



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

**DISEÑO E INTEGRACIÓN DEL MECANISMO PARA LA ALINEACIÓN Y ENFOQUE DEL
ESPECTRÓGRAFO ECHELLE DEL TELESCOPIO DE 2.1m DEL OBSERVATORIO
ASTRONÓMICO NACIONAL**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ASCENCIÓN HORACIO GUTIÉRREZ OSORIO

TUTORES PRINCIPALES:
DR. ALEJANDRO FARAH SIMÓN, POSGRADO DE INGENIERÍA DE LA UNAM
DR. JUAN ECHEVARRÍA ROMAN, INSTITUTO DE ASTRONOMÍA DE LA UNAM

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE DE 2014



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Vicente Borja Ramírez
Secretario: Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich
Vocal: Dr. Alejandro Farah Simón
1^{er.} Suplente: Dr. Fernando Velázquez Villegas
2^{d o.} Suplente: Dr. Juan M. Echevarría Román

Lugares donde se realizó la tesis: ♦*♦Facultad de Ingeniería, UNAM ♦*♦Instituto de Astronomía, UNAM ♦*♦Observatorio Astronómico Nacional de la Sierra de San Pedro Mártir, Ensenada Baja California, México.

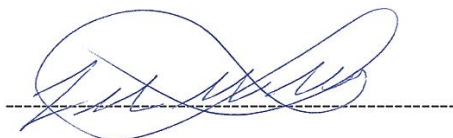
TUTORES DE TESIS:

DR. ALEJANDRO FARAH SIMÓN



FIRMA

DR. JUAN M. ECHEVARRÍA ROMÁN



FIRMA



*Ustedes me dicen, entonces, que tengo que perecer
como también las flores que cultivé perecerán.*

¿De mi nombre nada quedará,

nadie mi fama recordará?

Pero los jardines que planté, son jóvenes y crecerán...

Las canciones que canté, ¡cantándose seguirán!

Llovieron esmeraldas;

ya nacieron las flores:

Es tu canto.

Cuando tú lo elevas en México,

el sol está alumbrando.

Poesía mexicana. Gran Tenochtitlan.



DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con mucho cariño y afecto:

En primer lugar a Dios, Principio y Fin de todas las cosas, primer motor de la máquina maravillosa llamada Universo.

A mis padres:

Porque ustedes me han formado y me han hecho lo que soy en la vida.
Gracias papá Isaac, gracias mamá Angelita. Dios los bendiga por siempre.

A mi esposa Arianna y a mis niños: Ariannita y Horacito que son la razón de mi existir. Los amo.

A mis hermanos:

Claudia, Lucy, Silvia, Alejandro, Isaac, Feliciano, Marcos y Héctor por su cariño y apoyo sincero. Los quiero mucho.

Al Dr. Alejandro Farah Simón, por haberme enseñado implícita y explícitamente lo que es el diseño en ingeniería, diseño para la vida, lo admiro por su gran inteligencia y sabiduría.

Al Dr. Juan M. Echevarría Román, a quien admiro por su gran dedicación al trabajo científico, artístico y humanístico.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente al CONACYT y al proyecto DGAPA, PAPIIT IN111713 por brindar el apoyo incondicional y la infraestructura para llevar a cabo el proyecto.

Al Dr. Alejandro Farah Simón, por haberme compartido sus valiosos conocimientos de ingeniería mecánica y por su apreciable amistad.

Al Dr. Juan Manuel Echevarría Román, por sus apreciables enseñanzas en astrofísica y por haber confiado en mí en el diseño de este producto de ingeniería; a quien admiro y respeto por su gran trayectoria de investigación y amistad.

A mis compañeros y amigos de maestría:

Rogelio López Cruz,

Uriel Estrada López,

Sean Rodolfo Sebastián Vilchis Martínez,

Ricardo Granados,

Éric Tejada Malpica,

Gracias por su gran afecto y amistad.

A los catedráticos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM:

Dr. Vicente Borja Ramírez,

Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich,

Dr. Fernando Velázquez Villegas,

Dr. Francisco Cuenca Jiménez,

Y del Instituto de Astronomía de la UNAM:

Dr. Alejandro Farah Simón,

Dr. Juan M. Echevarría Román,

Dr. Rafael Costero,

Dr. Leonel Gutiérrez,

Mto. Gerardo Sierra,

Por sus excelentes y valiosas cátedras, disponibilidad, amistad y compromiso para mi persona. Que Dios los bendiga.

Y de manera especial a la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser nuestra amada *alma mater*, la noble máxima casa de estudios, ayer, hoy y siempre...



Congreso de astrónomos. México Prehispánico.

CONTENIDO

RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN	ix
1. GENERALIDADES	1
1.1. LA ASTRONOMÍA Y LA INGENIERÍA	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.2.1 ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS	11
1.3. OBJETIVO	12
1.4. HIPÓTESIS	12
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	13
1.6. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	14
1.7. METODOLOGIA	14
1.8. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE	15
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1. EL DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA	24
2.2. EL PROCESO DEL DISEÑO MECÁNICO	25
2.2.1. EL PROCESO GENERAL DE DISEÑO	25
2.2.2. PRINCIPIOS DE DISEÑO MECÁNICO	28
2.3. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	33
2.4. ANÁLISIS TÉRMICO	35
2.5. ÓPTICA GEOMÉTRICA DE LENTES	36
3. DISEÑO DEL MECANISMO	41
3.1. PLANEACIÓN	41
3.1.1. LA MISIÓN	41
3.1.2. LA PROYECCIÓN	43
3.2. DISEÑO CONCEPTUAL	44
3.2.1. LAS NECESIDADES DEL USUARIO Y EL DISEÑO FUNCIONAL.	45
3.2.2. LA LLUVIA DE IDEAS	49
3.2.3. LA EVALUACIÓN DEL CONCEPTO	50
3.2.4. LA SELECCIÓN DEL CONCEPTO FINAL	51
3.2.5. PROTOTIPO DE FUNCIÓN CRÍTICA	53
3.3. EL CONCEPTO FINAL Y SU DESCRIPCIÓN	54
3.3.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	59
3.4. DISEÑO DE DETALLE	62

3.4.1.	EL MODELO MATEMÁTICO	62
3.4.2.	ANÁLISIS TÉRMICO DEL MECANISMO	64
3.4.3.	MATERIAL	65
3.4.4.	ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES	66
4.	FABRICACIÓN DEL MECANISMO	70
4.1.	PROCESO DE FABRICACIÓN EN GENERAL	70
4.2.	PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS	72
4.3.	PRUEBAS PRELIMINARES	75
5.	INTEGRACIÓN DEL MECANISMO	79
5.1.	EL PROCESO DE INTEGRACIÓN	79
5.2.	PRUEBAS FINALES	82
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
6.1.	RESULTADOS	89
6.2.	COSTO	114
7.	CONCLUSIONES	115
7.3.	CONCLUSIONES GENERALES	115
7.4.	SUGERENCIAS PARA TRABAJO FUTURO	116
	REFERENCIAS	118
	ANEXOS	122
I.	HOJAS DE PROCESO DE MANUFACTURA DE LAS PIEZAS DEL MECANISMO	123
II.	MANUAL	131
III.	PROPIEDADES DEL MATERIAL	143
IV.	ARTÍCULO INTERNACIONAL SPIE	146
V.	PÓSTER CONGRESO INTERNACIONAL SPIE	157
VI.	PÓSTER CONGRESO NACIONAL DE ASTRONOMÍA	158

RESUMEN

Esta tesis versa sobre un proyecto de ingeniería aplicado a la astronomía con fines científicos.

