todos los archivos que requieren los distintos sectores: Ingeniería, Compras, Manufactura y Servicio.

La producción surge de un Plan Maestro, que establece el sector comercial. El listado de materiales (BOM) surge del desarrollo del producto. Es por ello importante que para la selección de un dado componente se consideren todos los aspectos que hacen a la manufactura y a su compra, como ser³:

- Utilizar herramientas adecuadas
- Basarse en proveedores seleccionados
- Basarse en componentes aprobados
- Tener en cuenta demoras en la entrega (lead time),
- Considerar la reducción de costos por volumen,
- Considerar los costos de compra.

3.6.1.6.1 Selección de las herramientas

Es importante considerar las herramientas a usar para el proceso de manufactura, ya que se debe de tomar en cuenta los parámetros de corte y el material a cortar, para así elegir la herramienta a utilizar.

Se debe buscar que las herramientas tenga una larga vida de uso y que mantengan el mayor tiempo posible su eficiencia de corte, para así obtener un óptimo proceso de manufactura, mejorar los puntos de producción y reducir los costos.

Seleccionar una herramienta o un dispositivo cuya disponibilidad no quede asegurada, o es de alto costo, o poco adaptada a los procesos, o que sea nuevo, implicara retardos en el lanzamiento o la imposibilidad de satisfacer objetivos de costo para el producto.

3.6.1.6.2 Manufactura en la Astronomía

En la instrumentación astronómica, la óptica es la que dirige el diseño de los instrumentos, por lo que una vez que ya se tiene el diseño óptico del instrumento, se continúa con el diseño mecánico, el cual se ajusta al primero y a las especificaciones planteadas.

A diferencia que en la industria, donde el objetivo principal es la reducción de costos de fabricación, en la Astronomía, el objeto principal es obtener productos de muy alta calidad que satisfagan los requerimientos científicos. Además los volúmenes de producción son muy bajos, y el tiempo y costo de fabricación no son un factor crítico.

Sin embargo, se deben de considerar muchos otros factores para la manufactura en la astronomía, tales como, precisión, materiales especiales a utilizar, tolerancias especiales, etc.

Es importante tener en cuenta como el tamaño y la cantidad de piezas afecta el proceso de manufactura y por lo tanto de la pieza final. Las herramientas especiales que se utilizan para las piezas difíciles, así como las dimensiones y la complejidad de la pieza, elevan el costo del proceso.⁴⁵

Las tolerancias que se necesitan en la Astronomía, exigen que el diseñador ponga en una balanza que es lo suficientemente bueno para el diseño y que es lo posible lograr en la manufactura. Además del tiempo que llevará terminar la pieza.

Una vez terminada la pieza, es muy importante hacer pruebas de precisión y de ensamble, asegurando así, que las piezas cumplan con las especificaciones dadas.⁴

4. DISEÑO OPTOMECÁNICO DEL INTERFERÓMETRO DE MOTAS, TOHTLI

En este capítulo se describe la configuración general de Tohtli. Se establecen las especificaciones del Instrumento a partir de los requerimientos relacionados con el Telescopio de 1m de Tonanzintla, Puebla, y los dictados por el usuario. Se incluyen las posibles soluciones a la necesidad definida y la evaluación de éstas para así llegar a la determinación del diseño final, el cual debe cumplir con los requerimientos establecidos. Finalmente, se presenta el diseño preliminar del Interferómetro de Motas que engloba la descripción de los componentes, los materiales utilizados y el ensamble del instrumento.

4.1 *La necesidad*

Se requiere realizar la medición de la separación angular y el ángulo de posición de estrellas dobles y múltiples, ya que estos son los sistemas de estrellas más comunes en el universo. Para ello se pueden utilizar diversos instrumentos, uno de ellos es el Interferómetro de Motas (Spekle Interferometer).

El Interferómetro de Motas es un instrumento astronómico de configuración sencilla, que puede fabricarse utilizando componentes y manufactura de bajo costo, pero que nos permite obtener imágenes de corta exposición en las cuales el efecto de la distorsión del haz de luz al pasar por la atmósfera es congelado, consiguiendo así imágenes de alta resolución que permiten la adecuada medición de los sistemas múltiples.

Debido a lo anterior, se diseñará y fabricará en el Instituto de Astronomía de la UNAM un Interferómetro de tamaño adecuado para su fácil transportación, adecuada operación, bajo costo y compatible con el Telescopio de 1m de Tonanzintla, Puebla, con el que se realizarán las mediciones estelares necesarias para la investigación astronómica por medio del método de la interferometría de motas. Este método permite medir la separación angular y el ángulo de posición de las estrellas con una resolución limitada solamente por la difracción del telescopio. Esta resolución es 10 veces mayor que la resolución común del telescopio de 1m., ya que la resolución será definida por la turbulencia atmosférica y no dependerá de la apertura del telescopio.

4.2 Definiciones básicas

4.2.1 Interferómetro de motas

El Interferómetro de Motas es un instrumento astronómico, de configuración sencilla, que consiste en un arreglo de oculares, filtros y una CCD para la obtención de imágenes de motas, estrellas o imágenes de cuerpos celestes; las cuales serán analizadas para obtener una imagen de alta resolución.

4.2.2 Envolverte mecánica

Es el espacio físico que el interferómetro puede ocupar.

4.2.3 Interfaz mecánica

Referencias físicas de algunos de los componentes mecánicos que conforman el instrumento. Su función es la de garantizar la posición relativa al sistema global de referencia del interferómetro.

4.2.4 Ocular

También llamado objetivo. Es un sistema óptico de varias lentes que permiten además modificar el aumento.¹⁷

4.2.5 Filtro

Es un dispositivo óptico que sirve para modificar tanto la cualidad como la cantidad de las radiaciones luminosas emitidas por un astro.

Un filtro, en general, está constituido por una lámina de caras planas y paralelas coloreada. Puesto en el trayecto óptico de un telescopio, tiene la función de dejar pasar sólo algunas longitudes de onda de la luz.¹⁷

4.2.6 CCD

Charge Coupled Device

Arreglo de elementos fotosensibles (células - pixel) se pueden formarse a partir de más de un elemento sensible semiconductor, en el cual, los electrones generados por la interacción de fotones en un material semiconductor son almacenados por medio de barreras de potencial para luego ser transferidos a una PC.¹⁷

4.2.7 Resolución

Es la capacidad de un equipo de mostrar de forma individual a dos objetos que se encuentran muy juntos.¹⁷

4.2.8 Repetitibilidad

Es la capacidad del equipo de que al ser ensamblado y desensamblado, los errores en la alineación no superen el rango especificado.¹⁷

4.3 Definición del problema

Fabricar un Interferómetro de Motas de bajo costo, diseñado y manufacturado por estudiantes, que satisfaga los requerimientos y especificaciones establecidas, y así alcanzar los objetivos científicos de este proyecto.

Para ello primero es necesario generar dichos requerimientos y especificaciones, y para hacerlo se debe de tomar en cuenta las necesidades del usuario, acotarlas y expresarlas en términos adecuados para este propósito. Además se debe evaluar que es viable de hacer en función de tiempo y costo del equipo. Esta es la parte fundamental del trabajo, ya que si los requerimientos y las especificaciones no están bien definidos, se corre el riesgo de llegar a la solución adecuada al problema equivocado o que los costos y el trabajo se eleven.

Además este instrumento debe tener la capacidad de que en un futuro sea automatizado y controlado en forma remota.

Se busca que en cualquier institución que cuente con un telescopio de 1m pueda tener acceso a un Interferómetro de motas como Tohtli.

4.3.1 Requerimientos

A continuación se muestran los requerimientos generales del interferómetro de motas, Tohtli. La función de ellos es la de marcar las directrices del diseño mecánico de las interfaces:

4.3.1.1 Requerimientos Funcionales

4.3.1.1.1 Propósito de Tohtli

El instrumento debe poderse ensamblar a la interfaz con platina del Telescopio de 1m de Tonanzintla, Puebla, la cual se muestra en la figura 4.1.

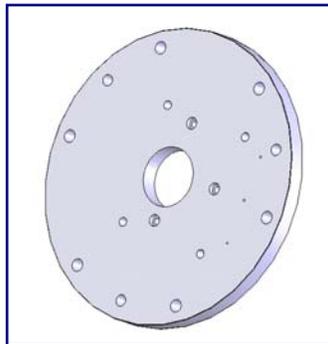


Figura 4.1 Interfaz con la platina.

Con la ayuda de las superficies de referencia, se debe garantizar que la posición del instrumento con respecto al telescopio, y de los subsistemas entre si, esté dentro de las tolerancias especificadas.

4.3.1.1.2 Soporte de los subsistemas

El instrumento debe contar con una estructura de soporte que sostenga los subsistemas del interferómetro de motas y los mantenga en la posición indicada para cumplir con su correcto funcionamiento

Esta estructura debe ser de tal forma que brinde resistencia y estabilidad al instrumento, y así evitar deformaciones durante la obtención de imágenes.

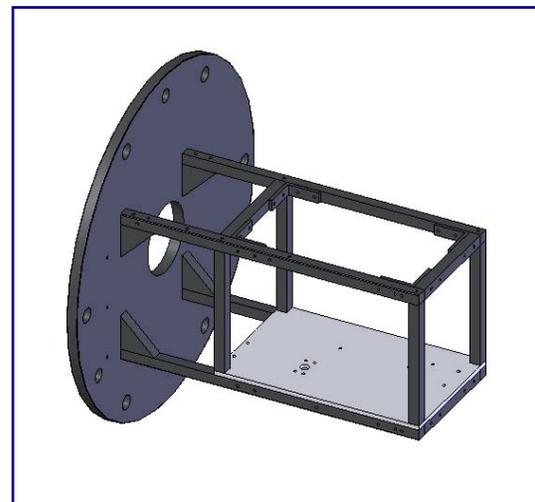


Figura 4.2 Estructura de soporte

4.3.1.1.3 Fijación de los subsistemas

Los subsistemas deben ir atornillados a la base de la estructura de soporte.

Los componentes de los subsistemas se fijarán según las especificaciones del fabricante.

4.3.1.1.4 Componentes

Para el funcionamiento de Tohtli, este debe contar con al menos los siguientes componentes:

- Debe contar con una cámara CCD. La cual captará las imágenes obtenidas por el telescopio y las archivará para que sean analizadas posteriormente.
- Debe contar con al menos 3 objetivos para microscopio que se puedan intercambiar manualmente, así obtener distintas ampliaciones.
- Debe contar con 6 filtros dicróicos puedan intercambiar manualmente, así obtener distintas ampliaciones.

4.3.1.1.5 Interfaz

Para su manejo e interacción con el usuario, el interferómetro de motas, Tohtli contará con una PC portátil, adecuada a las necesidades del proyecto; la cual es la encargada de almacenar las imágenes obtenidas por la cámara CCD y analizarlas.

4.3.1.2 Requerimientos Físicos

4.3.1.2.1 Simplicidad

Debe ser de concepto, diseño, componentes y manufactura tan simples como sea posible, sin que esto afecte su correcto funcionamiento dentro de los parámetros establecidos.

4.3.1.2.2 Costo

El costo total del instrumento en materiales, componentes y su manufactura no debe exceder el presupuesto proporcionado, en este caso \$30 000.

4.3.1.2.3 Tamaño y peso

Debe ser de tamaño y peso adecuados para ser portátil, sin que esto afecte su correcto funcionamiento.

4.3.1.2.4 Esfuerzo máximo permisible

En ninguna de las superficies de referencia o que se encuentren en contacto, el esfuerzo puede ser mayor al de sedancia del material. Considerando un factor de seguridad de 2.

4.3.1.2.5 Estandarización

Los componentes y las características del equipo deben ser estandarizados y de preferencia comerciales. Ya que se espera que los componentes sean intercambiables para que en un futuro pueda ser utilizado en otros telescopios.

4.3.1.2.6 Manejo

Los componentes del instrumento serán controlados manualmente.

4.3.1.2.7 Maquinado

El maquinado de los componentes y la estructura de soporte debe garantizar que está dentro de los parámetros establecidos.

4.3.1.2.8 Material

Los componentes manufacturados en el Instituto de Astronomía, deben ser maquinados en Aluminio 6061-T4.

4.3.1.3 Forma geométrica de los componentes y de la estructura

4.3.1.3.1 Concentricidad

Para garantizar las tolerancias de concentricidad de Tohtli, se debe cumplir con las tolerancias de maquinado de las superficies cilíndricas y hacer el ensamble en función de estas.

4.3.1.3.2 Perpendicularidad

El interferómetro de motas, Tohtli, debe tener superficies planas que limiten la posición e inclinación de los subsistemas a lo largo del eje óptico según las tolerancias especificadas.

4.3.2 Indicar las especificaciones de diseño

En este apartado se indican las especificaciones optomecánicas para la construcción de Tohtli, con el fin de que cumpla con los requisitos establecidos y que sea compatible con el Telescopio de 1m de Tonanzintla, Puebla, y así medir la separación angular y el ángulo de posición de estrellas dobles y múltiples con el método de Interferometría de Motas.

4.3.2.1 Especificaciones de desempeño óptico

4.3.2.1.1 Resolución

El interferómetro de Motas, Tohtli, debe tener una resolución menor a 0.023 segundos de arco a una longitud de onda de trabajo de 550 nanómetros. Es decir la resolución obtenida con este equipo será 10 veces mejor que la de un telescopio de 1m.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.1.2 Campo visual

El Interferómetro de Motas, Tohtli, debe tener un campo visual de 10 a 30 segundos de arco ("). Considerando que un pixel tiene un campo visual de 0.118 x 0.114 ["].

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.1.3 Alineación

La alineación del equipo depende de los errores de manufactura, ensamble, deformación y expansión térmica de los componentes. La suma de errores máxima para mantener alineada la cámara CCD, los objetivos y los filtros será de 20 pixeles, es decir, el desplazamiento relativo no podrá exceder los 0.166 mm.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.1.4 Tiempo de exposición

Tohtli tendrá tiempo de exposición menor a 5 minutos, durante el cual, el equipo deberá obtener 1000 imágenes, a una velocidad de 50 fotos por minuto.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.1.5 Alcance

Este instrumento tendrá la capacidad de obtener imágenes de estrellas de magnitud entre 7 y 9. Se considera que una estrella se podrá ver a simple vista si tiene una magnitud de menor a 5.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.1.6 Curvas de trabajo de Tohtli

Por ser un instrumento que combina distintos componentes ópticos, tiene su propio rango de trabajo. Según el filtro que se utilice, el interferómetro podrá captar solo determinadas longitudes de onda. A continuación se presentan las curvas características de Tohtli.

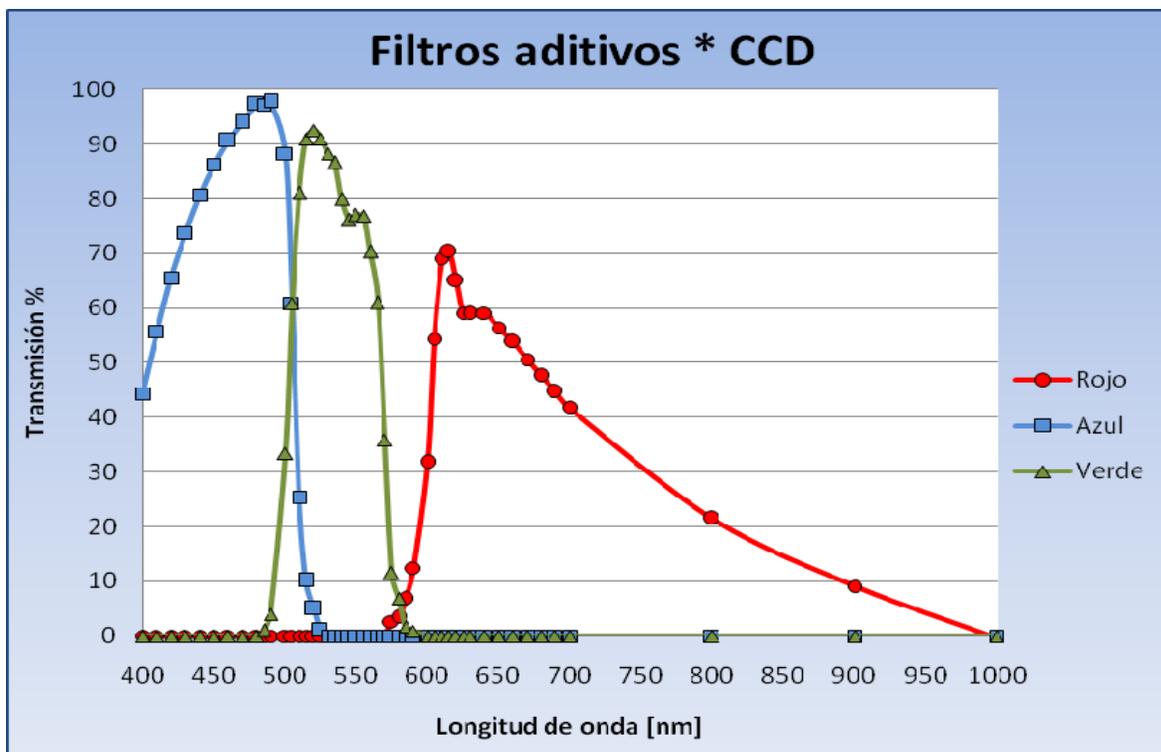


Tabla 4.1 Curva de trabajo de Tohtli

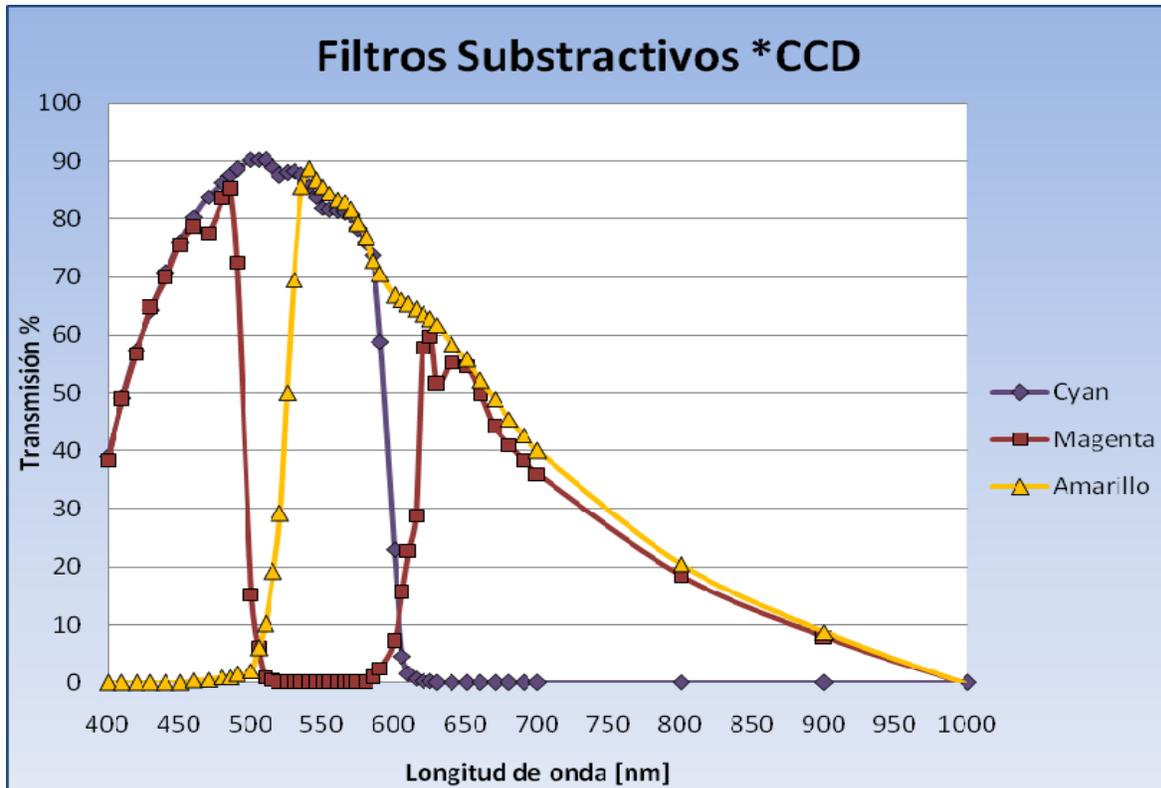


Tabla 4.2 Curva de trabajo de Tohtli

4.3.2.2 Especificaciones mecánicas

4.3.2.2.1 Compatibilidad

El interferómetro de motas, Tohtli, deberá estar estandarizado bajo el Sistema Internacional (SI).

4.3.2.2.2 Elementos de sujeción

El interferómetro de motas, Tohtli, tendrá una estructura de soporte, que lo unirá con la platina del telescopio y se encargará de que es instrumento no se mueva.

Para el ensamble del sistema, se utilizarán tornillos allen de cabeza cilíndrica y ángulos de acero para sujetar las barras de la estructura de soporte. Además se utilizarán tolerancias de fijación para las piezas que van empotradas, sin tornillos.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.2.3 Tolerancias de posición

Para garantizar las tolerancias de posición, la suma de los errores, no sobrepase los 0.166 mm.

Estos errores son:

- Repetitibilidad de ensamble
- Tolerancias de maquinado
- Expansión térmica del instrumento
- Deformación máxima debido al peso

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.2.4 Perpendicularidad

El valor de la perpendicularidad por fabricación entre las superficies de referencia debe ser $90^\circ \pm 0.2$ mm/m.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.2.5 Planitud

La planitud de las superficies de referencia (pico a valle) debe ser menor a ± 0.1 mm/m.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.2.6 Tiempo operativo o ciclo de trabajo

El tiempo de operación del Interferómetro de motas, Tohtli, no está especificado, pero debe de pasar al menos un año sin mantenimiento, y en general este debe ser menor a 8 horas.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.2.7 Posiciones de las componentes

Todos los componentes del sistema deben estar alineados de tal forma que el haz de luz cruce por el centro del sistema de lentes hasta llegar a la CCD. El descentrado de los componentes no debe ser mayor a los 166 μ m.

Posición de los componentes con referencia al centro del lente de la cámara CCD.

Componente	X mm	Y mm	Z mm
Lente de la cámara CCD	0	0	0
Lente frontal del Objetivo Varifocal	-0.0715	0	0
Filtro a utilizarse montado en la rueda de filtros	-0.1115	0	0
Lente frontal del objetivo para microscopio a utilizarse montado en la rueda de objetivos	-0.2315	0	0

Tabla 4.3 Posición de los componentes

Tolerancias de descentrado.

Componente	X m	Y m	Z m	Total m
Lente de la cámara CCD	$\pm 2,0E-05$	$\pm 2,0E-05$	$\pm 2,0E-05$	3,464E-05
Filtro a utilizarse montado en la rueda de filtros	$\pm 3,0E-05$	$\pm 3,0E-05$	$\pm 3,0E-05$	5,196E-05
Lente frontal del objetivo para microscopio a utilizarse montado en la rueda de objetivos	$\pm 1,0E-05$	$\pm 1,0E-05$	$\pm 1,0E-05$	1,732E-05
			Total	1,039E-04

Primero, el haz de luz debe entrar por el objetivo para microscopio, el cual ampliara la imagen según sea el aumento del objetivo utilizado. Para ello se montan los objetivos en el sistema de la rueda de objetivos diseñado.

Paralela a la rueda de objetivos, se coloca el sistema de la rueda de filtros. Se debe posicionar el filtro a utilizar concéntrico al objetivo utilizado, y concéntrico al objetivo varifocal.

El objetivo varifocal, deberá estar ensamblado a la Cámara CCD, y estará sostenido por el soporte diseñado para tal objetivo.

La cámara por su parte estará colocada y sujeta a una base de aluminio, cual a su vez está sujeta a la base del sistema.

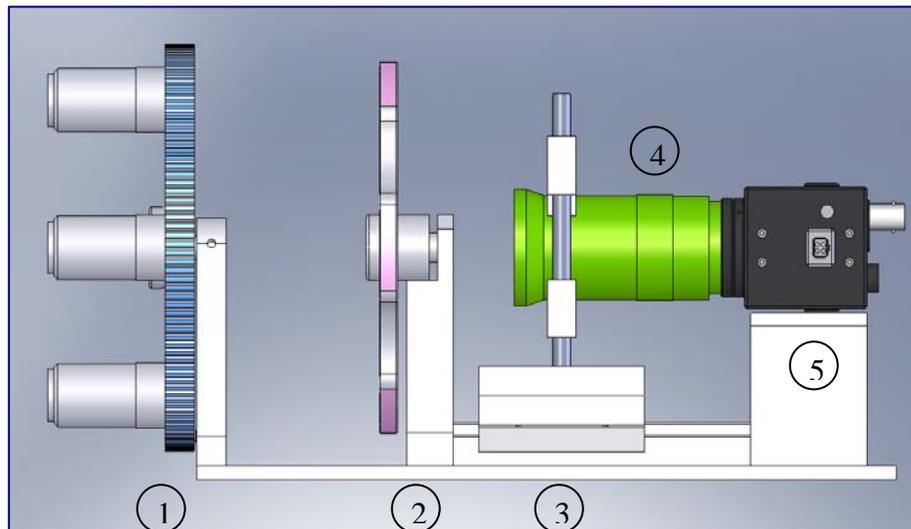


Figura 4.3 Ensamblaje de los componentes. (1) Rueda de objetivos, (2) Rueda de filtros, (3) Soporte de estructura varifocal (4) Objetivo varifocal, (5) Cámara CCD

4.3.2.2.8 Repetibilidad de ensamble

Los errores introducidos al ensamblar y desensamblar el equipo deben ser considerados como una fuente adicional en los errores de alineación. Y estos no deben exceder 0.100 ± 0.060 mm.

Para asegurarnos que esta condición se cumpla, para el ensamble se utilizarán superficies de referencia y se calibrará con metrología.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.3 Especificaciones físicas

4.3.2.3.1 Peso total del equipo

Para que el Interferómetro de Motas, pueda considerarse portátil, no debe exceder los 20Kg de peso, ya incluidos todos los componentes y la carcasa. Dato establecido por Norma oficial mexicana NOM-006-STPS-2000.³⁰

Fuente: Norma oficial mexicana NOM-006-STPS-2000

4.3.2.3.2 Tamaño total del equipo

El tamaño total del equipo deberá ser del tamaño adecuado para poder transportarse con facilidad y poderse ensamblar a la platina del Telescopio de 1m de Tonanzintla, Puebla. Por lo que Tohtli será de 0.185x0.150x0.350 m.

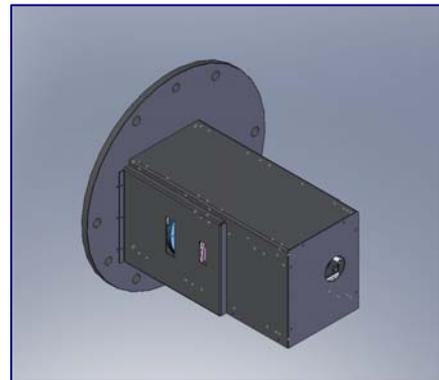


Figura 4.4 Tohtli

4.3.2.3.3 Envolverte

El equipo contará con una envolverte que lo proteja de la luz y de las inclemencias del ambiente, como polvo o agua. Dicha envolverte deberá ser de lámina y la cara interior deberá estar pintada de color negro, para evitar que la luz se refleje en las paredes del instrumento.

4.3.2.4 Especificaciones ambientales

4.3.2.4.1 Temperatura de operación.

El Interferómetro de motas podrá ser utilizado en un rango de temperatura entre -5°C y 25°C .

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.4.2 Corrosión

El equipo y sus componentes deben ser resistentes a la corrosión y a las condiciones de trabajo, como polvo y/o agua, por lo que se utilizarán componentes de aluminio y de acero cold rolled recubierto con pintura.

Fuente: Grupo de diseño e instrumentación del Instituto de Astronomía, UNAM

4.3.2.5 Especificaciones de materiales

4.3.2.5.1 Material de los soportes y bases

Las bases y los soportes del Interferómetro de Motas, deben de estar fabricadas con un material que soporte las condiciones de trabajo del instrumento, además de ser ligero y de bajo costo.

Por lo que el material utilizado en la mayor parte de las piezas manufacturadas es:

Aluminio 6061-T4

Esto es debido a las buenas propiedades de este material.

- Ligero, peso específico 2.7 gr/cm^3 - aproximadamente la tercera parte de peso que el cobre o el acero.
- Muy resistente a la corrosión.
- Excelente reflector del calor y de la luz.
- No magnético, propiedad muy valiosa alrededor de elementos electrónicos sensibles.
- No tóxico.
- Tiene un coeficiente de dilatación térmica de $0.0236 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ en el rango de 20°C a 100°C .
- Módulo de elasticidad 68.9 GPa.
- Límite de cedencia 145 MPa.
- Es de bajo costo con respecto a otros materiales.
- Es significativamente más maquinable que otros materiales metálicos.
- Esta es probablemente la aleación de aluminio tratable térmicamente, de mayor disponibilidad.

Fuente: <http://www.matweb.com>

4.3.2.5.2 Material de la carcasa

La carcasa del Interferómetro de Motas debe proteger a los componentes de la luz y del ambiente, pero sin interferir en su funcionamiento, por ello, se utilizará una lámina de 2 mm de espesor de:

Acero AISI 1020, cold rolled

Propiedades.

- Densidad 7.87 gr/cm³
- Módulo de elasticidad 205 GPa.
- Límite de cedencia 350 MPa.
- No tóxico.
- Tiene un coeficiente de dilatación térmica de 11.7 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ en el rango de 20°C a 100°C.
- Es de bajo costo con respecto a otros materiales.
- Es significativamente más maquinable que otros materiales metálicos.

Fuente: <http://www.matweb.com>

4.4 Diseño conceptual

A partir de otros interferómetros de motas construidos y las especificaciones establecidas para el interferómetro de motas, Tohtli, se inició el proceso de diseño.

Para esto se requirió utilizar conocimientos de diseño mecánico y de óptica, los cuales se adquirieron a través de investigación en libros y artículos científicos, los cuales se enlistan en el apartado de Referencias.

4.4.1 Generación de ideas

Para la generación de ideas, el principal objetivo fue el de cumplir con todos los requerimientos del usuario, así como con las especificaciones planteadas. Se plantean las posibles soluciones para cada uno de estos requerimientos, y se corroboran con algunos cálculos analíticos o aproximados de su desempeño.

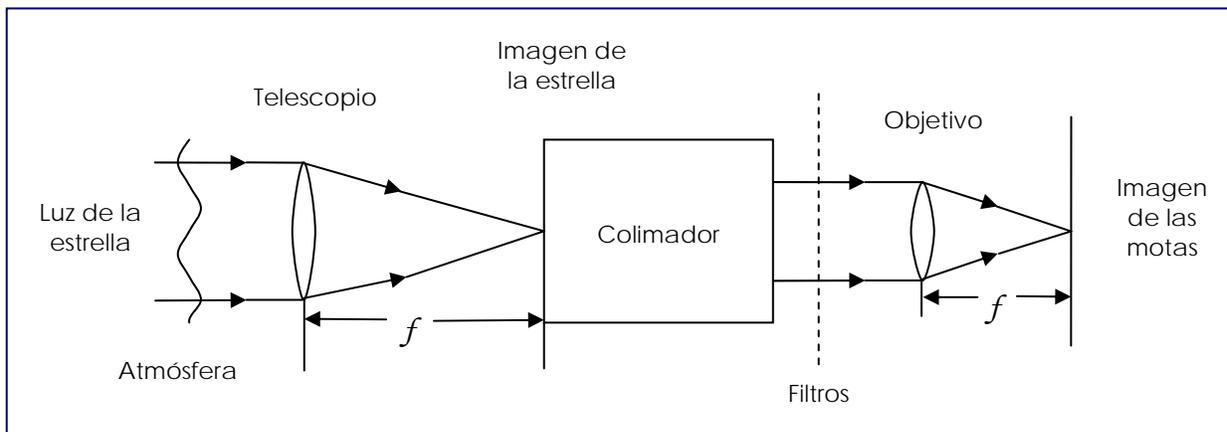


Figura 4.5 Diagrama del funcionamiento de Tohtli

Primero, se dividió el Interferómetro en partes, cada una de las cuales cumple con una función en especial. Una vez que están debidamente identificadas, es posible asociar a cada una de las funciones, las especificaciones correspondientes.