El proyecto consistió elementalmente sobre el diseño, caracterización y fabricación de una interfaz o mecanismo destinado para alinear y enfocar una lente de un espectrógrafo tipo Echelle que es parte primordial del telescopio de 2.1 metros del Observatorio Astronómico Nacional de la UNAM ubicado en la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, México.

El mecanismo que se describe en esta tesis está compuesto funcionalmente de las siguientes piezas: dos semi-abrazaderas, tres perfiles en “L” que fungen como columnas, una placa fija, una placa deslizante y tres sensores digitales que miden la posición relativa entre la base de la cámara del espectrógrafo y el plano de un criostato; éste posee una lente que deberá estar enfocada y alineada con la del espectrógrafo. El criostato está sujeto al mecanismo que tendrá movimiento de rotación alrededor de los tres ejes de rotación así como los movimientos de ajuste lineales a lo largo de dichos ejes.

De igual modo se hace una breve descripción de los elementos adyacentes al mecanismo para entender su funcionalidad así como los criterios de diseño empleados con el objetivo de garantizar el adecuado funcionamiento del mecanismo que ha sido probado y puesto en marcha en el telescopio. Tales resultados se describen así como las especificaciones técnicas y el proceso de manufactura.

Se proporciona la información técnica en forma de manual de instalación para el proceso de ensamble de las piezas y la consecuente integración.

Al final, se presentan algunas recomendaciones y trabajo futuro que se podrá efectuar como mejora continua al mecanismo.

ABSTRACT

This thesis focuses on an engineering project applied to astronomy for scientific purposes.

The project consisted elementally on the design, fabrication and characterization of an interface or mechanism to align and focus the lens of the Echelle spectrograph which is part of the 2.1 m telescope of the National Astronomical Observatory of UNAM located at the Sierra de San Pedro Mártir, B. C.

The mechanism described in this thesis is composed functionally of ten pieces: two half-clamps, three profiles in "L" that serve as columns, a fixed plate, a sliding plate, and three digital sensors that measure the relative position between the base spectrograph camera and the plane of a cryostat; it has a lens that must be focused and aligned with the spectrograph. The cryostat is attached to the mechanism that must have rotational movements about three axes of rotation and linear adjustment movements along said axes.

Similarly there is a brief description of the adjacent elements to understand the mechanism and functionality design criteria used in order to ensure the proper functionality of the mechanism that has been tested and implemented in the telescope. Such results are also described as well as the technical specifications, the manufacturing process and the manufacturing drawings.

Technical information in the form of the installation manual for the assembly process of the parts and the consequent integration is also provided.

Finally, some recommendations and future work that may be carried out as a continuous improvement mechanism are presented.

INTRODUCCIÓN

Desde que tomó conciencia, el ser humano ha tenido la necesidad de responder a múltiples preguntas sobre el Universo y ha indagado ampliamente para resolver sus dudas sobre los misterios de las leyes que gobiernan al cosmos. Mucho se podría abordar respecto a la historia de la ciencia de la astronomía para introducirse y tener una panorámica general desde su inicio hasta los proyectos futuros que las naciones más desarrolladas tienen al respecto.

Tras bambalinas de esta maravillosa ciencia, se encuentran inmersas otras ciencias que soportan su estudio. Entre ellas, es preciso mencionar a la ciencia y arte llamada ingeniería, misma que en su rama de instrumentación astronómica hoy en día está muy avanzada y creciente a una tasa impensable. Científicos de la ciencia pura y de la ingeniería efectúan proyectos de instrumentación astronómica para la investigación de los cuerpos celestes.

Ciertamente los instrumentos base de la astronomía son los grandes telescopios. Éstos, están formados por múltiples componentes diseñados para ser eficiente óptica, estructural y ergonómicamente. Los grandes telescopios poseen complejos sistemas mecánicos, ópticos, termodinámicos, eléctricos, electrónicos e informáticos que facilitan al astrónomo su investigación diaria.

Uno de los componentes ópticos primordiales que posee un gran telescopio es el espectrógrafo, que es un instrumento capaz de analizar el espectro de frecuencias característico de un movimiento ondulatorio proveniente de una fuente de luz. Contiene entre otros componentes una cámara y un criostato que integra componentes ópticos y electrónicos, entre ellos un chip llamado CCD *Charge-Coupled Device* (en español «dispositivo de carga acoplada»). Para que exista un funcionamiento óptico adecuado y se puedan observar los espectros, la lente de la cámara debe estar alineada y enfocada con la lente del criostato donde se encuentra el CCD. De esta forma, los datos de la imagen se envían electrónicamente a un ordenador que mediante un software permitirá al astrónomo caracterizar a los astros.

En México, el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, B.C., cuenta con un telescopio de 2.1 m (diámetro del espejo primario) el cual trabaja con algunos espectrógrafos, entre ellos, el Echelle. Éste requiere un mecanismo de alineación y enfoque para poder analizar los espectros característicos observables de los astros según sus capacidades ópticas.

Éste es el punto principal sobre el cual versa esta tesis, la cual es un proyecto de ingeniería cuyo objetivo es el diseño, caracterización, fabricación e integración

de esa interfaz o mecanismo de alineación y enfoque. En el desarrollo de la misma se describe desde la problemática a resolver así como los métodos de diseño mecánico empleados, la manufactura, las pruebas, la integración y el manual de usuario.

La tesis está compuesta de seis capítulos. En el primero se mencionan las generalidades cuyo objetivo específico es el de entender los aspectos históricos y científicos que giran en torno al problema a resolver. También se menciona la definición del problema, las hipótesis, la justificación del proyecto y su metodología empleada para sacar adelante el objetivo general del proyecto. Adicionalmente se efectúa un análisis bibliográfico del estado del arte.

En el capítulo dos se establecen los principios teóricos que se aplican para resolver el problema formando así el marco teórico.

El tercer capítulo trata sobre el diseño mecánico del mecanismo. Elementalmente se describen las etapas del diseño para lograr la obtención final de un concepto que será materializado *a posteriori*; tal operación se describe en el capítulo cuarto.

En el capítulo cinco se explica el proceso de integración del mecanismo *in situ*, así como las pruebas finales de alineación y enfoque.