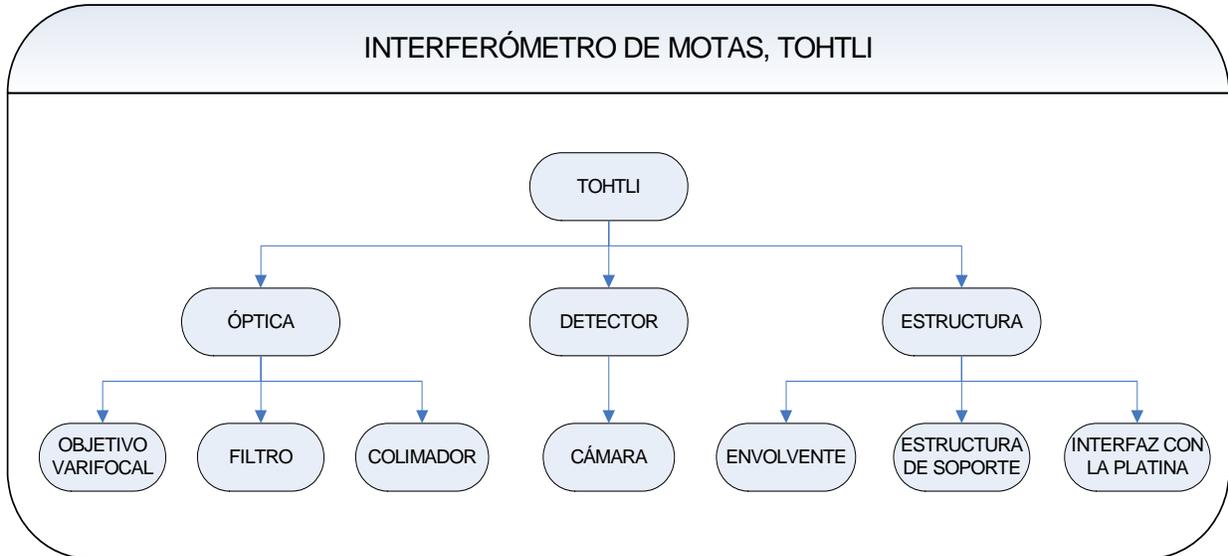


Figura 4.6 Diagrama de árbol del interferómetro de motas, Tohtli

En base a esta descomposición, se buscó una configuración que cumpliera con las funciones de un interferómetro de motas.

4.4.2 Evaluación de ideas

Para esta etapa, se hizo un análisis crítico de las ideas generadas y de las ideas tomadas de proyectos similares.

Cada idea tuvo que responder a las necesidades y las especificaciones planteadas, y para comprobarlo fue necesario utilizar técnicas de evaluación de ideas par obtener la que mejor cumpliera con los objetivos planteados.

Se utilizaron matrices de decisión, hojas de cálculo de Excel, programas de CAD, y análisis por elemento finito en ALGOR.

Matrices de decisión.

Las matrices de decisión son elementos de comparación de los factores preponderantes de las posibles alternativas.

Durante este proyecto se utilizaron varias matrices de decisión con las cuales se evaluó que componentes o morfología debía tener Tohtli.

A continuación se presentan una de las matrices de decisión utilizadas, no se descartó ninguna de las opciones propuestas, ya que estas se utilizan para ampliar la visión del problema y así encontrar la mejor solución posible.

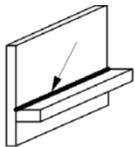
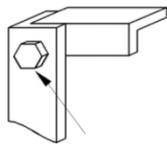
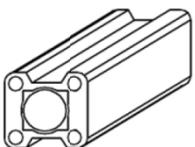
Factor	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Base estructural	 Soldado	 Atornillado	 Ensamblado
Mecanismo para manejar el sistema	Manual	Mecánico	Eléctrico
Mecanismo para Intercambio de filtros	 Montura múltiple	 Rueda de filtros	 Montura individual
Mecanismo para Intercambio de objetivos	 Mecanismo de microscopio	 Rueda de objetivos	
Cámara CCD	 WAT-120N		
Objetivo varifocal	 Eclipse	 #55-21 Edmund Optics	 Tamron

Tabla 4.4 Matriz morfológica

A las posibilidades mostradas, se les calificó según la siguiente escala, la cual fue tomada del libro "The Mechanical Design Process"²³.

El criterio es muy superior a lo establecido	+3
El criterio es mucho mejor que lo establecido	+2
El criterio es mejor a lo establecido	+1
El criterio es tan bueno como lo establecido	0
El criterio no es tan bueno como lo establecido	-1
El criterio es muy malo en relación a lo establecido	-2
El criterio está lejos de estar acorde a lo establecido	-3

La toma correcta de las decisiones hará que el diseño cumpla con el objetivo general y con los criterios de diseño.

ESTRUCTURA DE SOPORTE				
Solución	Funcionamiento	Manufactura	Bajo costo	Total
Soldado	-1	0	+2	1
Atornillado	+2	+2	0	4
Ensamblado	0	-3	0	-3

CÁMARA				
Solución	Funcionamiento	Peso	Bajo costo	Total
WAT – 120 N	+2	+3	0	5
Manufacturada en el IA	+2	-2	+1	1

MECANISMO PARA EL INTERCAMBIO DE OBJETIVOS				
Solución	Funcionamiento	Manufactura	Bajo costo	Total
Mecanismo de microscopio	+1	0	+1	2
Rueda de objetivos	+2	+1	+2	4

MECANISMO PARA EL INTERCAMBIO DE FILTROS				
Solución	Funcionamiento	Tamaño	Bajo costo	Total
Montura múltiple	0	-2	+1	-1
Rueda de filtros	+2	0	0	2
Montura individual	-2	+1	-2	-3

ENVOLVENTE				
Solución	Funcionamiento	Manufactura	Bajo costo	Total
Acero cold rolled	+2	+1	+2	5
Aluminio	+2	+1	0	3
Madera	-2	-1	+3	0

OBJETIVO VARIFOCAL				
Solución	Funcionamiento	Peso	Bajo costo	Total
Eclipse	+3	+2	0	5
Edmund Optics	+2	0	+1	3
Tamron	0	+2	+2	4

Tablas 4.5 Resultados de la evaluación de las propuestas de diseño.

Con los resultados anteriores se decidió cuales serían los componentes y los materiales adecuados para ser utilizados en el interferómetro de motas, Tohtli.

Además hubo que seleccionarse una configuración que brindara rigidez y estabilidad del sistema, sin que aumentara mucho el peso del mismo. Y al final se decidió por la configuración propuesta en la figura (4.7), ya que ésta brindaba las características establecidas y además era de fácil manufactura y mantenimiento.

Quality Function Deployment (Q.F.D.)

Es una metodología, desarrollada en Japón en 1970, que permite sistematizar la información obtenida del usuario y traducirla en los requisitos técnicos apropiados para cada etapa de desarrollo del proyecto y de producción.

Para este proyecto, se consideró no adecuado elaborar una QFD, ya que aunque este es un método de desarrollo de las especificaciones de un producto, esto se hace desde el punto de vista del cliente, de la comparación con otros productos en el mercado y de la calificación que se le da a cada objetivo del proyecto.

Además, este método toma tiempo en completarse y requiere de un equipo de trabajo que brinde los datos para la elaboración de la QFD. Cosas con las que no se contaba.

Como Tohtli es un producto único, del cual por el momento solo se tiene un cliente, que en este caso es el Dr. Valeri Orlov, y la comparación con otros productos en el mercado es difícil, ya que la mayoría son solo para la investigación; el desarrollo de la QFD se volvía muy complicado y el método está sobrado para el problema expuesto, el cual estaba ya debidamente delimitado.

4.4.2.1 Costo

La toma de decisiones en componentes, materiales y tolerancias, depende en gran medida del costo final del producto, además de que para este instrumento una de los requerimientos es que sea de bajo costo, por lo que se elaboró una tabla en Excel que nos fuera calculando el costo total del instrumento, y así poder compararlo con otros proyectos similares.

Cotización para el interferómetro de motas, Tohtli (Mayo 2007)

Item		Stock #	Quantity	Precio (\$)	Price (USD)
Camera Astrocom Watec	Astrocom	WAT - 120N	1	8800	800.00
Manual Iris Vari-focal lens	Eclipse	ECL - 660 MIV	1	2750	250.00
Rotating Filter Wheel System	Edmund Optics	NT56 - 658	1	2189	199.00
Filter Dichroic Set 25mm DIA Additive (Red, Green,Blue)	Edmund Optics	NT52-546	1	715	65.00
Filter Dichroic Set 25mm DIA Subtractive (Cyan, Magenta, Yellow)	Edmund Optics	NT52-549	1	715	65.00
Objective Micro 100X DIN Plan	Edmund Optics	NT43 - 909	1	2057	187.00
Objective Micro 40X DIN Plan	Edmund Optics	NT43 - 908	1	1617	147.00
Objective Micro 10X DIN Plan	Edmund Optics	NT43 - 907	1	902	82.00
Objective Micro 4X DIN Plan	Edmund Optics	NT43 - 906	1	682	62.00
Deep groove ball bearing, single row	SKF	628*	1		
Unthreaded Through-Hole Guide Block	McMaster-Carr	6709K11	1	1089	99.00
Rail	McMaster-Carr	6709K33	150mm	445.5	40.50
Placa de Aluminio 1/4" 0.91x1.22 m	Metales Diaz S.A.		1	1215	
Placa de Aluminio 1/2" 0.91x1.22 m	Metales Diaz S.A.		1	2581.5	
Barra cuadrada de 1/2"	Metales Diaz S.A.		2m	65	
Lámina negra					
Ball Plunger	McMaster-Carr	84835A13	1	28.82	2.62
Eje de acero 1/4"	Metales Diaz S.A.		1m	22.55	
Eje de acero 3/8"	Metales Diaz S.A.		1m	295	
Tornillos Allen Cabeza cilíndrica de 3mm (25, 20, 16 mm)					

Total	26169.4	1,996.50
--------------	----------------	-----------------

Tabla 4.3 Costo aproximado del Interferómetro de Motas, Tohtli

Con este presupuesto total del sistema se cumple con la especificación de bajo costo establecida, ya que en el mercado, un instrumento similar a Tohtli, considerando solo los lentes, oscila alrededor de los \$2000.00 dólares.

4.4.3 *Determinación del concepto final*

La configuración final propuesta es la que se observa en la siguiente figura, donde se puede identificar las partes que la conforman: Una unidad de cámara, un colimador, un sistema de filtros, una estructura de soporte, una interfaz con la platina del telescopio y una envoltente.

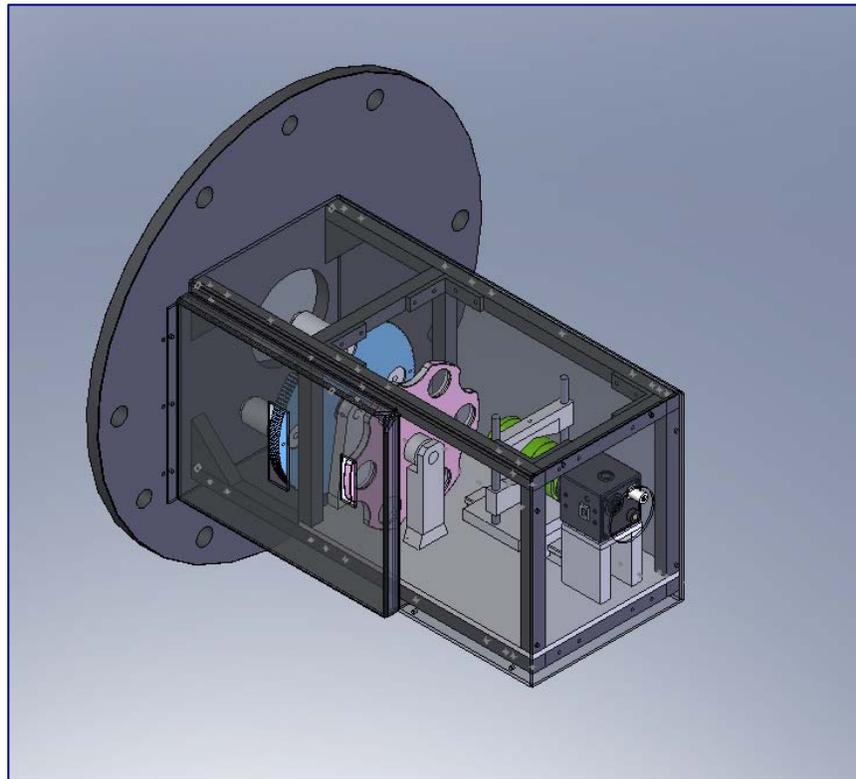


Figura 4.7 Tohtli

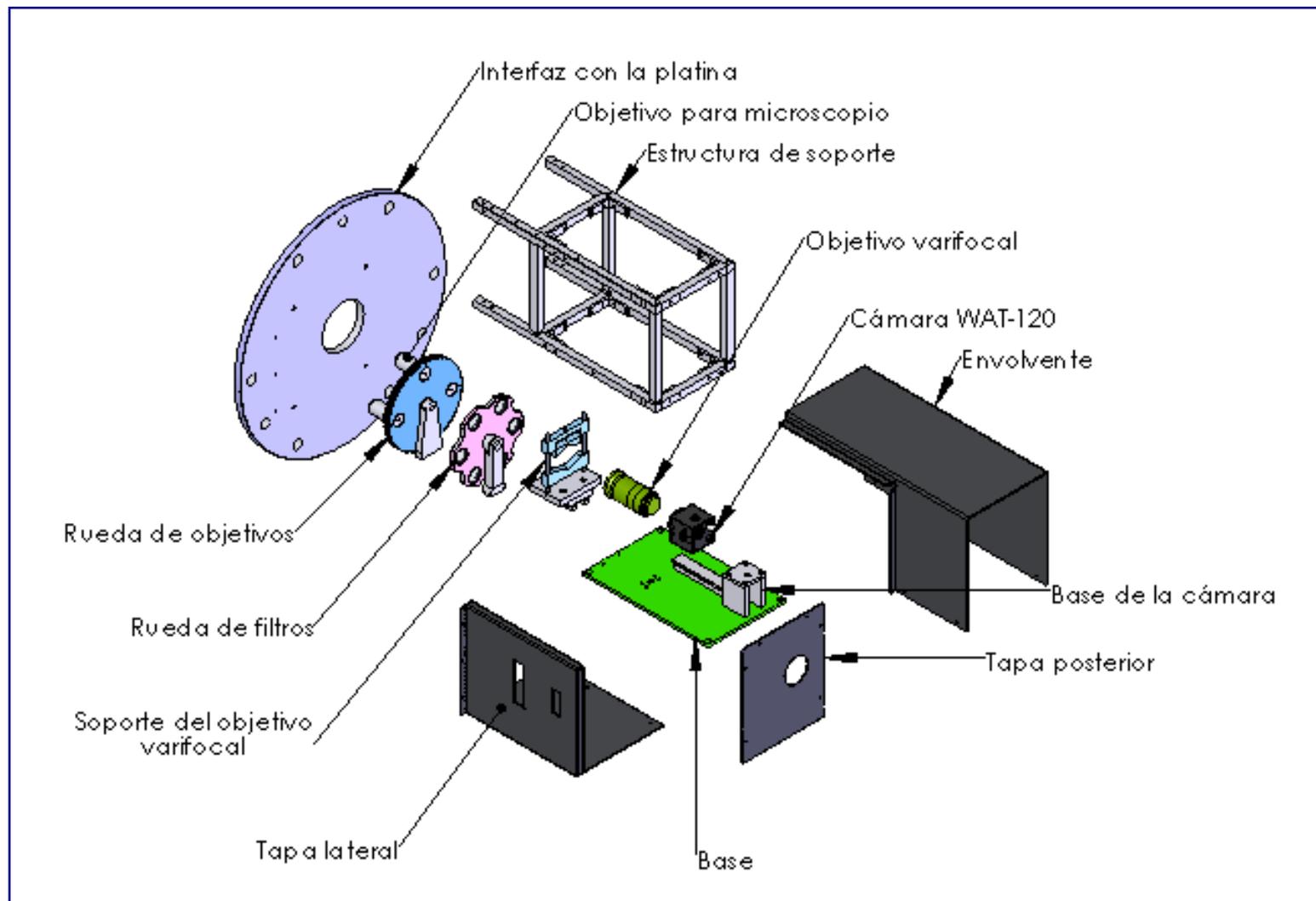


Figura 4.8 Vista en explosivo del Tohtli

4.5 Diseño preliminar

En esta sección, se describe el diseño preliminar del Interferómetro de Motas, Tohtli, basándose en todas las decisiones tomadas durante el diseño conceptual. Se define la configuración total del sistema y de los componentes que lo conforman, se especifican los materiales y se generan los diferentes planos de las piezas a manufacturar.

4.5.1 Descripción general del sistema

Tohtli, es un interferómetro de motas de configuración sencilla, que puede fabricarse utilizando componentes y manufactura de bajo costo, pero que nos permite la adquisición de imágenes de corta exposición en las cuales el efecto de la distorsión del haz de luz al pasar por la atmósfera es congelado, consiguiendo así imágenes de alta resolución.

Tohtli se utilizará para la medición del ángulo de separación y posición angular de sistemas de estrellas binarias o múltiples. Para lo cual se ensamblará a la platina del Telescopio de 1m de Tonantzintla, Puebla; con la opción de que a futuro pueda utilizarse en otros telescopios.

El instrumento cuenta con dos sistemas: uno óptico y un estructural. Los cuales a su vez están divididos en varios subsistemas: la cámara, el colimador, los filtros, la estructura de soporte, la interfaz con la platina del telescopio y la envolvente del instrumento.

4.5.2 Componentes que integran el sistema

4.5.2.1 Componentes ópticos

El equipo debe contar con los siguientes componentes ópticos

- Cámara Astrocom Watec WAT-120N

Esta cámara es una CCD, de 44 mm de alto x 44 mm de ancho x 44 mm de espesor, lo cual la hace muy adecuada para este instrumento. Tiene un campo visual de 752 x 582 Pixel, y cada pixel es de 8.6 x 8.3 μm .

Se ensambla a una base de aluminio y se conecta a una computadora para el

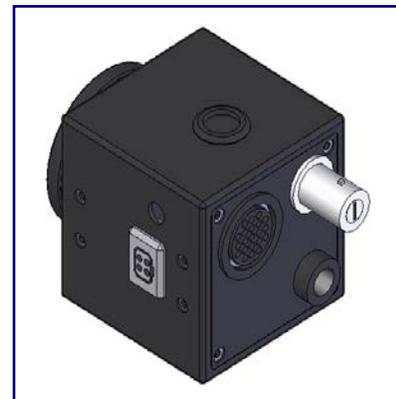


Figura 4.9 Cámara Astrocom Watec WAT-120N

almacenamiento y análisis de datos. Es compatible con monturas C y CS, con lo que se le pueden ajustar distintos objetivos y así tener una amplia gama de aplicaciones.

La cámara será el punto de referencia de todo el sistema, ya que es la encargada de tomar las imágenes.

- Objetivo Varifocal Manual Marca Eclipse ECL-660MIV
 - Formato de imagen 1/3"
 - 6-60mm Lentes varifocales
 - Iris manual
 - F1.6
 - Ángulo de visión 49.3~4.7 degrees

Con este objetivo varifocal se permite un correcto enfoque. Este ajuste se hace manualmente.

Va ensamblado directamente a la cámara lo que nos evita errores ocasionados por alguna falla en la alineación. Tiene una montura CS con lo que se adecua a la cámara utilizada, además de ser de tamaño compacto, dimensiones 61.5x46mm, y de solo pesa 171g.



Figura 4.10 Objetivo Varifocal Manual Marca Eclipse ECL-660MIV

- 4 Objetivos para Microscopio Estandarizados de grado comercial, Planos Edmund Optics. 100x, 40x, 10x y 4x.

Para tener la posibilidad de hacer cambios en los aumentos del instrumento, se utilizarán estos cuatro objetivos para microscopio de 4x, 10x 40x y 100x; los cuales serán montados en la rueda de objetivos para su fácil manejo.

El objetivo utilizado, deberá estar correctamente alineado a la cámara, ya que como su función es la ser el colimador del instrumento, el haz resultante debe entrar paralelo y concéntrico a la cámara.



Figura 4.11 Objetivos para Microscopio Estandarizados, Edmund Optics.

Descripción	Tipo	Magnificación	Focal Length (mm)	Distancia de trabajo (mm)	N.A.
Objetivo MICRO	Plano	100X DIN	2.74	0.22	1.25
Objetivo MICRO	Plano	40X DIN	4.29	0.82	0.65
Objetivo MICRO	Plano	10X DIN	15.37	2.21	0.25
Objetivo MICRO	Plano	4X DIN	28.91	17.91	0.10

- Una rueda de objetivos, con capacidad para 4 objetivos para microscopio planos Edmund Optics, manufacturada en el Instituto de Astronomía UNAM.

Está elaborada de aluminio 6061, y se ensambla a un sistema de base y eje, que le sirven para ser sujeta a la base del interferómetro.

En ella se colocan los objetivos para microscopio, y tiene la capacidad de girar para cambiar el objetivo a utilizar.

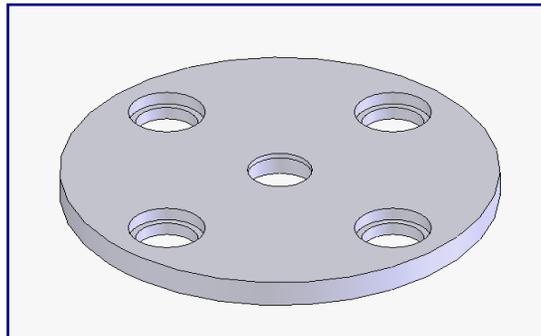


Figura 4.12 Interfaz con la platina.

- 6 Filtros Dicroicos Edmund Optics de 25 mm de diámetro.
 - Set aditivo de Rojo, Verde y Azul.
 - Set subtractivo de Cian, Magenta y Amarillo.

Estos filtros se utilizarán como selectores de la longitud de onda de la luz emitida por la estrella.

Estarán colocados en la rueda de filtros para si fácil manejo e intercambio.

Los filtros interferométricos son los que reciben la luz colimada que sale del objetivo para microscopio y la filtran según su longitud de onda.



Tabla de especificaciones	
Material	Float glass
Tolerancia dimensional	+0/-0.2mm
Espesor	2mm nominal
Apertura	>=85%
Ángulo de incidencia	0° (normal)
Rango de temperatura	Max. 100°C

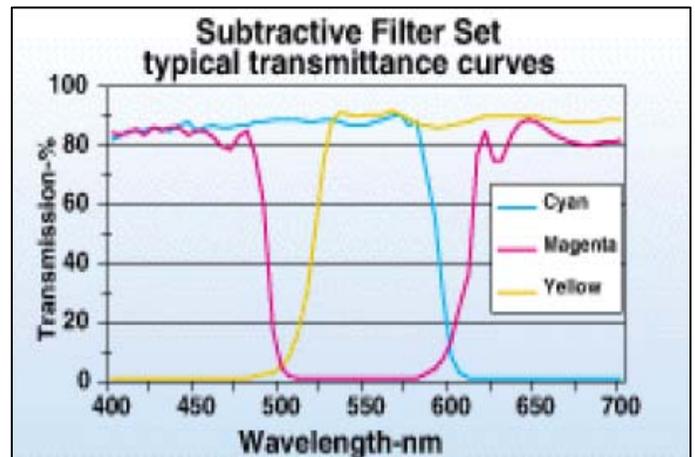
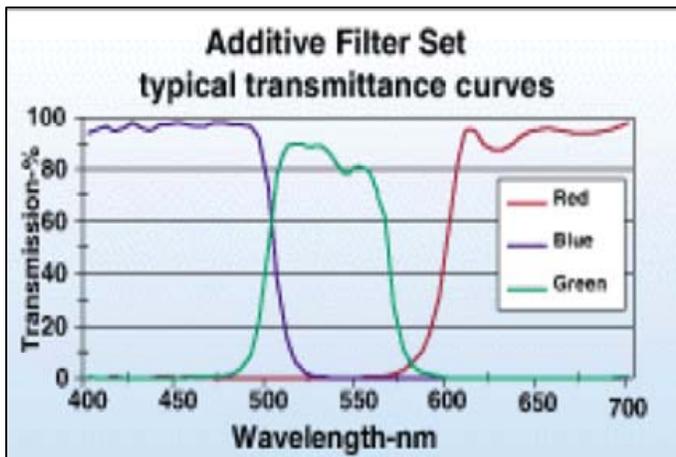


Figura 4.13 Filtros dicróicos

- Rueda de filtros, con capacidad para 6 filtros de 25mm Edmund Optics.

En esta rueda se colocan los filtros interferométricos para que así sea más sencillo cambiarlos según las necesidades de la observación.

Tiene la capacidad de girar manualmente para cambiar el filtro a utilizar, además cuenta con un soporte para fijarla en la base del interferómetro.



Figura 4.14 Sistema de rueda de filtros, Edmund Optics

4.5.2.2 Componentes mecánicas

El equipo debe contar con las siguientes componentes mecánicas, las cuales dan forma al instrumento y sujetan sus componentes de tal forma que se cumplan con las especificaciones de alineación y forma del sistema.

Los componentes manufacturados en los talleres del Instituto de Astronomía de la UNAM, estarán fabricados con Aluminio 6061, utilizando una máquina CNC adecuada a los requerimientos de manufactura.

- Soportes para la cámara, diseñado y manufacturados en el Instituto de Astronomía de la UNAM.
- Soporte para el objetivo varifocal, diseñado y manufacturados en el Instituto de Astronomía de la UNAM.

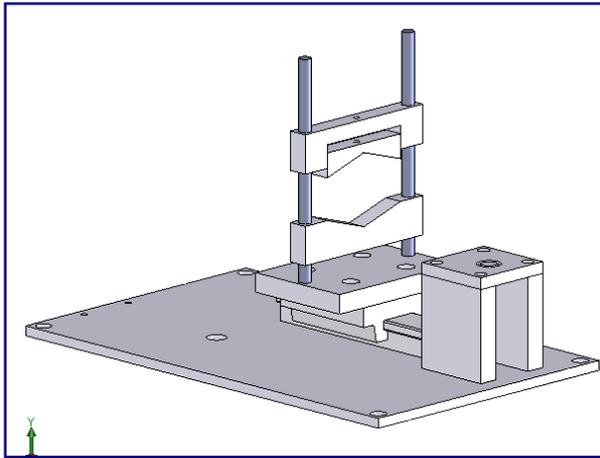


Figura 4.15 Soporte para el objetivo varifocal

- Rueda de objetivos, diseñada y manufacturada en el Instituto de Astronomía de la UNAM.
- Soporte para la rueda de objetivos, diseñado y manufacturado en el Instituto de Astronomía de la UNAM.
- Sistema de rueda de filtros. Edmund Optics.
- Elemento de soporte de todo el sistema, diseñado y manufacturado en el Instituto de Astronomía de la UNAM.
- Interfaz con la platina del telescopio de 1m de Tonantzintla, Puebla, diseñada y manufacturada en el Instituto de Astronomía de la UNAM.

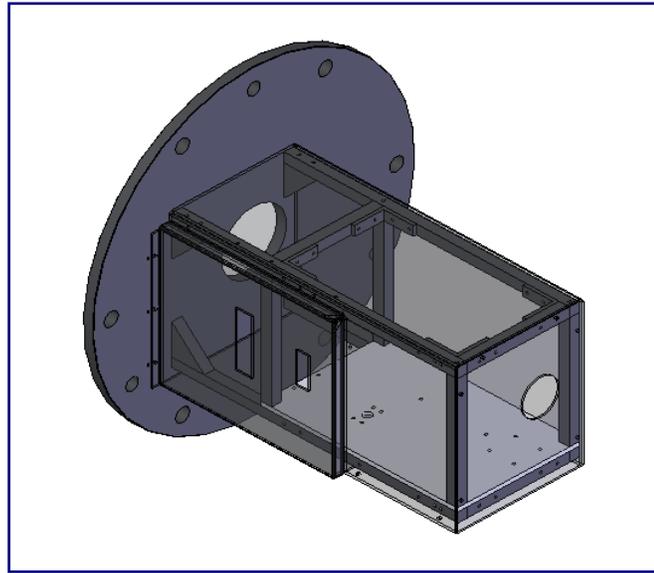


Figura 4.16 Estructura de soporte

- Envoltente de lámina negra (cold rolled), con un recubrimiento negro por dentro, con lo cual se impide que la luz se refleje en las paredes del instrumento.

4.5.3 *Peso estimado*

El peso estimado de Tohtli se calculó a partir del peso de cada uno de sus componentes (ver Tabla 4.6).

Componente	Peso [Kg]	Material
Cámara WAT-120	0.150	(de fabrica)
Objetivo Varifocal	0.171	(de fabrica)
Soporte del objetivo	0.4975	Aluminio 6061
Rueda de Objetivos	0.4575	Aluminio 6061
Objetivos para microscopio (4)	0.190	(de fabrica)
Rueda de filtros	0.2602	(de fabrica)
Filtros dicroicos (6)	0.0135	Substrato de vidrio
Base	0.480	Aluminio 6061
Soporte de la cámara	0.6108	Aluminio 6061
Estructura de soporte	1.2173	Aluminio 6061
Envoltente	5.3074	Acero cold rolled
Interfaz con la platina	3.739	Aluminio 6061
Peso total	13.0942	Kg

Tabla 4.6 Peso aproximado de Tohtli

Además se debe añadir el peso de la tornillería, cables de la CCD y el peso de la PC portátil a utilizar, con lo que se le añadiría aproximadamente 3 Kg al peso del equipo.

Considerando un factor de seguridad de 1.5. El peso total de Tohtli es menor a 20 kg, por lo que se cumple completamente la especificación establecida.

4.5.4 Planos y explosivo

Para una adecuada manufactura de los componentes del sistema, se generan planos de conjunto con dimensiones generales pero que aporten los detalles suficientes para justificar su producción, además aportan información sobre las especificaciones del componente, y su relación con los demás elementos del sistema.

4.5.5 Proceso de manufactura

Debido a que uno de los objetivos de este proyecto es tener un equipo de bajo costo y fácil manufactura, el diseño de Tohtli comprende elementos ópticos, mecánicos y electrónicos comerciales, cuyo bajo costo no amerita su fabricación dentro del Instituto de Astronomía de la UNAM.

Pero además se han incluido piezas diseñadas específicamente para este instrumento, por lo cual, es necesario fabricarlas en el taller mecánico del Instituto de Astronomía de la UNAM. La precisión que requieren estas piezas, ameritan su fabricación mediante el proceso de manufactura por control numérico, y la utilización de las herramientas de CAD/CAM. La precisión de las máquinas CNC con las que cuenta el Instituto es de $\pm 10 \mu\text{m}$.

Además se utilizarán procesos de doblado y cizalladura para la fabricación por pailería de la envolvente de Tohtli.

4.5.6 Ensamble y desensamble

Para lograr el ensamble de los componentes que integran este interferómetro, primero se realizó un modelo tridimensional CAD de estos y posteriormente se diseñaron los mecanismos para sujetarlos. Utilizar CAD nos permitió verificar cualquier interferencia entre ellos y el camino de la luz a través del instrumento.

4.5.6.1 Acople de los subsistemas

Cada subsistema se acopla de manera independiente. A continuación se describe cada uno de los casos:

4.5.6.1.1 Cámara

Componentes que abarca este subsistema.

- Cámara Astrocom Watec WAT - 120N.
- Objetivo Varifocal Manual Iris.
- Soporte de la cámara
- Soporte del objetivo varifocal.

La cámara WAT-120N, se ensamblará en el soporte de la cámara a través de una rosca en dicho soporte, luego se colocarán unos cinchos atornillados alrededor de la cámara para sujetarla al soporte y así evitar que se mueva conforme se va moviendo el sistema,

A la cámara WAT-120N se le acopla el Objetivo Varifocal, asegurando que esté bien ajustado y permita su correcta manipulación manual sin que se afecte el ensamble.

El soporte para el objetivo varifocal, está compuesto por un riel, un carrito, dos bases y un sujetador. Sobre el carrito se coloca una de las bases y las guías, y esto se atornilla al carrito, el cual a su vez se coloca en el riel.

4.5.6.1.2 Filtro

Componentes que abarca este subsistema.

- 6 Filtros Dicroicos
- Rueda de filtros.
- Soporte de la rueda de filtros.

En la rueda de filtros, se colocan los filtros dicroicos y se detienen con los anillos retenedores. Luego, la rueda de filtros se ajusta al soporte de la rueda de filtros, cerciorándose de que el ajuste sea adecuado y que se respeten las condiciones de perpendicularidad entre el eje y la rueda de filtros, y paralelismo entre la rueda de filtros y el soporte,

4.5.6.1.3 Colimador

Componentes que abarca este subsistema.

- 4 Objetivos para microscopio
- Rueda de objetivos.
- Soporte de la rueda de objetivos.

Los Objetivos para microscopio se ensamblan en la rueda de objetivos, por medio de rosca. Y a su vez, la rueda de objetivos se monta en el soporte de la rueda de objetivos, cerciorándose de que se cumplan las condiciones de perpendicularidad entre el eje y la rueda de objetivos, y de paralelismo entre la rueda de objetivos y el soporte.

Además, si se cumple con las especificaciones de maquinado, se asegurará que también se cumplen con las especificaciones de concentricidad entre los objetivos para microscopio y el barreno correspondiente de la rueda de objetivos.

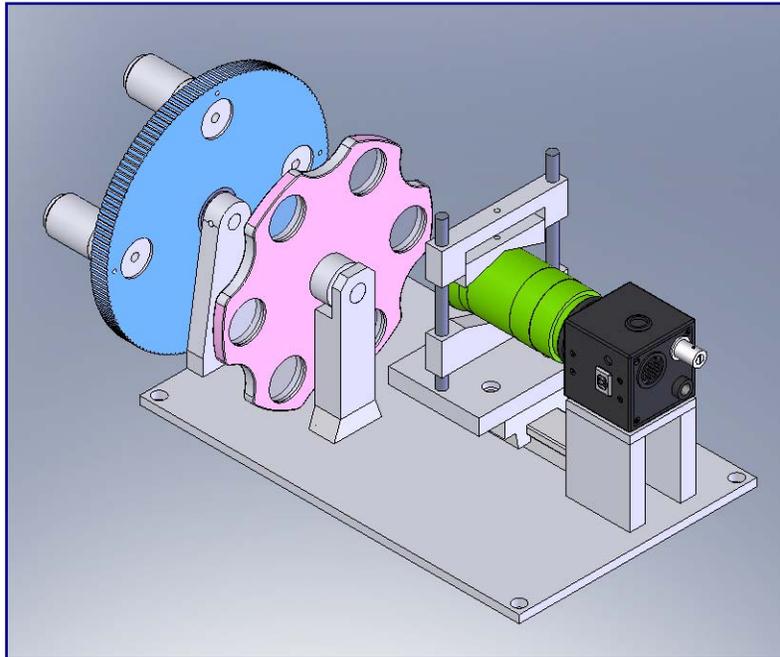


Figura 4.17 Ensamble de los componentes

4.5.6.1.4 Estructura de soporte

Componentes que abarca este subsistema.