En el capítulo sexto se mencionan los resultados y en el séptimo las conclusiones a las que se llegó con el proyecto así como los trabajos y recomendaciones futuros en pos de la mejora continua.

Finalmente, se adicionan los anexos respectivos como el manual de usuario, algunas tablas de datos importantes, el artículo internacional publicado, así como un artículo extra por actividades adicionales elaboradas durante la maestría.

1. GENERALIDADES

En esta sección se presenta una breve descripción de la astronomía y la ingeniería en nuestro país no con otro fin sino para poder introducirse al entorno en el cual se ha efectuado este estudio. También se describe cuál es la problemática específica que se debe resolver, qué limitaciones y hasta qué alcances se pretendió conseguir, la justificación del trabajo de investigación y diseño y la metodología aplicada.

Al final de la sección se presenta una revisión bibliográfica del estado del arte respecto al problema que se plantea.

1.1 LA ASTRONOMÍA Y LA INGENIERÍA

La historia de la astronomía empieza en la antigua Grecia cuando Aristóteles de Estagira (384 – 322 a.C.) y Demócrito de Abderea (460 – 370 a.C.) se preguntaron acerca de la naturaleza de la visión, intentaron hacer una explicación proponiendo que el color de la luz dependía de la forma, el tamaño y la propiedades generales de los átomos. La historia sobre una estrategia de guerra propuesta por Arquímedes de Siracusa (290? – 212? a.C.), describe la primera aplicación militar de la óptica; la leyenda dice que logró ganar una batalla al Imperio Romano gracias a que enfocó cientos de espejos a las embarcaciones romanas logrando así quemarlas. Por otro lado, Claudio Ptolomeo (85 – 165 d.C.), fue el creador de la teoría geocéntrica que durante 1400 años regiría el desarrollo y fortalecimiento de la astronomía y también escribió cinco libros sobre óptica. Desafortunadamente, solamente uno de ellos sobrevive. Tal tratado contiene de forma empírica y por primera vez las leyes de la refracción de la luz [1].

Los descubrimientos realizados hasta la época de Galileo Galilei (1564-1642) fueron pocos. No obstante, fueron los pilares que fundaron la óptica actual. Galileo Galilei, por medio de una aplicación que le dio a los lentes simples y convencionales que fabricaba su amigo, Hans Lippershey (1570 – 1619 d.C.), logró observar por primera vez en la historia de la astronomía a través de un telescopio y ver los satélites de Júpiter (Fig 1.1). Este descubrimiento destruyó a la teoría geocéntrica de Ptolomeo y casi llevó a Galileo a la hoguera [2].

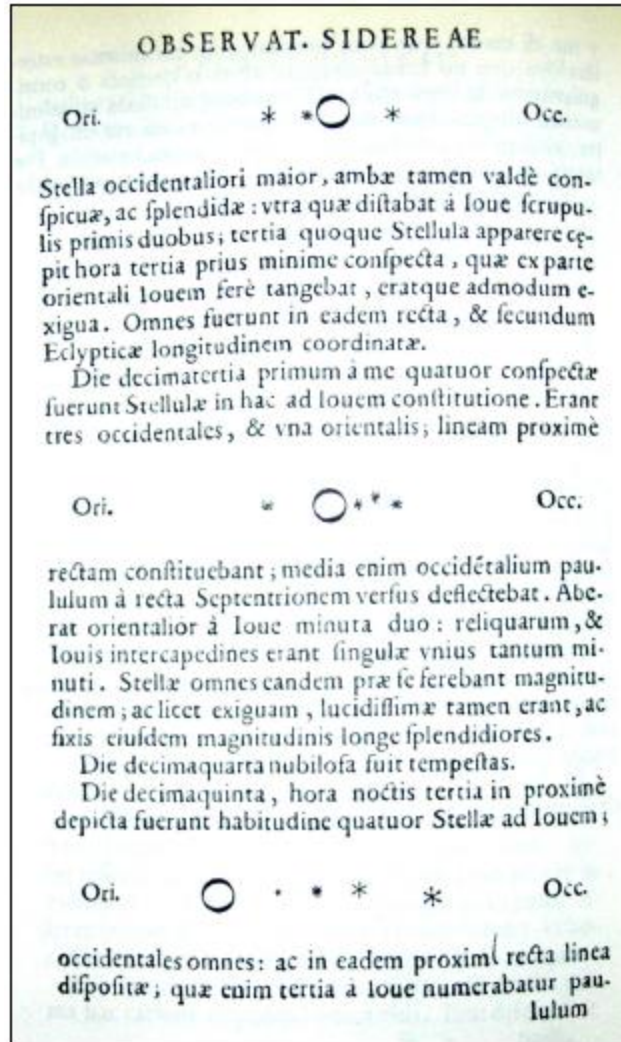


Fig. 1.1. Imagen del *Sidereus Nuncius* Publicado por Galileo Galilei [2].

Al morir Galileo nace un año más tarde Isaac Newton (1643 – 1727 d.C. quien marcó la pauta para todo un progreso en la tecnología óptica y astronómica. Gracias a su creatividad e ingenio, consiguió desarrollar un telescopio cuyo principio funcional estaba regido por óptica reflexiva (espejos) en vez de refractiva (lentes) como en el caso de Galileo. A los largo de varios siglos, astrónomos, ingenieros, físicos y sobre todo ópticos se enmarcaron en este campo de estudio con el objetivo de determinar cuál sistema era mejor para su uso en los telescopios. Al final de todo, por las complejidades en su proceso de manufactura y la presencia de esfuerzos mecánicos que resultan en indeseables deformaciones en las lentes, los telescopios gigantes de hoy en día basan su principio de funcionamiento en la óptica reflexiva. Empero, las lentes tienen su nicho implacable en la instrumentación astronómica que requieren los telescopios para discurrir y escudriñar los cielos [3].

La astronomía en México se ha practicado desde antiguo en Mesoamérica, cuando se tuvo la necesidad de cronometrar el tiempo y elaborar así un calendario de precisión con el objetivo de predecir las estaciones para el cultivo. Los antiguos astrónomos mesoamericanos observaron y predijeron con gran precisión varios fenómenos del Universo como: eclipses y posiciones planetarias, lunas llenas y nuevas, y el advenimiento de equinoccios y solsticios. De hecho, el célebre calendario azteca desarrollado por esta civilización es, más preciso que el calendario gregoriano que se utiliza hoy en día [4].

Ha habido ilustres mexicanos que practicaron actividades astronómicas durante todas las épocas de la historia pero fue hasta 1878 que el primer observatorio profesional dotado de telescopios se inauguró en el país: el Observatorio Astronómico Nacional (OAN). Su primer emplazamiento fue el Castillo de Chapultepec, para pasar 14 años más tarde a Tacubaya, ambos sitios en la Ciudad de México. Las principales actividades astronómicas que se acometieron fueron la determinación de posiciones, la predicción de efemérides, y más tarde la obtención de fotometría óptica, especialmente la recolectada para el proyecto internacional “La carta del cielo”, que se completó en México en 1964, aunque para entonces ya había sido sobrepasada por la cartografía obtenida en Monte Palomar. En 1929 el OAN pasó a la custodia de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) [5], [6] y [7].