- Estructura.
- Base.
- Interfaz cuadrada.

La estructura cuenta con cuatro barras largas, que se colocarán paralelas y serán sujetadas con las barras cortas, formando así un prisma cuadrangular. Las barras se sujetarán con tornillos allen, y serán reforzadas con ángulos de aluminio, lo que a su vez garantizará el paralelismo y perpendicularidad de las barras.

La base el interferómetro será ensamblada en las barras que cuentan con los ejes correspondientes maquinados en un extremo, asegurándose que la cara superior de la base quede viendo hacia el interior del sistema. Luego se colocarán las demás barras para formar el prisma rectangular explicado en el párrafo anterior.

En el extremo delantero de las barras largas, se colocará la interfaz cuadrada, alineada según los barrenos de su superficie. Y se colocarán los soportes triangulares, con lo que se garantizará que las piezas sean perpendiculares a la interfaz cuadrada y que se tenga un buen soporte de la estructura.

4.5.6.1.5 Envolvente

Componentes que abarca este subsistema.

- Envolvente.
- Tapa lateral.
- Tapa posterior.

La envolvente se atornillará a las barras de la estructura de soporte, utilizando tornillos y la forma de la envolvente para cerciorarse que esté bien posicionada.

La tapa posterior, de igual manera, se atornillará en la parte posterior de la estructura de soporte, guiándose en los barrenos del sistema para tener una correcta colocación.

La tapa lateral cuenta con pestañas que permitirán su ensamble sin necesidad de utilizar tornillos, lo cual nos permite un fácil ensamble y desensamble cada vez que se requiera cambiar de filtro o de objetivo. Esta tapa se colocará en la parte izquierda del sistema y estará sostenida por la envolvente.

4.5.6.1.6 Interfaz con la platina

Componentes que abarca este subsistema.

- Interfaz con la platina.

Esta por ser solo una pieza no necesita de un ensamble en especial, solo será necesario garantizar por medio de la manufactura, que los barrenos estén en la posición correcta y las que la superficie tenga una planicidad dentro de los límites establecidos.

4.5.6.1.7 Ensamble del sistema

Para ensamblar el sistema general, cada subsistema se colocará tomando como referencia la base del interferómetro, la cual debe cumplir con las especificaciones de planicidad establecidas.

Primero se colocará el soporte para el objetivo varifocal, y se sujetará con tornillos allen. Luego se colocará el subsistema de la cámara, el cual también se sujetará a la base con tornillos allen.

Después se ajustará el soporte, de tal forma que el objetivo varifocal descansa firmemente sobre la base inferior de este, y se fijará con el sujetador móvil y la base superior. Los cuales se ajustan con prisioneros allen.

Luego se colocará la rueda de filtros, y al igual que las piezas anteriores, se fijará a la base utilizando tornillos allen. Se debe verificar que la rueda de filtros cumpla con la perpendicularidad a la base del sistema establecida.

La rueda de objetivos se colocará en el lugar correspondiente y se fijará a la base utilizando tornillos allen. Se debe verificar que la rueda de objetivos también cumpla con la perpendicularidad a la base del sistema establecida.

Luego, se colocará la envolvente del sistema como se explicó en el punto IV.1.5.6.1.5 y todo se ajustará a la interfaz con la platina, guiándose con los barrenos de esta.

Todos los tornillos van embebidos a las piezas de referencia y permiten que las piezas se coloquen sobre estos tornillos. Para lograr que la integración produzca un ensamble optomecánico adecuado, las componentes no serán atornillados completamente hasta que la posición de cada una de ellas sea verificada y alineada.

Si se cumplen con las tolerancias de fabricación, se garantiza que el interferómetro de motas, Tohtli, funcione dentro de las tolerancias especificadas.

4.5.6.2 Herramientas

El ensamble y desensamble del interferómetro se realizará con la ayuda de distintas herramientas como desarmadores allen y un martillo de cabeza de goma para las partes unidas solo por ensamble.

Las partes unidas con tornillos allen, tendrán un apriete tal que permita unir de forma desmontable las dos piezas a unir, sin lastimarlas pero que queden bien fijas.

La inevitable imprecisión de los procedimientos de mecanización hace que una pieza no pueda ser obtenida exactamente de acuerdo con las dimensiones establecidas, por lo que a las partes unidas solo por ensamble, se les necesita tolerar una cierta variación de la dimensión real, compatible con un correcto funcionamiento de la pieza, en este caso se considera una tolerancia de $\pm 10\mu\text{m}$.

4.5.6.3 Repetibilidad

Debido a que este sistema es posible ensamblarlo y desensamblarlo, cuando se necesite hacer algún ajuste o cambiar los componentes, se requiere que cumpla con cierto grado de repetibilidad.

La repetibilidad del ensamble del sistema depende directamente de la calidad de los maquinados. Una vez acoplado el sistema, este se revisa y rectifica hasta lograr la precisión requerida. La repetibilidad que se puede obtener en Tohtli debe ser confiable y dentro de las especificaciones establecidas.

5. CONCLUSIONES

En este capítulo se hacen comentarios respecto al proceso, y los problemas detectados durante este. Se analizan los resultados obtenidos del proyecto, y se proponen otras alternativas para la continuación de esta línea de trabajo.

5.1 Resultado

Como resultado de este trabajo, se diseñó un Interferómetro de motas, al que se nombró Tohtli, ya que en Astronomía se considera que un instrumento que no tiene nombre, no tiene vida.

Se generaron los requerimientos y especificaciones, tomando en cuenta las necesidades del usuario, para luego acotarlas y expresarlas en términos. Esta es la parte fundamental del trabajo, ya que si los requerimientos y las especificaciones no están bien definidos, se corre el riesgo de llegar a la solución adecuada al problema equivocado o que los costos y el trabajo se eleven. Además se evaluaron los procesos para ver su factibilidad en función del tiempo y costo del equipo.

El diseño preliminar de Tohtli cumple los objetivos de este proyecto y con las especificaciones y los requerimientos generados.

Las dimensiones del instrumento son 0.185m x 0.150m x 0.350m y tiene un peso total de aproximadamente 16kg, ya incluidos todos los componentes y la carcasa. Por lo que puede ser considerado portátil.

Los componentes ópticos serán controlados manualmente y la cámara CCD, lo será por una computadora portátil, cuyo software está siendo programado por el Dr. Valeri Orlov.

Estará ensamblado a la platina del Telescopio de 1m de Tonantzintla, Puebla, por medio de una interfaz de aluminio diseñada y construida en el Instituto de Astronomía de la UNAM; y tendrá la opción de que a futuro pueda utilizarse en otros telescopios.

Se logró que Tohtli fuera de configuración sencilla, y puede fabricarse utilizando componentes y manufactura de bajo costo, sin perder su eficiencia en la adquisición de imágenes de corta exposición. El costo total del equipo será menor a los \$30000 pesos.

Tiene una resolución menor a 0.113 segundos de arco, un campo visual de 88.93 x 66.43 segundos de arco y un error de alineación menor a 20 pixeles (166 μm) en las direcciones x,y,z; por lo que cumple con las especificaciones del comportamiento óptico del instrumento. Puede utilizarse para la medición del ángulo de separación y posición angular de sistemas de estrellas binarias o múltiples.

Además, al aplicar una metodología de diseño mecánico en la instrumentación astronómica, se logró alcanzar los objetivos del proyecto y se diseñó un instrumento que cumple con las especificaciones establecidas. Con lo que se demuestra la eficiencia de seguir cada una de las etapas de diseño.

5.1.1 Cálculo y elección de los componentes

Para este proyecto se utilizaron varias herramientas que permitieron verificar que se cumpliera con los requerimientos establecidos.

Para el diseño, se utilizaron herramientas CAD, CAM y CAE, que nos permiten verificar todas las interferencias de los componentes. Nos permite además tener una idea de cómo va a verse el instrumento terminado.

Para la elección de los componentes, se utilizaron manuales y catálogos comerciales, que nos permitieron elegir cuáles serían los componentes más adecuados para el proyecto, tomando en consideración costo, peso y accesibilidad.

Para la elección del diseño se tomaron en cuenta diseños realizados en otras partes del mundo como India y Rusia. Además se elaboraron matrices de comparación donde se estudiaron las posibles opciones que se tenían para la fabricación de este instrumento.

Se utilizó el software ALGOR para hacer un análisis por elemento finito donde se verificó que las especificaciones de alineación se cumplieran. Se analizó la estructura utilizando elementos rígidos y elementos viga, y según los resultados podemos concluir que los elementos rígidos son los más adecuados para realizar este análisis debido a que solo transmiten la carga y no generan un mayor peso, como lo hacen los elementos viga.

Los resultados considerados se tomaron del análisis 4, donde se eligió utilizar elementos rígidos que conforman una estructura donde los componentes se subdividen en unos más pequeños y más simples pero que representan mejor la realidad del comportamiento del sistema. Además se hizo un análisis de cómo afecta la dilatación térmica del aluminio a la alineación, considerando un gradiente de temperatura de 1°C. (ver anexo: Análisis 4 y Análisis térmico).

Los resultados obtenidos validan que Tohtli no tendrá una desviación mayor a 0.166 μm en cualquiera de las tres direcciones x, y, z.

5.1.2 *Problemas detectados*

El principal problema con el que se tuvo que lidiar fue la falta de experiencia en el diseño de instrumentos ópticos, por lo que lo primero que se tuvo que hacer, fue una vasta investigación del tema y se tuvo que plantear adecuadamente los conceptos básicos para el desarrollo de este proyecto.

El siguiente objetivo a alcanzar, fue el establecer las especificaciones que delimitaran adecuadamente el problema y que cumplieran con los requerimientos del usuario.

Además se hicieron análisis para verificar el correcto funcionamiento del interferómetro, considerando factores como la flexión de los componentes debido a su propio peso y la dilatación térmica del material. No se consideró a la vibración como un problema, ya que el sistema es de tamaño pequeño y no será sometido a pulsos, ni a movimientos rápidos.

De los resultados de estos análisis se hicieron las modificaciones correspondientes al diseño para que así se cumpliera con lo especificado.

5.1.3 *¿Y ahora qué sigue?*

Ya que se tiene el diseño conceptual y preliminar, se hará el diseño de detalle, se manufacturarán las piezas y se comprarán de los componentes ópticos necesarios, para que con ello se pueda empezar la construcción del instrumento.

Este interferómetro de motas es el segundo instrumento desarrollado en el Instituto de Astronomía de la UNAM para realizar interferometría de motas, pero es el primero que cumple con los requerimientos de bajo costo y fácil manufactura. Por lo que se recomienda que en un futuro se optimice el diseño para que tenga los menos componentes posibles sin que pierda su funcionalidad.

Además se pretende que en un futuro este instrumento pueda ser utilizado en otros telescopios, sin que sufra modificaciones importantes.

Se espera que con el Interferómetro de motas Tohtli, se pueda avanzar en el conocimiento de sistemas de estrellas, y por lo tanto del universo que nos rodea.

REFERENCIAS

- 1 Labeyrie, A., 1970, "Attainment of Diffraction-Limited Resolution in Large Telescopes by Fourier Analysing Speckle Pattern in Star Images," pp. 85-87.
- 2 Alltemir, J.M., 2006, "Diseño mecánico y técnicas de representación," España.
- 3 García, E., García, M. J., 2003, "Introducción al proyecto de Ingeniería," Buenos Aires.
- 4 Farah, A., 2000, "Diseño y Análisis Estructural De La Celda Para El Espejo Primario Del Telescopio TIM, Usando El Método Del Elemento Finito," pp. 31-90. Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- 5 Chiang, L., 2003, "Diseño Conceptual De Productos Mecatrónicos," pp. 1-6, Chile.
- 6 Ceravolo Optical Systems, 2003, "Interferometry and Telescopes".
- 7 Baldwin, J. E., 2003, "Ground Based Interferometry: The Past Decade and the One to Come," (Octubre, 2006) pp. <http://en.wikipedia.org/wiki/Interferometry>.
- 8 Baldwin, J. E., 2001, "the Application of Interferometry to Optical Astronomical Imaging," 2007(Septiembre 2006) pp. <http://en.wikipedia.org/wiki/Interferometry>.
- 9 Saha, S. K., 1999, "Performance of a Speckle Interferometer," India.
- 10 V. G. Orlov, V. V. Voitsekhovich, L. J. Sánchez, F. Garfias, 2007 "First Speckle Interferometry Measurements of Binary Stars at the OAN-Tonantzintla.
- 11 Orlov, V., 2006, "Digital Speckle Interferometer," (Octubre 2006) pp. http://www.sao.ru/mavr/speckle/dsi_eng.html.
- 12 Hecht, E., 1990, "Optics," Ed. Addison Wesley, EU,.
- 13 Saha, S. K., 1999, "Speckle Interferometry," pp. 1-5.
- 14 Saha, S. K., 1999, "Development of a Speckle Interferometer and the Measurement of Fried's Parameter at the Telescope Site," pp. 1-7.
- 15 Astronomía Sur, 2006, "Telescopios," (Octubre, 2006) pp. <http://www.astrosurf.com/astronosur/telescopios.htm>.
- 16 Farah, A., 2004, "Curso De Construcción De Telescopios," UNAM.
- 17 Astromía, 2006, "Glosario," (Octubre, 2006) pp. <http://www.astromia.com/glosario.htm>.
- 18 Berry's, R., 1994, "Build your own telescope," Ed. Willmann-Bell Inc, EU..
- 19 Gutierrez, L., 2004, "Telescopios e Instrumentación Para La Observación Astronómica," Vol. 5pp. <http://www.revista.unam.mx/vol.5/num4/art23/art23.html>
- 20 Díaz C., 2000, "Instrumentación Astronómica Para El Siglo XXI," (Octubre, 2006) pp. <http://www.iac.es/gabinete/iacnoticias/1-2000/instru1.html>
- 21 Hariharan, P., 2003, "Optical Interferometry," Ed. Academic Press, EU.
- 22 Feilden, G. B. R., 1963, "Engineering design (The Feilden's Report)", (her Majesty's Stationery Office, London).
- 23 Ullman, D., 1992, "The mechanical design Process," Ed. McGraw Hill, EU.

- 24 S hakoon, J., 2000, "Detailees Mechanical Design: A Practical Guide," Ed. ASME, New York, EU.
- 25 Chevalier, A., 1997, "Dibujo Industrial," Ed. Limusa, México D.F.
- 26 E vboumwan, N F O, 1996, "A Survey of Design Philosophies, Models, Methods and Systems," London., 1996.
- 27 Yoder, P., 2002, "Mounting Optics in Optical Instruments", EU.
- 28 Wikipedia, 2007, "Historia De La Astronomía," (Enero, 2007) pp. http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_astronom%C3%ADa
- 29 Pehleman, E., Hofmann, H-K., Weigelt, G., 2004, "Photon Bias Compensation in the Bispectrum and Speckle Masking Observations of R136,"
- 30 Diario Oficial de la Federación, 1997, "Reglamento Federal De Seguridad, Higiene y Medio Ambiente De Trabajo," <http://www.respyn.uanl.mx/iv/2/contexto/NOM-006.htm> Enero 2007.
- 31 Deal Academia Española, 2001, "Diccionario de La Real Academia Española. Versión Web. " 22va. Edición.
- 32 alacara, D., Malacara, J., 1995, "Telescopios y Estrellas," (Enero, 2007) pp. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/057/htm/telescopio.html>
- 33 espana, 2006, "Radioastronomía," (Enero 2007) pp. <http://radioastronomia.iespana.es/curso6a.pdf>
- 34 Malacara, D., Malacara, J., 1995, "Telescopios y Estrellas," (Enero, 2007) pp. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/057/htm/sec13.html>
- 35 strocsmos, 2007, "Buscando El Principio Del Tiempo," (Enero,2007) pp. http://www.astrocosmo.cl/b_p-tiempo/b_p-tiempo-003.htm
- 36 V. G. Orlov, V. V. Voitsekhovich, L. J. Sánchez, F. Grafías, 2004, Interferometria de motas de las estrellas binarias con el instrumento DRAGON
- 37 Berry's, R., 1994, "Build your own telescope," Ed. Willmann-Bell Inc, EU
- 38 alacara, D., Malacara, J., 1995, "Telescopios y Estrellas," (Enero, 2007) pp. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/057/htm/astrofísica.html>
- 39 Farah, A., 2004, "Diseño Optomecánico Del Barril Para La Cámara Osiris," Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- 40 Lluís F., 2003, "Óptica Geométrica," Ed. EUETIT, Terrassa
- 41 Tippens,P., 1985, "Física. Conceptos y aplicaciones", Ed. McGraw Hill, México.
- 42 Galeón, 2007, "Las Estrellas Dobles," (Enero 2007) pp. <http://www.galeon.com/casanchi/ast/dobles1.htm>
- 43 Torres, J.R., 1994, "Deep Sky Handbook," Ed. Conselleria de cultura de la generalitat valenciana, Valencia, España.
- 44 Gasvik Kjell J, 1996, "Optical Metrology," Ed. John Wiley & Sons Ltd, EU.
- 45 R Rivera, H., 2005, "Rutas De Manufactura Por Control Numérico Para La Instrumentación Astronómica," Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- 46 Altarac, S., Tallon, M., Thiebaut, E., Foy R., 1999, "Speckle Interferometry. Data Acquisition and Control for the SPID Instrument," India.
- 47 V.V.Voitsekhovich, V.G.Orlov, L.J.Sanchez, F.Garfias, "Investigations of 1-m telescope guiding at the OAN - Tonantzintla", Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, (submitted, 2007).

ANEXO

Análisis del Interferómetro de motas Tohtli con Elemento Finito

El análisis con Elemento Finito (FEA) de este Interferómetro de Motas, tiene como objetivo verificar que el comportamiento del instrumento a los efectos de gravedad y de temperatura está dentro de los límites esperados. Esto ayudara a cerciorarnos de que Tohtli no tendrá problemas de alineación debido a la deformación causada por su propio peso y la expansión térmica del material.

El análisis se realizó con el software *ALGOR*, con el cual obtendremos el valor de los desplazamientos que tiene la pieza al flexionarse debido a su propio peso, considerando a la gravedad como $9.78 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Además se analizaron los desplazamientos debido a la expansión térmica del material, si se le aplica un aumento de temperatura de 1°C .

Caso	Parámetros
Deformación debido a su propio peso	$g = 9.78 \text{ [m/s}^2\text{]}$.
Deformación debido a la expansión térmica del material	$\Delta T = 1^\circ\text{C}$

En la Figura 6.1 se muestra el ensamble que se utilizó para el análisis. El ensamble a analizar es la estructura de soporte del instrumento. A al cual se le aplicaron cargas que simulaban el peso de los componentes que soporta, ya que así el análisis es más sencillo.

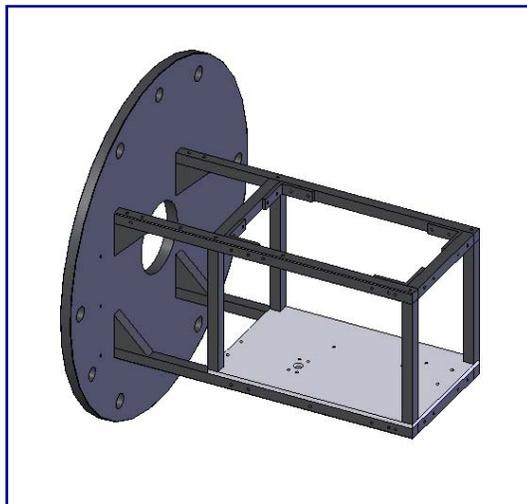


Figura 6.1 Estructura de soporte

El material de la estructura es Aluminio 6061-T4, el cual es un material comercial, y cuyas propiedades ya están incluidas en la lista de materiales del software.

Se utilizó un mallado para el análisis es de 3mm.

Para realizar estos análisis se utilizaron elementos rígidos y elementos viga. Los elementos rígidos se utilizan para conectar de forma rígida dos nodos de un modelo. Uno de estos nodos puede estar sin conectar al modelo y tener aplicadas restricciones. Al elemento rígido se le asignará un valor individual de rigidez, que se aplicará contra uno o varios grados de libertad. Pueden utilizarse para conectar piezas entre sí, o para simular un contorno que no esté modelado.² A los elementos rígidos se les tiene que especificar la rigidez del elemento. En este caso se decidió utilizar un rigidez en un orden mayor a la rigidez del Aluminio.

Además se consideró que el ensamble estaba pegado, esto debido a estudios hechos por un compañero de este mismo grupo de trabajo que demuestran que los resultados no distan mucho si se considera que el instrumento está atornillado o pegado, pero el tiempo de análisis en el segundo caso es mucho menor.

Para cada análisis solo se varía una restricción determinada, ya sea el peso considerado, los elementos utilizados o la configuración propuesta.

Para no poner todos los componentes del Interferómetro, y así simplificar el análisis, cada subsistema de Tohtli se sustituyo por una carga que simulaba su peso, y se aplicó en donde está el centro de masa de los sistemas a sustituir.

Se simularon 3 cargas que representaban los subsistemas ópticos de Tohtli. La forma de unión de estas cargas con la base de la estructura y el tipo de elemento utilizado para este fin, fueron las variaciones que se hicieron para los análisis.

² Software ALGOR

Análisis 1

Consideraciones

Las cargas se aplicaron a la base con elementos rígidos. Estos elementos se consideraron con una rigidez de 26×10^{10} N/m, lo cual es un orden mayor a la rigidez del aluminio 6061-T4³.

Subsistema	Carga aplicada [N]
Rueda de Objetivos	6.33255
Rueda de Filtros	2.70710
Ensamble de la Cámara y Objetivo Varifocal (sin soporte del objetivo)	4.32863

A la par, se simuló una estructura que representaba cada de los subsistemas, y se colocaron nodos control dentro del eje óptico, esto también se hizo con elementos rígidos, con la misma rigidez que los anteriores.

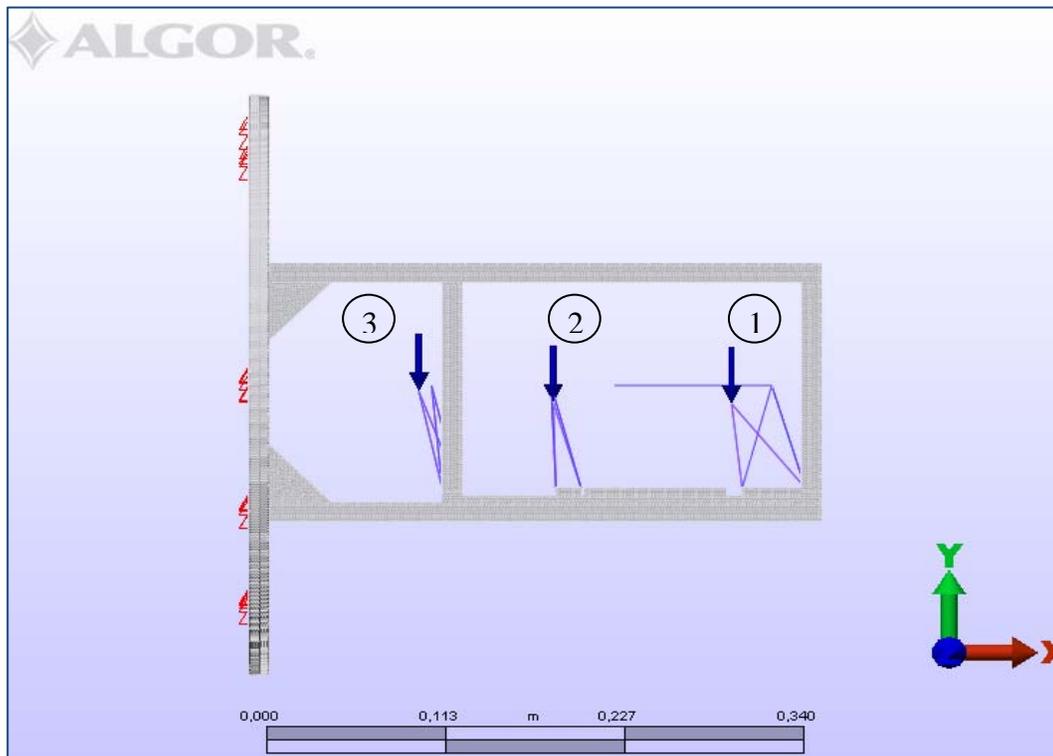


Figura 7.1 Posición de las cargas y estructuras a analizar.

³ www.matweb.com

Resultados

El desplazamiento de los nodos de control fue el siguiente.

Punto	1	2	3				Suma	Desplazamiento [m]
x	6,711E-06	9,452E-06	2,146E-06	4,504E-11	8,934E-11	4,607E-12	1,390E-10	1,179E-05
y	-2,330E-05	-1,600E-05	-8,109E-06	5,427E-10	2,561E-10	6,576E-11	8,645E-10	2,940E-05
z	-2,547E-07	-8,928E-07	-4,497E-07	6,488E-14	7,970E-13	2,023E-13	1,064E-12	1,032E-06
Total							1,005E-09	4,222E-05

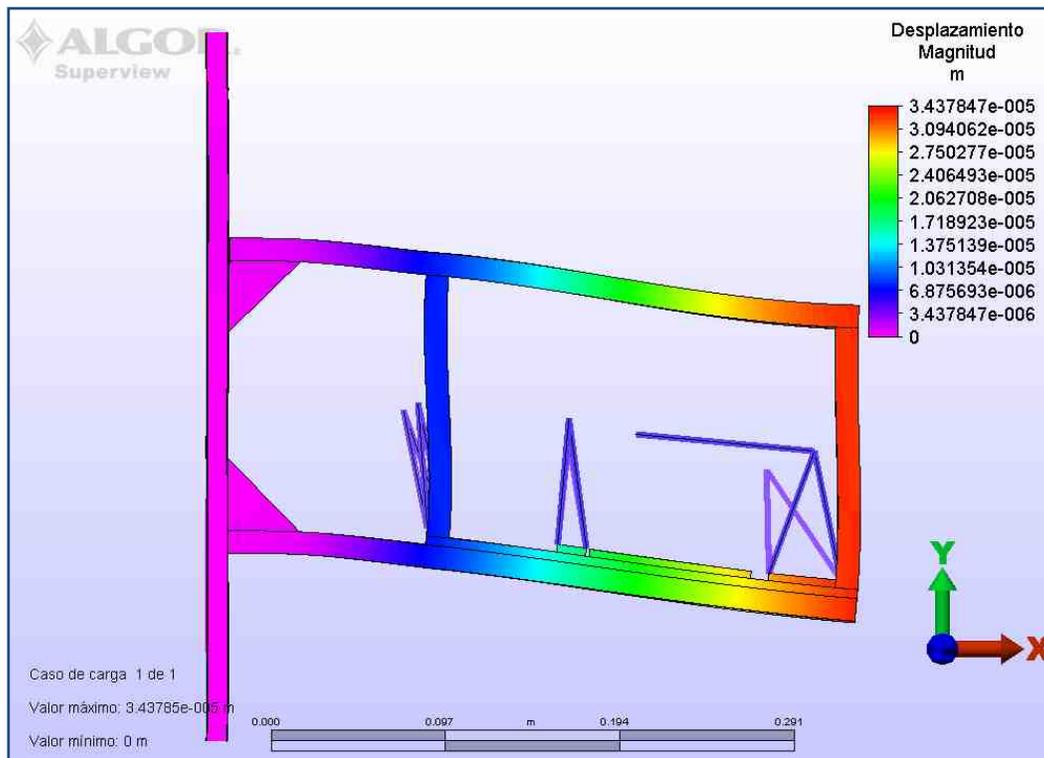


Figura 7.2 Deformación del ensamble debido a su propio peso considerando elementos rígidos

Análisis 2

Consideraciones

Las cargas se aplicaron a una estructura que simulaba cada subsistema. Estas estructuras se simularon con elementos viga de aluminio 6061-T4 y de 0.01 m de área transversal.

Subsistema	Carga aplicada [N]
Rueda de Objetivos	6.33255
Rueda de Filtros	2.70710
Ensamble de la Cámara y Objetivo Varifocal (se considera en soporte para el objetivo)	11.1971

Las estructuras de los subsistemas simuladas se realizaron intentando que el comportamiento fuera muy cercano a la realidad, por lo que, debido a su complejidad se tuvieron que utilizar elementos viga.

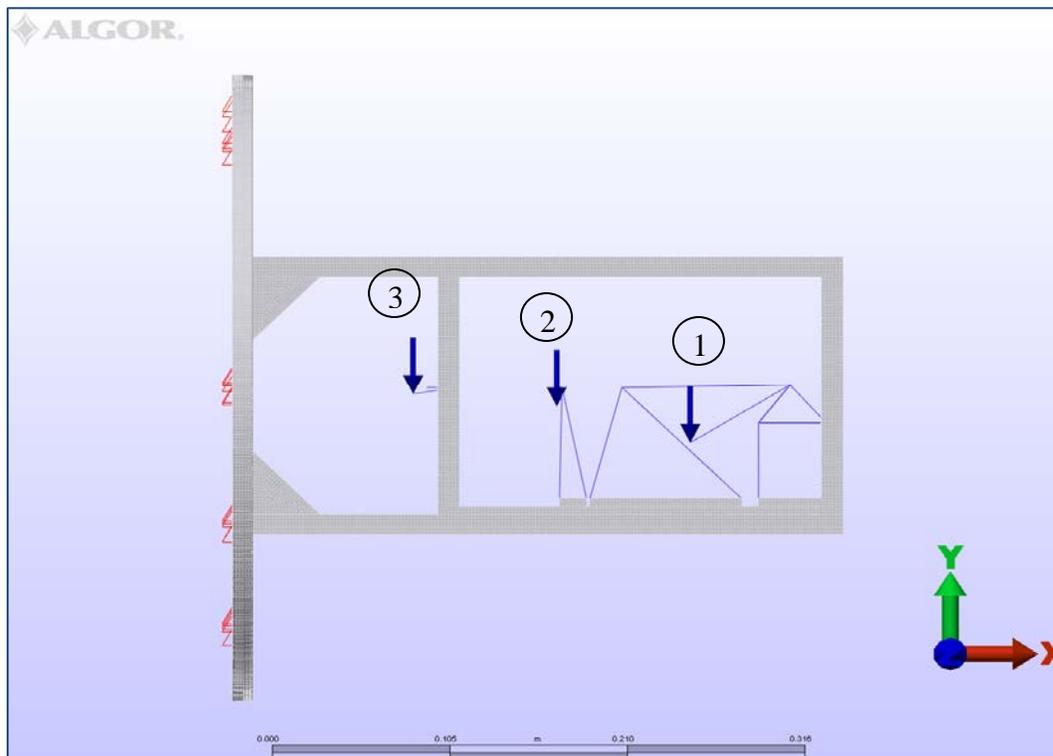


Figura 7.3 Posición de las cargas y estructuras a analizar.

Resultados

El desplazamiento de los nodos de control fue el siguiente.

Punto	1	2	3				Suma	Desplazamiento [m]
x	1,961E-04	2,147E-04	1,806E-04	3,845E-08	4,609E-08	3,263E-08	1,172E-07	3,423E-04
y	-4,590E-04	-3,691E-04	-1,456E-04	2,107E-07	1,362E-07	2,119E-08	3,681E-07	6,067E-04
z	-2,193E-05	-4,992E-05	-1,582E-05	4,807E-10	2,492E-09	2,502E-10	3,223E-09	5,677E-05
							4,885E-07	1,006E-03

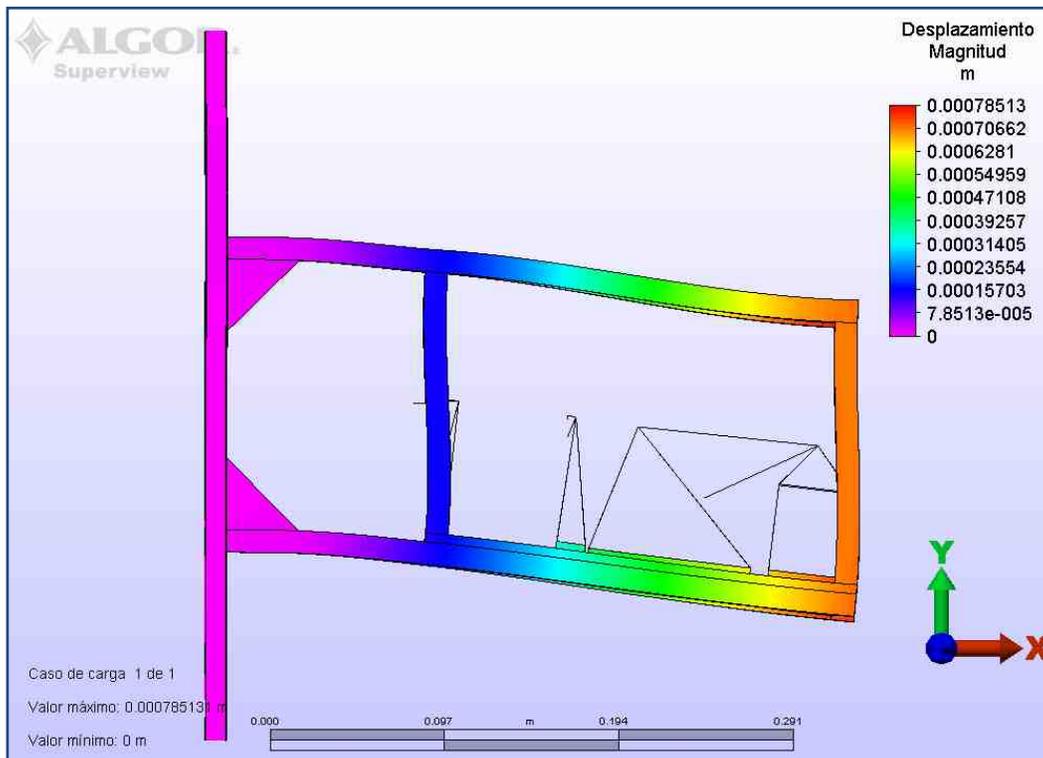


Figura 7.4 Deformación del ensamble debido a su propio peso considerando elementos viga

Análisis 3

Consideraciones

Cada carga se aplicó en una estructura que simulaba el subsistema óptico. Estas estructuras se simularon con elementos viga de aluminio 6061-T4 y de 0.01 m de área transversal.