El comienzo de la astronomía moderna en México, entendida como el estudio predictivo e interpretativo de los mecanismos de funcionamiento de los astros, data de 1942, cuando se inauguró el Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla, en las afueras de la ciudad de Puebla [8], [9], y [6]. En su tiempo albergó una de las cámaras Schmidt más grandes del mundo, lo que llevó al descubrimiento de los objetos protoestelares Haro-Herbig (Fig. 1.2), las estrellas ráfaga y las galaxias azules con líneas de emisión. A principios de los años 40 había un solo doctor en astronomía en el país, la Dra. Pişmiş, pero el caldo de cultivo para desarrollar la astrofísica se propició incluso antes de su llegada a México a través del choque generacional entre las figuras clave de los ingenieros Joaquín Gallo y Luis Enrique Erro y, más tarde, la entrada en escena del Dr. Guillermo Haro [10].



Fig. 1.2. Objeto Herbig-Haro HH47. Estos objetos fueron estudiados en el observatorio de Tonantzintla por Guillermo Haro de manera separada a George Herbig [10].

En los años 50 comienza un incipiente crecimiento de la comunidad astronómica nacional. Los pocos astrónomos (que en un inicio fueron ingenieros) del momento empiezan a impartir cursos optativos en la carrera de física, y dirigen tesis de licenciatura de estudiantes interesados que, una vez motivados para trabajar en el área, se los envía al extranjero para obtener maestrías y doctorados en instituciones líderes del área. La mayoría de estos estudiantes, una vez graduados, volvieron al país para engrosar principalmente la planta del Instituto de Astronomía de la UNAM (IA-UNAM), creado en 1967, y en menor medida la del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), el nuevo centro surgido en 1971 del Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla. Este último fue el primer centro de investigación establecido fuera de la Ciudad de México, iniciando con ello la descentralización de la investigación en astronomía, si bien los observatorios ya habían salido de la capital décadas antes [10]. En los años 80 astrónomos recién doctorados en el extranjero se incorporan a la sede del IA-UNAM en Ensenada, Baja California, fundada originalmente para dar apoyo al nuevo OAN en la sierra de San Pedro Mártir. En los años 90 el INAOE fortalece su planta con investigadores jóvenes y destacados, en parte atraídos por el proyecto del Gran Telescopio Milimétrico y por el Programa Internacional de Astrofísica Avanzada Guillermo Haro de talleres de trabajo y conferencias anuales. La UNAM sigue su proceso de descentralización al crear en 1996 la Unidad Morelia del IAUNAM, a la que se trasladan algunos de sus investigadores de gran trayectoria desde el Distrito Federal. En 2003 esta unidad se convierte en el Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM (CRyA-UNAM). Otros grupos de astrónomos también se asentaron en provincia en esta época, especialmente en Guanajuato, Jalisco y Sonora [10].

Específicamente, el OAN (Observatorio Astronómico Nacional, Fig. 1.3), cuenta con tres telescopios cuyos diámetros de sus espejos primarios son 2.1 m, para el cual se efectuó el mecanismo descrito en esta tesis, 1.5 m y 0.84 m, los cuales operan en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California, México. Aunque la historia del Observatorio se remonta a la década de 1960, es en 1971 cuando inician las actividades profesionales en este sitio, con la instalación de los telescopios de 1.5 m y de 84 cm. El telescopio de 2.1 m se inaugura en 1979. El Observatorio Astronómico Nacional es operado por el Instituto de Astronomía de la UNAM y su propósito principal es hacer observaciones astronómicas para hacer investigación de la más alta calidad. Para esto, pone los telescopios con los que cuenta al servicio de los astrónomos profesionales, no sólo del Instituto de Astronomía de la UNAM, sino de todas las instituciones tanto nacionales como internacionales donde se haga investigación astronómica de frontera [11].

El punto más alto del Observatorio de San Pedro Mártir se encuentra ubicado a 2830 m sobre el nivel del mar en la Sierra del mismo nombre. El lugar donde se encuentra es todavía un sitio privilegiado para la observación astronómica por su casi nula contaminación lumínica.



Fig. 1.3. Observatorio Astronómico Nacional. Sierra de San Pedro Mártir, Ensenada, B.C., México.

Ahora bien, entendiéndose a la ingeniería como ciencia y arte, es sin duda primordial en el desarrollo de la astronomía, misma que es abordada grupalmente por profesionales de diferentes áreas como ingeniería, física, biología, química, etc. El papel de la ingeniería es el del diseño y manufactura de la instrumentación astronómica, o sea, de los telescopios con sus miles de componentes. De ahí pues que actualmente se tengan grandes avances tecnológicos en lo referente a telescopios que contribuyen al estudio del

Universo. Por lo general cada componente se diseña y especializa para ciertos programas de investigación científica.

En el mundo se han desarrollado telescopios gigantes gracias a los cuales se efectúan investigaciones desde cualquier punto del globo terráqueo abarcando campos de observación impensables, véase Fig. 1.4. En México, el telescopio de 2.1m ubicado en el Observatorio Astronómico Nacional en la sierra de San Pedro Mártir B.C., cuya montura mecánica fue diseñada, construida e instalada bajo la dirección del ingeniero José de la Herrán (1925-) (Fig. 1.5), juega un papel importante en la observación astronómica moderna, pues se ha convertido en un telescopio clásico aún vigente gracias a su moderna incorporación de sistemas de ingeniería mecánicos y electrónicos que le permiten funcionar para propósitos específicos de estudios avanzados como los hacen los otros telescopios modernos del mundo.

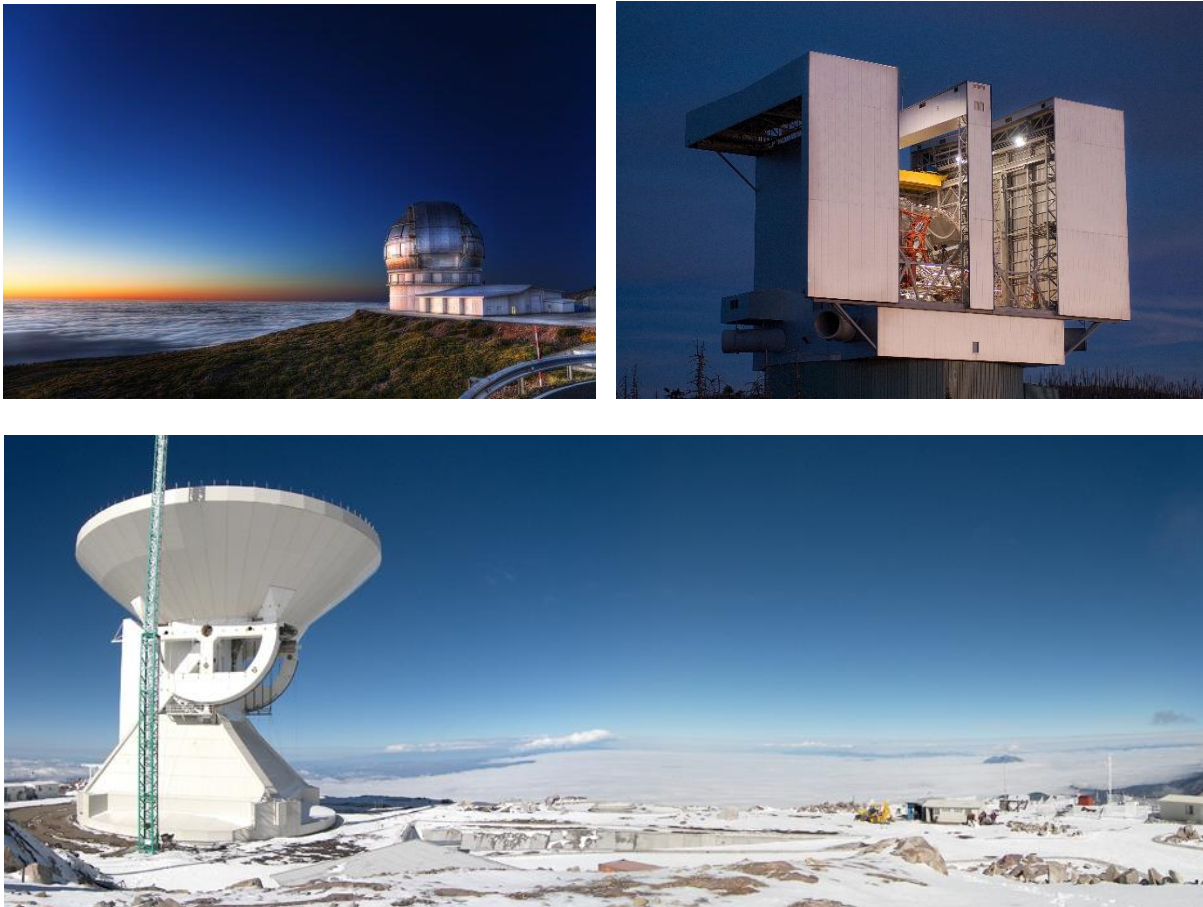


Fig. 1.4. Arriba Izquierda: El Gran Telescopio de Canaria, España.
Arriba Derecha: El Gran Telescopio Binocular, Italia.
Abajo: Gran Telescopio Milimétrico, México.



Fig. 1.5. Telescopio de 2.1 m, México.

El Telescopio de 2.1 m del OAN, es justamente el instrumento para el cual se ha realizado el proyecto que se describe en esta tesis. El componente óptico de tal telescopio que contiene al mecanismo de alineación y enfoque diseñado, manufacturado e integrado por este proyecto, es el espectrógrafo Echelle (Fig.1.6).



Fig. 1.6. Espectrógrafo Echelle.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El espectrógrafo Echelle fue fabricado en 1970 por la empresa francesa REOSC. Proporciona una resolución R comprendida entre 18.000 y 5.000 Å [12]. La disposición de los elementos ópticos principales del espectrógrafo se muestra en la Figura 1.7. Las principales características de este instrumento se mencionan en la Tabla 1.1 [12].

ESPECTRÓGRAFO ECHELLE	
Resolución R.	De 18000 a 5000 Å.
Rejilla principal.	254 x 128 mm; 79 líneas.
Ángulo de máxima eficiencia.	63°433.
Ángulo de incidencia.	71°.
Ángulo de dispersión.	±2°63.
Dispersión.	De 4Å/mm a 16Å/mm.
Dispensor cruzado.	900 líneas/mm.
Rejilla de CCD.	300 líneas/mm.
Capacidad de ajuste con el REOSC/UMass setup.	Entre los 8 (cerca del Alfa) y 16 (cerca del 4,000Å) órdenes.
Capacidad de ajuste con el UCL/Mil setup.	Entre los 12 y 30 órdenes.
Tipo de lámparas montadas permanentemente.	Argón, Cesio y Rubidio.
Tipo de lámparas que pueden ser montadas en el espacio adicional.	Torio-Argón, Neón y Helio-Argón (con su propio suministro de tensión eléctrica).
Rango ajustable de abertura.	Ancho mínimo = 30µm. Ancho máximo = 900µm.
Diámetro del campo visual de la abertura.	18mm.
Longitud de la abertura.	30mm.
Cantidad de máscaras.	10.

Tabla 1.1. Especificaciones técnicas del espectrógrafo Echelle [12].

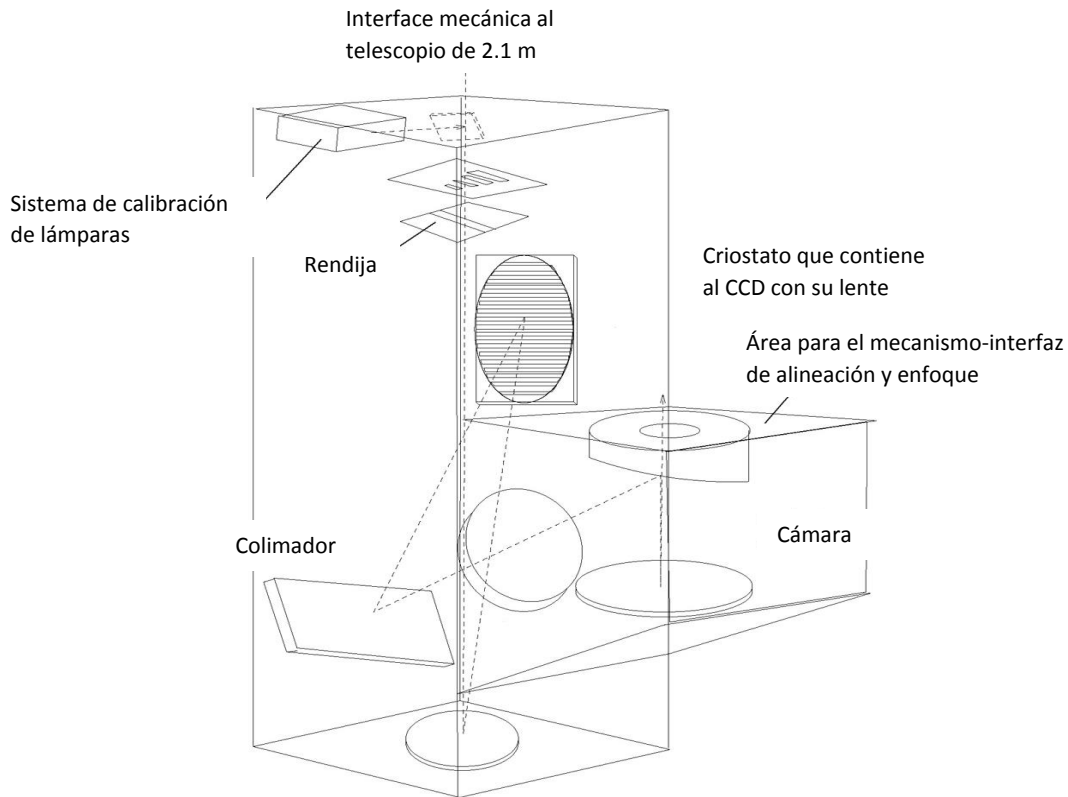


Fig. 1.7. Disposición de los elementos del espectrógrafo Echelle [12].