Subsistema	Carga aplicada [N]
Rueda de Objetivos	6.33255
Rueda de Filtros	2.70710
Ensamble de la Cámara y Objetivo Varifocal (se considera en soporte para el objetivo)	11.1971

Las estructuras simuladas se simplificaron respecto al análisis 3, y solo se colocaron las líneas que se consideraron más importantes.

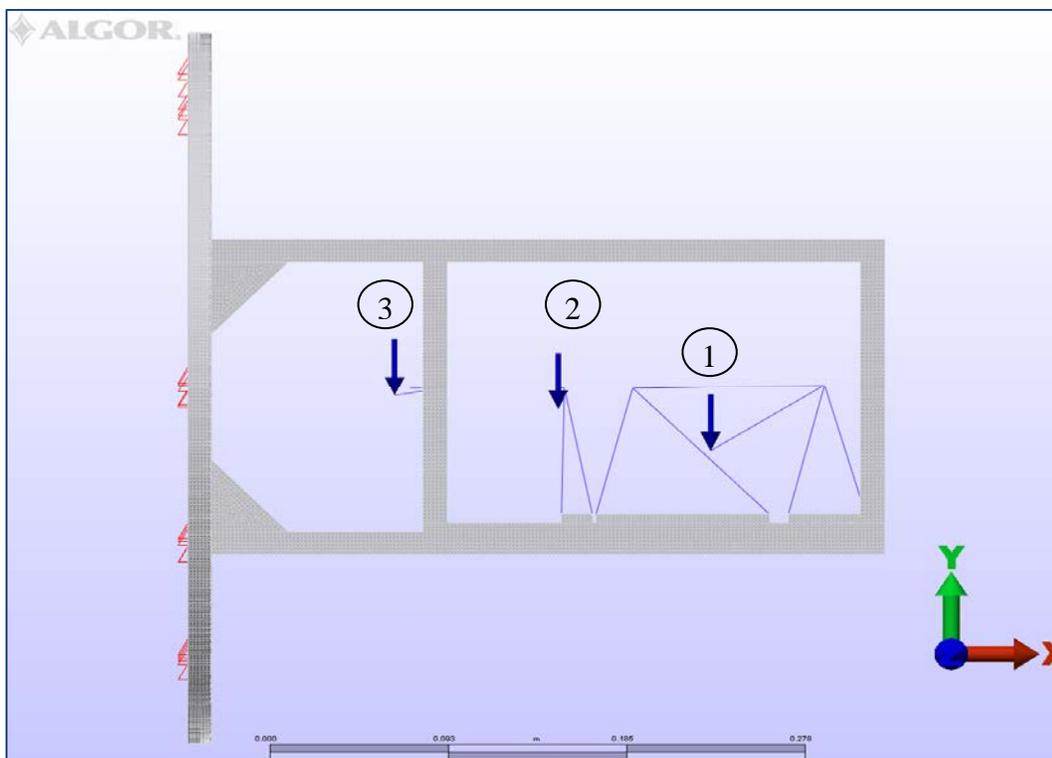


Figura 7.5 Posición de las cargas y estructuras a analizar.

Resultados

El desplazamiento de los nodos de control fue el siguiente.

Punto	1	2	3				Suma	Desplazamiento [m]
x	1,433E-04	1,628E-04	1,416E-04	2,053E-08	2,650E-08	2,004E-08	6,707E-08	2,590E-04
y	-3,654E-04	-3,018E-04	-1,222E-04	1,336E-07	9,108E-08	1,492E-08	2,396E-07	4,894E-04
z	-1,470E-05	-4,423E-05	-1,382E-05	2,161E-10	1,957E-09	1,911E-10	2,364E-09	4,862E-05
							3,090E-07	7,970E-04

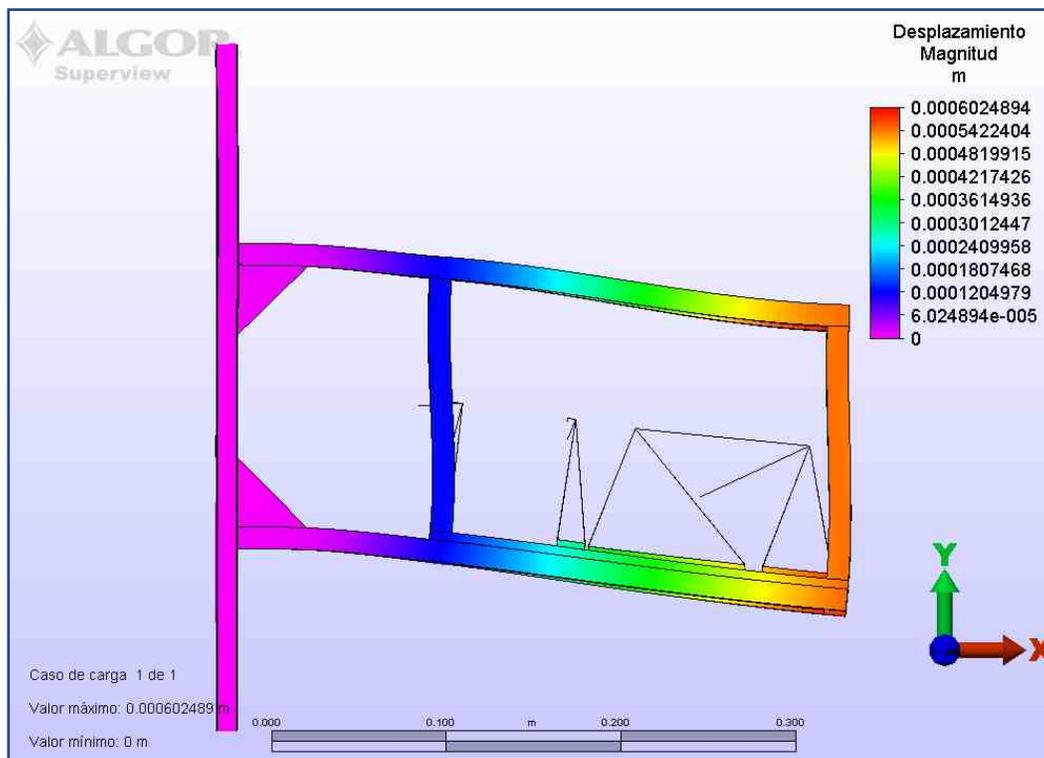


Figura 7.6 Deformación del ensamble debido a su propio peso considerando elementos viga

Análisis 4

Consideraciones

Las cargas se aplicaron a una estructura que simulaba cada subsistema. Estos elementos se consideraron con una rigidez de 26×10^{10} N/m, lo cual es un orden mayor a la rigidez del aluminio 6061-T4⁴.

Subsistema	Carga aplicada [N]
Rueda de Objetivos	6.33255
Rueda de Filtros	2.70710
Ensamble de la Cámara y Objetivo Varifocal (se considera el soporte del objetivo)	11.1971

Tratando de que la estructura del subsistema se apegara en gran medida a la realidad, se dividieron los sistemas ópticos en dos subsistemas que permiten que se conserve la complejidad del modelo y que el software acepte los elementos rígidos.

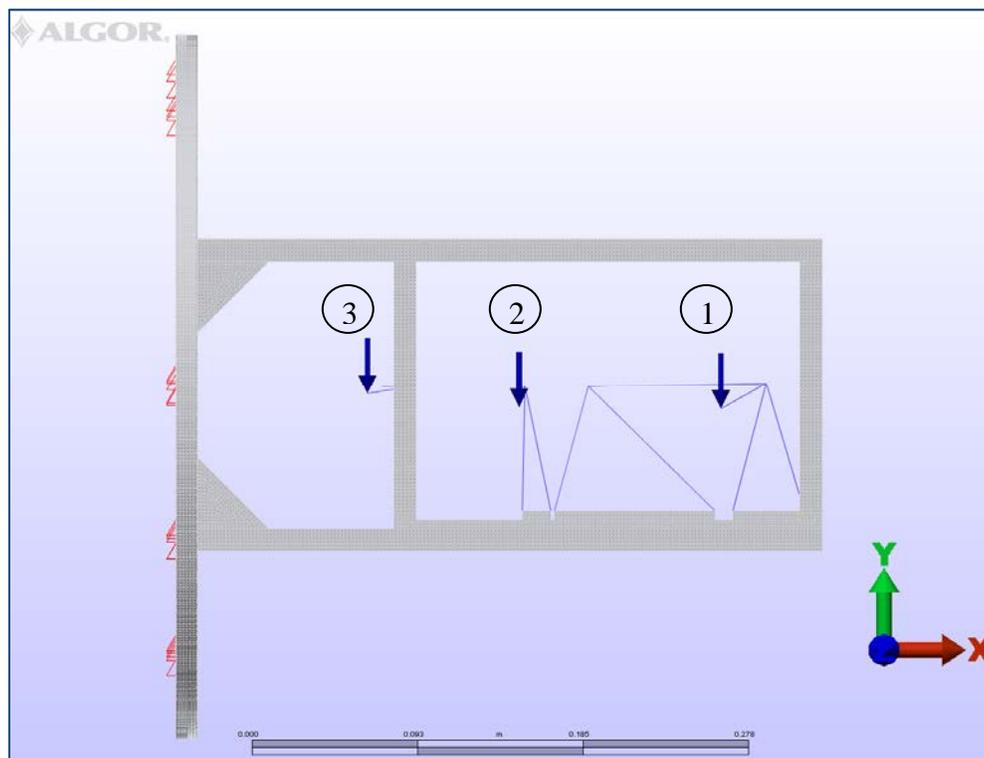


Figura 7.7 Posición de las cargas y estructuras a analizar.

⁴ www.matweb.com

Resultados

El desplazamiento de los nodos de control fue el siguiente.

Punto	1	2	3				Suma	Desplazamiento [m]
x	1,272E-05	1,330E-05	5,221E-06	1,617E-10	1,768E-10	2,726E-11	3,658E-10	1,913E-05
y	-2,813E-05	-2,198E-05	-1,024E-05	7,912E-10	4,833E-10	1,048E-10	1,379E-09	3,714E-05
z	-1,104E-06	-2,027E-06	-7,663E-07	1,219E-12	4,110E-12	5,871E-13	5,916E-12	2,432E-06
							1,751E-09	5,870E-05

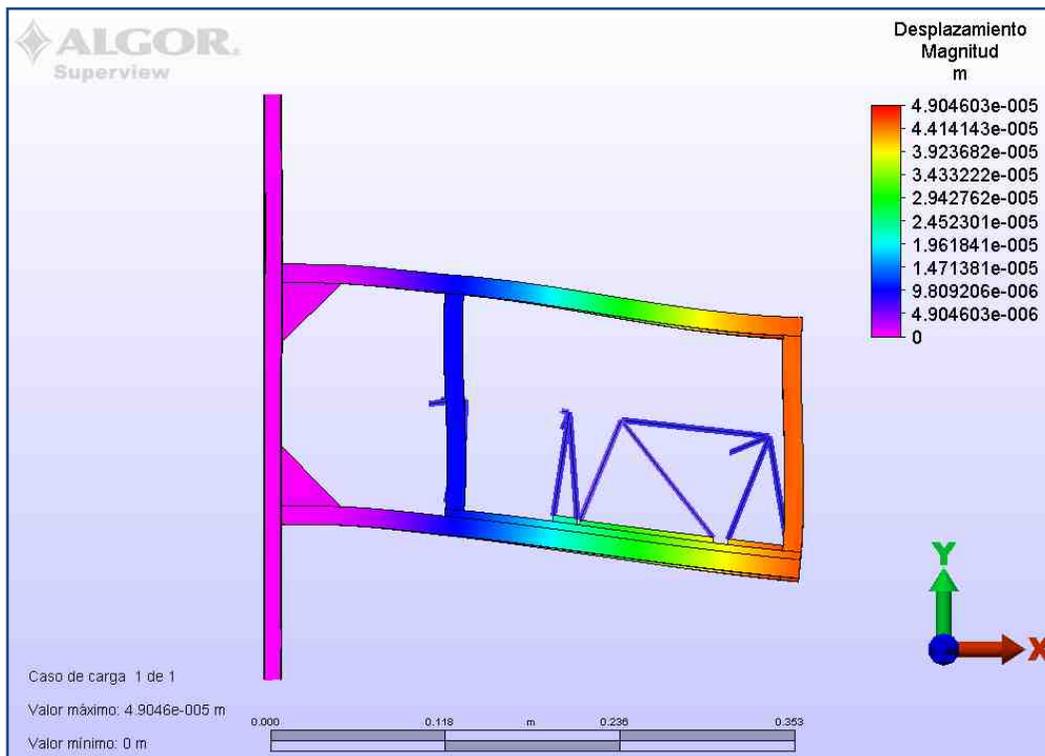


Figura 7.8 Deformación del ensamble debido a su propio peso considerando elementos rígidos

Análisis 5

Consideraciones

Las cargas se aplicaron a una estructura que simulaba cada subsistema. Estos elementos se consideraron con una rigidez de 26×10^{10} N/m, lo cual es un orden mayor a la rigidez del aluminio 6061-T4⁵.

Subsistema	Carga aplicada [N]
Rueda de Objetivos	6.33255
Rueda de Filtros	2.70710
Ensamble de la Cámara y Objetivo Varifocal (se considera el soporte del objetivo)	11.1971

En este análisis no se consideraron los subsistemas creados en el análisis 4, pero si su carga.

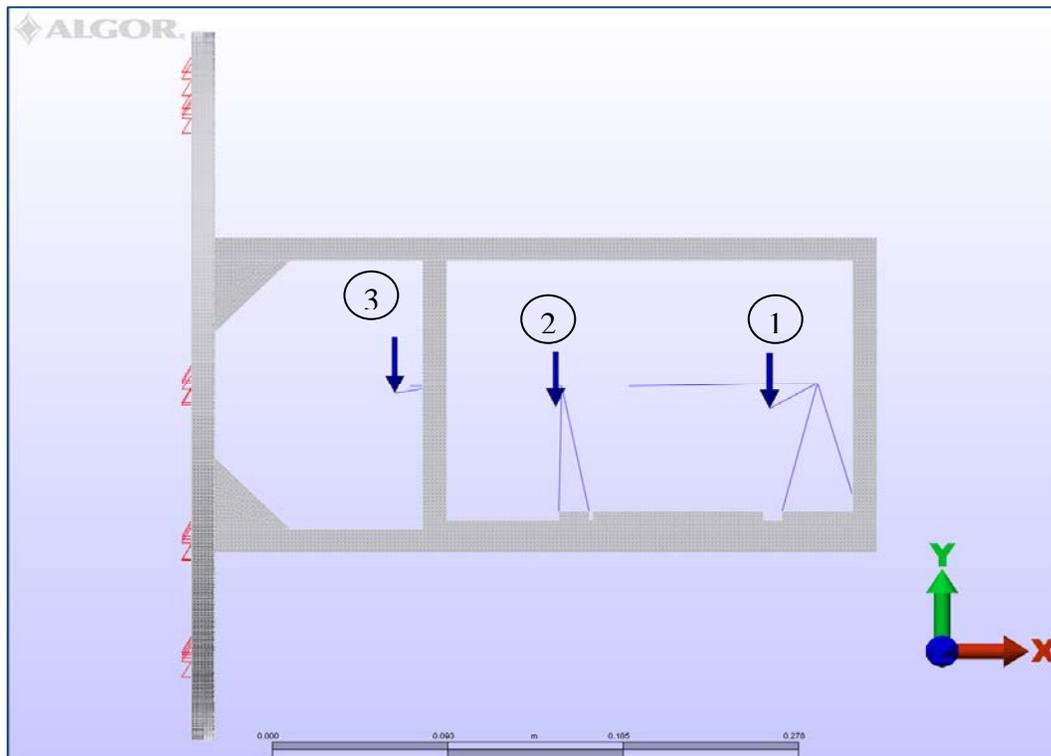


Figura 7.9 Posición de las cargas y estructuras a analizar.