A partir de la Fig. 1.7 se pueden observar los elementos óptico-electrónicos que presentan el problema a resolver con este proyecto: la lente de una cámara denominada sistema óptico y la lente de un CCD. Físicamente el CCD está contenido en un criostato enfriado con nitrógeno líquido al cual está adherida su electrónica con la cual se procesan las imágenes espectrales detectadas provenientes de la lente del sistema óptico del espectrógrafo y se canalizan hacia el ordenador (Fig. 1.8). Las imágenes que el CCD detecta deben estar nítidas y sin aberraciones para que proporcionen la información fiel requerida para la ciencia. Dicho de otro modo, para que estos dos elementos funcionen correctamente deberán estar alineados y enfocados perfectamente, por lo que se debe contar con una interfaz o mecanismo especialmente diseñado para realizar este trabajo de acuerdo con algunas limitaciones, especificaciones y requerimientos que se detallan en la sección de especificaciones y requerimientos. Aquí radica la esencia del problema de esta tesis, el cual se resume en el modo de alinear y enfocar esas dos lentes.

Específicamente la interrogante que plantea el problema es, ¿mediante qué mecanismo o interfaz es posible lograr la alineación y el enfoque óptimos de la lente del CCD y la del sistema óptico del espectrógrafo Echelle del OAN de SPM (Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir B.C.)?

En resumen, se deberá resolver el problema de la alineación y enfoque de las lentes del espectrógrafo Echelle y el CCD para lograr imágenes espectrales lo suficientemente nítidas mediante el diseño, manufactura e integración de un mecanismo adecuado para ello.

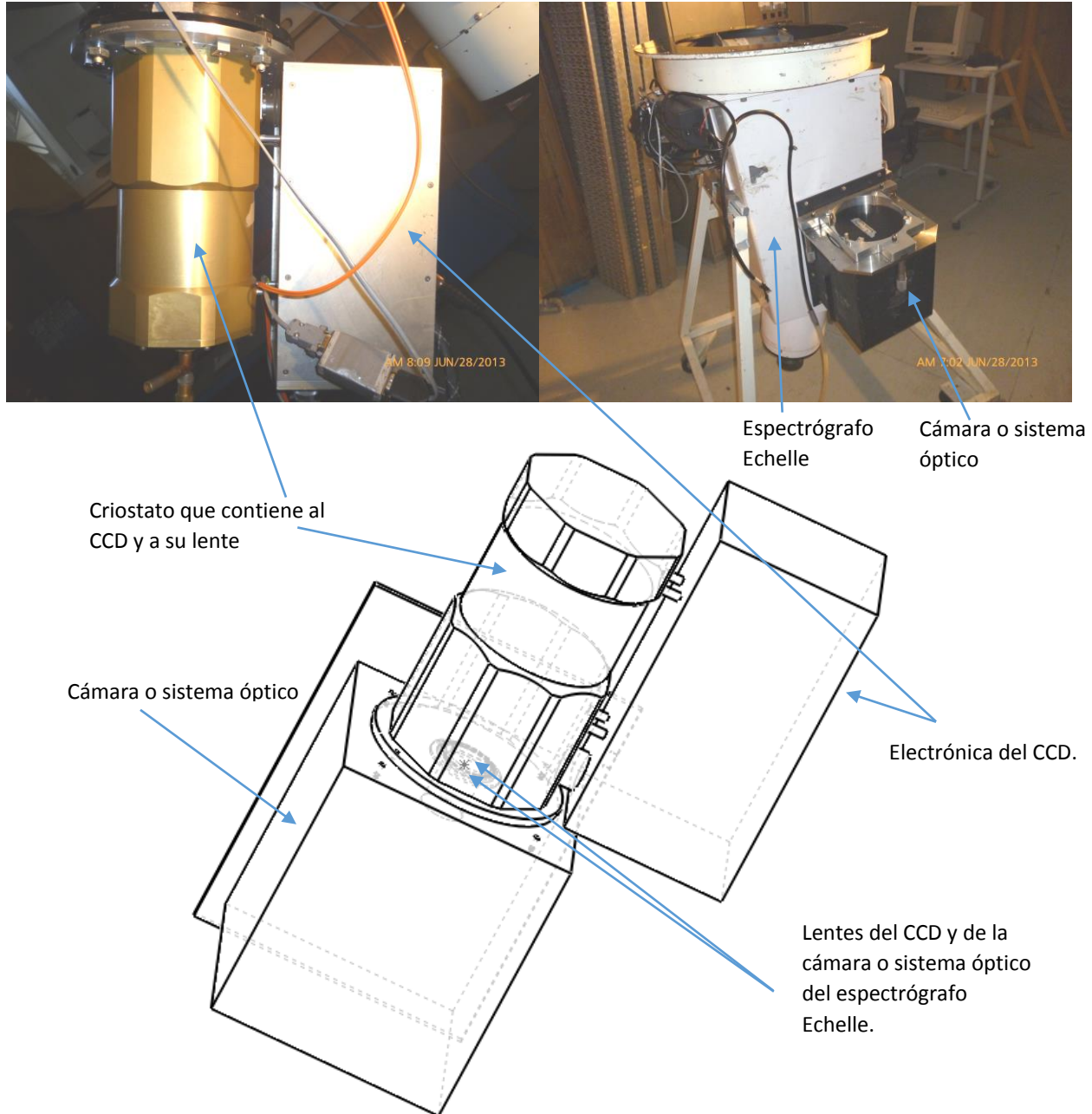


Fig. 1.8. Superior izquierda, criostato con caja electrónica integrada que contiene al CCD y a su lente. Superior derecha, en negro, la cámara o sistema óptico que contiene la lente del espectrógrafo Echelle. Abajo, CAD que muestra cómo ambas lentes deben estar en una posición óptima de alineación y enfoque.

1.2.1 ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS

Como se ha mencionado, debe haber una apropiada alineación y enfoque para que los datos que se reflejen en la pantalla del ordenador sean confiables para el análisis astronómico. Por facilidad, para solucionar este problema es conveniente mantener fija una pieza y sólo mover otra; en este caso es factible mover el criostato para generar el plano de alineación y la distancia de enfoque entrabmas lentes. Todo movimiento aplicado entonces al criostato será susceptible de ser apreciado en el ordenador. Se considera que existe una apropiada alineación y un óptimo enfoque cuando un espectro desplegado en la pantalla es observado como un patrón de líneas cuyas dimensiones no exceden 3.5 pixeles; además no deben verse dobles. Todo esto aplica para las cinco zonas observables: Azul-Azul, Azul-Rojo, Rojo-Azul, Rojo-Rojo y Centro.

Adicional a esto, el mecanismo debe satisfacer los requisitos de ingeniería establecidos. Sus especificaciones incorporan restricciones de deformación debido principalmente a los esfuerzos y a las diferencias térmicas. Todo ello se expresa en la Tabla 1.2.

REQUERIMIENTOS DEL MECANISMO	
Parte móvil para alineación y enfoque.	Criostato del CCD.
Movimientos lineales.	A lo largo de X, Y: ± 2 mm; a lo largo de Z: 3 mm.
Movimientos rotacionales.	Inclinación respecto a X, Y: 2° ; alrededor Z: $\pm 4^\circ$.
Lentes que requieren alineación y enfoque	Lente de la cámara y lente del CCD.
Paso de luz permisible a través del espacio entre lentes.	Ninguno.
Cantidad de vapor de agua permisible en las lentes.	Ninguno.
Tipo de gas a emplear para evitar empañamiento.	CO ₂ .
Variación dimensional permisible debida a la temperatura y a los esfuerzos.	0.05 mm
Carga total para ser soportada.	400 N
Distribución de la carga.	80% pertenece al CCD y el resto a su Sistema electrónico.
Cantidad necesaria de pixeles en la imagen para considerarse enfocada.	3.5 pixeles.
Zonas a enfocar.	Todas: Azul-Azul; Azul-Rojo, Rojo-Azul, Rojo-Rojo y el Centro.
Peso permisible.	Tan ligero como sea posible.

Tabla 1.2. Requerimientos técnicos del mecanismo.

De acuerdo con los datos de la Tabla 1.1, cinemáticamente, el mecanismo deberá permitir el movimiento del criostato en seis grados de libertad, a saber, tres rotacionales alrededor de los ejes cartesianos X, Y, Z, y tres lineales, a lo largo de los mismos, de ahí que el mecanismo debe ser un sistema bastante complejo y gobernado bajo los principios de diseño mecánico dadas las condiciones geométricas determinadas por la disposición de los elementos en juego.

1.3 OBJETIVO

El objetivo general de este proyecto es diseñar, manufacturar, caracterizar e integrar un mecanismo que sea capaz de alinear y enfocar la lente de la cámara del espectrógrafo Echelle con la del criostato Marconi, pertenecientes al telescopio del 2.1 metros del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, B. C.

Esto conlleva desde luego a otros objetivos específicos, mismos que consisten en cumplir con cada una de las etapas que el proceso de diseño en ingeniería planteado indica (ver en el capítulo 2), así como el de iterar una u otra etapa para conseguir la solución al problema.

1.4 HIPÓTESIS

Si bien es cierto que al empatar el método científico con el de diseño ingenieril, en este último cada una de los conceptos generados durante la lluvia de ideas es una hipótesis y una posible solución al problema (ver capítulo 2), de manera preliminar es posible enunciar una hipótesis la cual debe comprobarse durante el desarrollo del proyecto, y es la siguiente: es posible lograr la alineación y enfoque entre la lente del espectrógrafo y la del CCD, moviendo únicamente al CCD en seis grados de libertad controlados mediante un sistema totalmente mecánico que soporte a esta pieza y la mueva mediante elementos de calibración precisos.

Lo anterior implica que existe entonces una forma de alinear y enfocar empleando sólo elementos mecánicos para lograr la función crítica en su forma más elemental.

Naturalmente, puede haber más formas como se verá en la sección del análisis del estado del arte y en la generación de conceptos, no obstante las restricciones y requerimientos, una posible respuesta factible al problema es la hipótesis enunciada en este apartado.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

El desarrollo de este proyecto se pretende llevar de principio a fin. No obstante, su culminación dependerá esencialmente del tiempo disponible para efectuar las múltiples pruebas *in situ*, ya que se tienen saturados los tiempos para ingeniería en el observatorio. Los resultados y el avance total del proyecto se mencionan en la sección de resultados y conclusiones de la tesis.

Por otro lado, técnicamente se tuvieron algunas restricciones durante el desarrollo del concepto. Entre las más importantes se puede mencionar que la distancia entre los Institutos de Astronomía de Ciudad Universitaria y de Ensenada es una limitante un tanto ardua, pues la comunicación para consulta de datos importantes concerniente a los instrumentos astronómicos fluyó de manera lenta. Otra limitante es que no se contó con los planos precisos de las piezas en juego, sino que para su dimensionamiento se efectuaron varios levantamientos para recabar la información necesaria, lo que implicaba una incertidumbre considerable que con el transcurso del tiempo se fue disipando. Otra, es que se desconocían las características ópticas de las lentes, tanto la del CCD como la de la cámara del espectrógrafo, por lo que se tuvieron que hacer varias consideraciones al respecto (como se verá en el capítulo 3); esto, limitó en gran medida el poder entender el problema y la posible solución. Una de las limitantes con mayor significancia fue que existe muy poco espacio en una de las zonas en la que está el criostato colindando con la pared inmediata del espectrógrafo y la zona entre el criostato y su caja de electrónica, la cual consiste en un espacio que está sumamente reducido; técnicamente no es posible o permisible mover ni un milímetro tal caja respecto al criostato; ésta se encuentra fija o anclada al mismo. De ahí que el reto consistió justamente en diseñar el mecanismo de tal manera que con todo y estas limitaciones de espacios tan cerrados entre las piezas clave de pudiera lograr la meta.

1.6 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Este es un proyecto, que a su vez forma parte de un megaproyecto llamado ESOPO (Espectrógrafo Óptico de Mediana Resolución) con fines científicos para el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, B.C. de la UNAM.

El propósito básico de ese proyecto es contar con un espectrógrafo moderno y eficiente para el telescopio de 2.1 m, que permita llevar a cabo una gran diversidad de proyectos astronómicos que requieran de cobertura espectral en el intervalo óptico amplio, a resolución espectral $500 < R \leq 5000$. Estos proyectos incluyen observaciones de objetos estelares y extendidos, que van desde galaxias externas hasta estrellas en la Galaxia [13 y 14].

Como elementos primordiales para realizar tal investigación científica están el espectrógrafo Echelle y los CCD Marconi, pertenecientes a dicho telescopio, cuyo núcleo de su funcionalidad es la generación del espectro del astro observado para que pueda ser caracterizado. Pero esto depende puntualmente de la óptima alineación y enfoque entre las lentes de dichos elementos. Aquí es donde radica la importancia del tema. Luego entonces es sumamente necesario el contar con un mecanismo que realice esa función crítica, lo cual se traduce en el quid de este proyecto que por lo anterior, su desarrollo queda justificado.