⁵ www.matweb.com

Resultados

El desplazamiento de los nodos de control fue el siguiente.

Punto	1	2	3				Suma	Desplazamiento [m]
x	8,884E-06	1,395E-05	5,532E-06	7,892E-11	1,945E-10	3,060E-11	3,040E-10	1,744E-05
y	-3,439E-05	-2,206E-05	-1,022E-05	1,183E-09	4,867E-10	1,043E-10	1,774E-09	4,212E-05
z	-1,078E-06	-1,693E-06	-6,799E-07	1,162E-12	2,866E-12	4,623E-13	4,491E-12	2,119E-06
							2,083E-09	6,167E-05

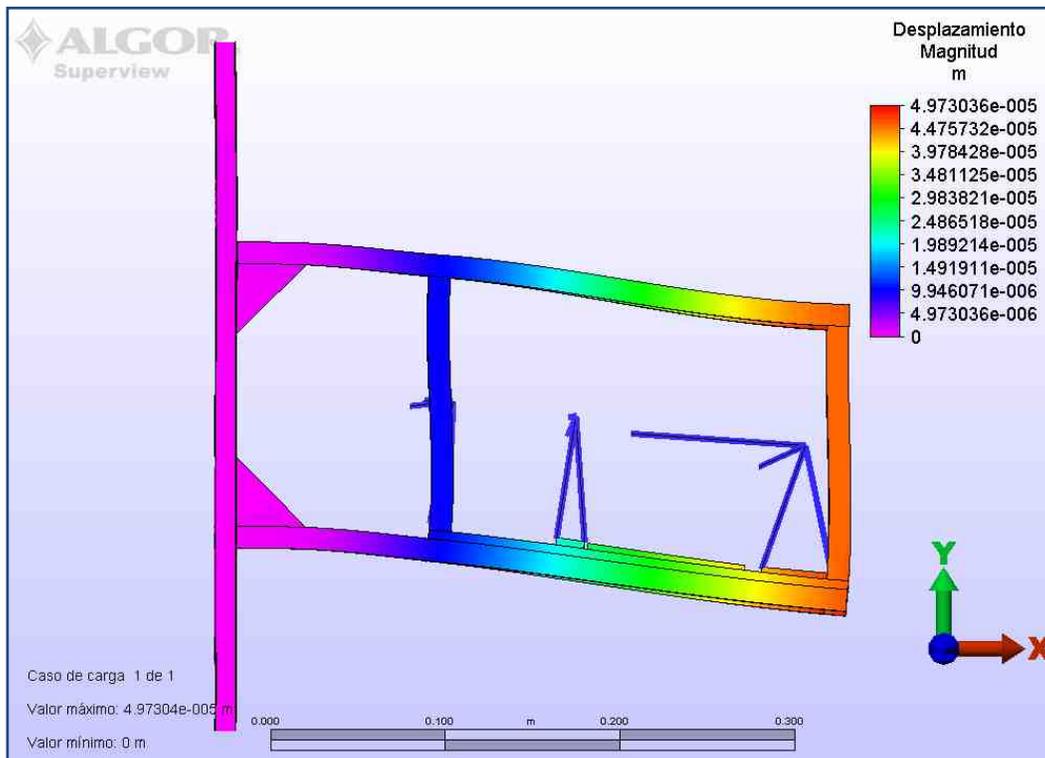


Figura 7.10 Deformación del ensamble debido a su propio peso considerando elementos rígidos

Análisis 6

Consideraciones

Cada carga se aplicó en una estructura que simulaba el subsistema óptico. Estas estructuras se simularon con elementos viga de aluminio 6061-T4 y de 0.01 m de área transversal.

Subsistema	Carga aplicada [N]
Rueda de Objetivos	6.33255
Rueda de Filtros	2.70710
Ensamble de la Cámara y Objetivo Varifocal (sin considerar el soporte para el objetivo)	4.32863

Tratando de que la estructura del subsistema se apegara en gran medida a la realidad, se simularon los subsistemas ópticos, intentando que la estructura dibujada sea parecida a la real.

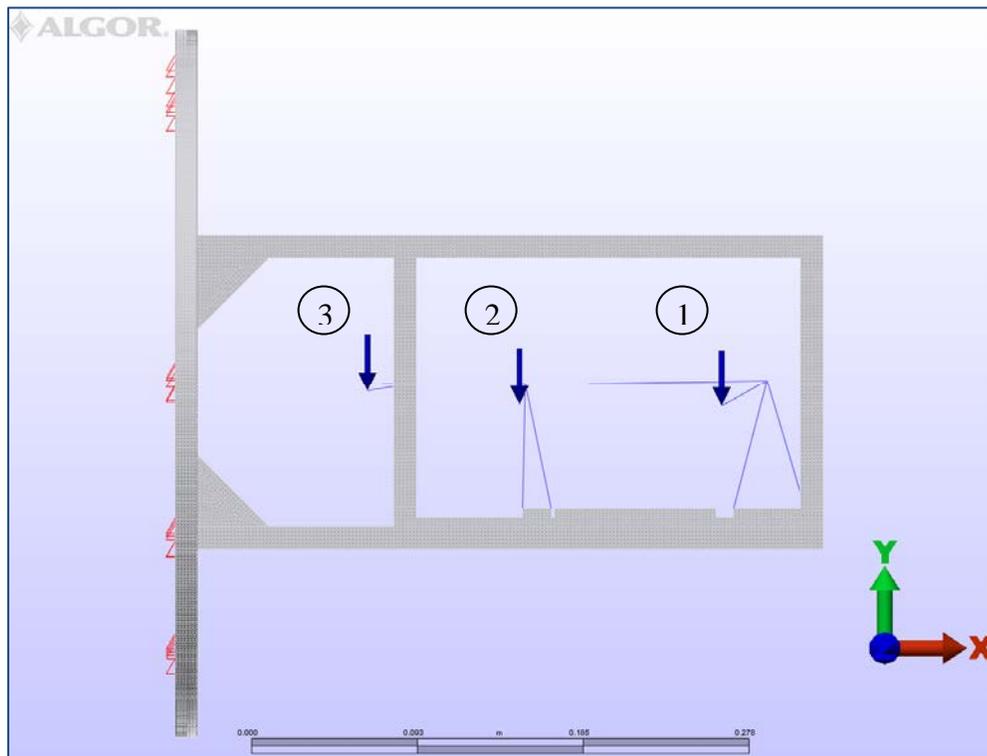


Figura 7.11 Posición de las cargas y estructuras a analizar.

Resultados

El desplazamiento de los nodos de control fue el siguiente.

Punto	1	2	3				Suma	Desplazamiento [m]
x	7,801E-05	1,154E-04	1,012E-04	6,086E-09	1,331E-08	1,024E-08	2,964E-08	1,721E-04
y	-3,000E-04	-2,145E-04	-9,071E-05	9,001E-08	4,601E-08	8,228E-09	1,443E-07	3,798E-04
z	-6,159E-06	-2,073E-05	-7,679E-06	3,793E-11	4,298E-10	5,896E-11	5,267E-10	2,295E-05
							1,744E-07	5,749E-04

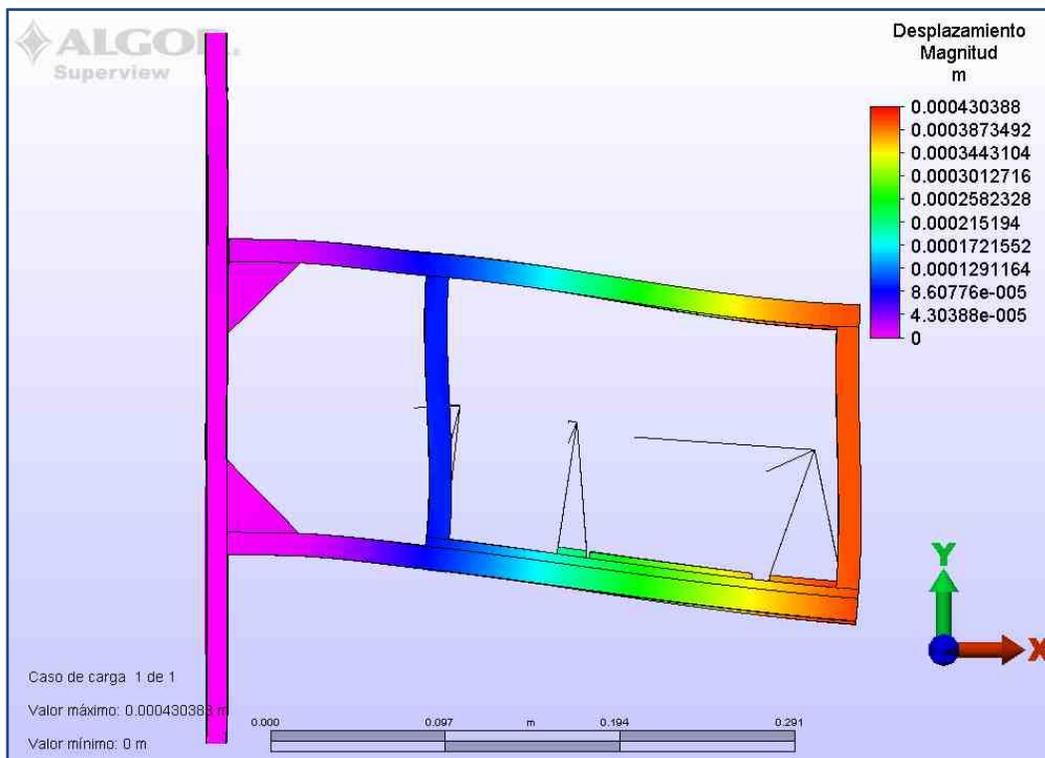


Figura 7.12 Deformación del ensamble debido a su propio peso considerando elementos viga

Análisis Térmico

Consideraciones

En este análisis se busca como influye el calor y por lo tanto, la dilatación térmica del material, en la alineación de los nodos de control. Se consideró que la temperatura de referencia es de 7°C y el cambio de temperatura es de 1°C.

Se aplicaron las cargas en cada de las estructuras que simulaban el subsistema óptico. Estas estructuras se simularon con elementos rígidos con una rigidez de un orden mayor a la rigidez del aluminio 6061-T4

Subsistema	Carga aplicada [N]
Rueda de Objetivos	6.33255
Rueda de Filtros	2.70710
Ensamble de la Cámara y Objetivo Varifocal (considerando el soporte para el objetivo)	11.1971

Las estructuras de los subsistemas simuladas se realizaron intentando que el comportamiento fuera muy cercano a la realidad, pero debido a su complejidad se tuvo que simular solo los componentes de la estructura que se consideraron más importantes.

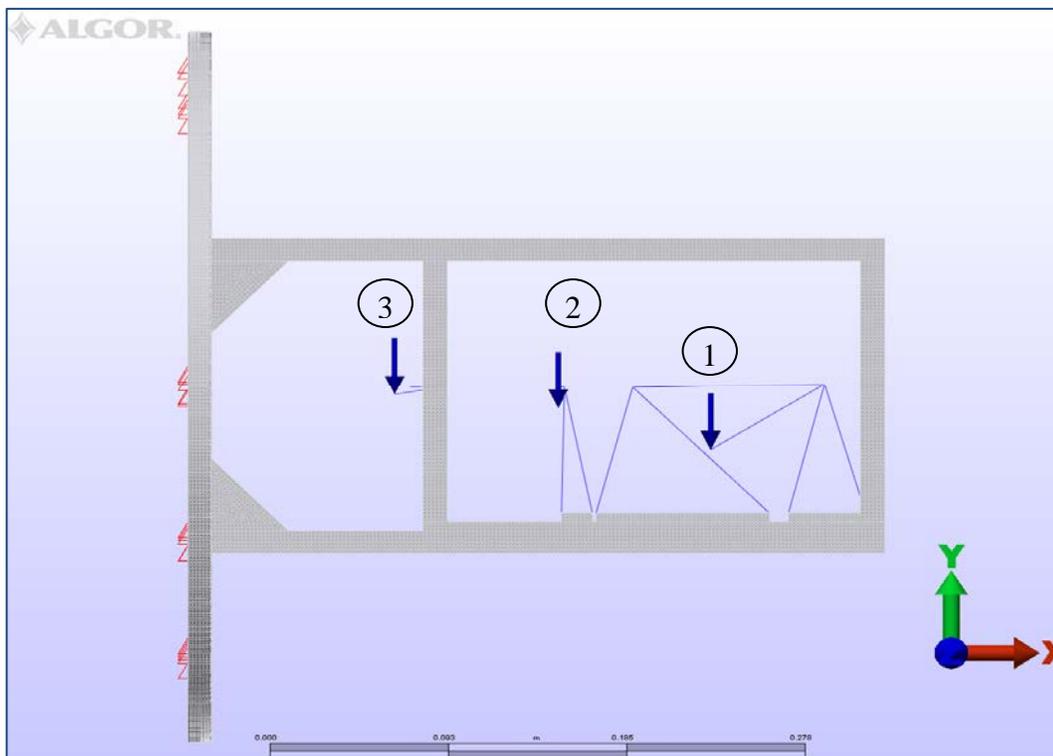


Figura 7.13 Posición de las cargas y estructuras a analizar.

Resultados

El desplazamiento de los nodos de control fue el siguiente.

Punto	1	2	3				Suma	Desplazamiento [m]
x	2,823E-05	2,660E-05	1,573E-05	7,970E-10	7,078E-10	2,474E-10	1,752E-09	4,186E-05
y	-2,953E-05	-2,389E-05	-1,273E-05	8,718E-10	5,705E-10	1,620E-10	1,604E-09	4,005E-05
z	4,800E-06	3,701E-06	2,866E-06	2,304E-11	1,370E-11	8,213E-12	4,495E-11	6,704E-06
							3,401E-09	8,862E-05

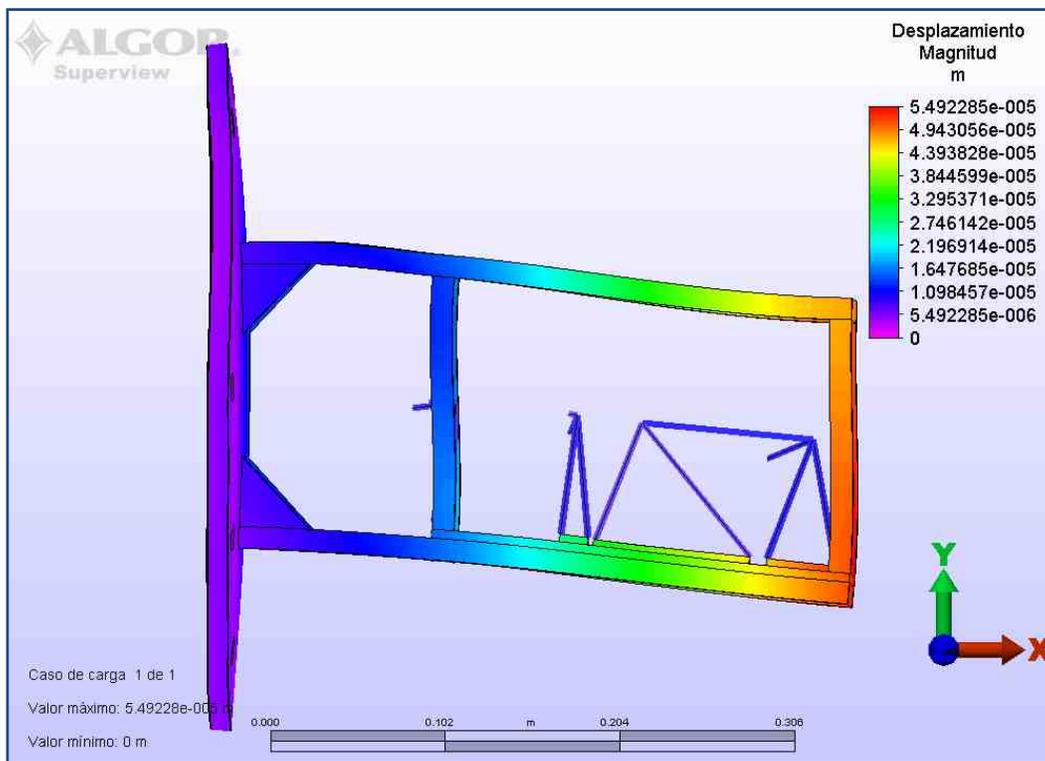


Figura 7.14 Deformación del ensamble debido a su propio peso y a la expansión térmica del material considerando elementos rígidos