1.7 METODOLOGÍA

Para salir avante con este proyecto, se ha empleado básicamente el método de diseño en ingeniería mecánica, el cual es una forma del método científico aplicado para realizar un proyecto tecnológico. En este caso, el proyecto se desarrolla para obtener un producto final que le permitirá al usuario (o sea al astrónomo) obtener una imagen enfocada de los cuerpos celestes para estudiarlos.

En lo referente a generación de conceptos se ha empleado como herramienta base el programa CAD SolidWorks®, mientras que para el análisis del comportamiento dinámico y térmico se ha empleado este mismo comprobando los resultados mediante ANSYS® y COSMOL® Multiphysics.

Se ha seguido también hasta cierto porcentaje el criterio de re-ingeniería, dadas las limitaciones geométricas que se tienen entre el criostato y su electrónica y entre el criostato y el espectrógrafo, esto durante las etapas iterativas del diseño.

Durante las pruebas preliminares se han empleado las nociones básicas de estadística para efectuar los experimentos del cual se han usado como instrumentos una cámara semi-profesional y el programa Photoshop® para calcular la repetividad y confiabilidad del mecanismo diseñado y fabricado. Ya en el observatorio se han realizado las pruebas empleando directamente el método experimental de calibración con base en lo que indica el modelo matemático como una primera aproximación y *a posteriori* de manera iterativa para conseguir el foco; para ello se emplea el programa informático astronómico ds9, con el cual es posible observar el espectro fotografiado una vez que ha sido detectado por el CCD.

Cabe decir que otras de las herramientas empleadas son: la metodología de administración de proyectos consistente en diagramas de Gantt y la de métodos y técnicas de fabricación industrial, con el objetivo de agilizar y hacer más eficientes las actividades concernientes a las etapas del diseño y la fabricación de cada una de las piezas que conforman el mecanismo.

Con los datos obtenidos, al final se establece una metodología enfocada al usuario para la integración del mecanismo, mismo que se expresa como manual de usuario en el apéndice de esta tesis.

1.8 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE

Sobre los antecedentes de este proyecto, en primer lugar cabe decir que al espectrógrafo Echelle en 1994 le fue practicada una mejora continua sustituyendo su cámara por un sistema que permitiera el empleo de CCD. Esta mejora ha implicado desde entonces la implementación de varios mecanismos de acoplamiento previos al que se describe en esta tesis. Para efectos de ESOPO, el espectrógrafo mencionado desde finales del año 2010 posee un nuevo detector denominado Marconi-2, el cual cuenta con una geometría que, aunada a algunas modificaciones que se le hicieron al sistema óptico del espectrógrafo hizo necesario el diseño de nuevos mecanismos que le permitieran el adecuado funcionamiento de alineación y enfoque, pues los mecanismo previos dejaron de ser apropiados para el nuevo sistema. Para el año 2011 se empezó a utilizar como mecanismo de alineación y enfoque una mesa manufacturada con un diseño de cuatro puntos, la cual se ajustaba de manera mecánica mediante cuatro tornillos sin rotores y sin permitir libre juego, lo que provocaba que la base de tal mesa se flexionara; derivado de ello el proceso de enfoque consumía tiempo en demasía además de que era poco repetible y sólo se movía de manera reclenable alrededor de los ejes X y Y [15].

A principios del año 2012 se diseña y manufactura otro mecanismo de alineación y enfoque cuyo principio de funcionamiento se basa en tres puntos de ajuste y tornillos micrométricos de alta precisión que permitían efectuar el movimiento de *tip-tilt* (movimiento rotatorio alrededor del eje X y Y), véase Fig. 1.9. Este sistema mecánico no permitía el movimiento rotatorio alrededor del eje Z ni tampoco el lineal a lo largo de X y Y, además de que por contar con ranuras en “v” en los puntos de contacto entre la placa móvil y las puntas de bola de los tornillos de precisión existían en realidad dos puntos tangenciales a esa bola; este tipo de configuración lo hicieron un sistema isostático, que repercutía directamente en el enfoque de una o a lo más dos zonas de las cuatro requeridas. Otro aspecto de este sistema es que se empleaban como tornillos de calibración unos micrómetros de alta precisión que hacían dos funciones, la de cargar y la de calibrar, factor que requería mejoras por principios de diseño mecánico [15].



Fig. 1.9. Mecanismo de alineación anterior [15].

En la literatura existen algunos trabajos referentes a mecanismos de enfoque óptico más o menos análogos al mecanismo que se pretende desarrollar, no obstante, poseen algunas diferencias por tratarse de funciones críticas diferentes por cumplir en el sistema. Existen mecanismos de enfoque para lentes u objetivos de telescopios, de microscopios y de cámaras fotográficas. Aquí se mencionarán algunos ejemplos.

En [16] se muestra el mecanismo de enfoque de un microscopio. El sistema se compone de un tubo y una cremallera sobre la que se acopla un tornillo micrométrico, véase Fig. 1.10. Este tipo de sistemas es ampliamente empleado

para estos dispositivos. En [17] se muestra el mecanismo de enfoque para un telescopio comercial que consiste elementalmente en los mismos componentes: cremallera, tornillo micrométrico y el tubo, que posee dos guías laterales para no perder la alineación, véase Fig. 1.11. Como se puede apreciar, este tipo de sistemas pueden poseer accionamiento mecánico o eléctrico adicionando un motor y un elemento de transmisión de potencia que para este caso consiste en una banda dentada acoplada al elemento micrométrico de calibración. Este sistema eléctrico a su vez está controlado electrónicamente para realizar la tarea de enfoque automático.



Fig. 1.10. Mecanismo de enfoque para un microscopio [17].



Fig. 1.11. Mecanismo de enfoque para un telescopio comercial [17].

Otro sistema mecánico de enfoque se describe en [18]. En este dispositivo fotográfico se integra un enfoque manual y/o automático. Su sistema cuenta con un motor piezoeléctrico que le permite tener un peso y dimensiones menores. Este motor tiene la característica de ser silencioso y de movimiento suave, lo que le permite tener un índice de vibraciones mecánica muy bajo. Adicionalmente, funciona con las ondas ultrasónicas de alta frecuencia que produce un anillo que hace las veces de estator. La energía de las vibraciones se emplea para hacer

girar un anillo metálico que funge como rotor. La cerámica piezoeléctrica, un elemento que produce vibraciones ultrasónicas cuando se le aplica un voltaje de una frecuencia específica, se organiza en una formación de anillos en el estator. Esta configuración de cerámica piezoeléctrica produce dos vibraciones ultrasónicas en el estator. Combinando estas dos vibraciones ultrasónicas eficazmente, es posible convertir la energía de las vibraciones que produce movimiento simple en energía conocida como “ondas progresivas deflectoras” que se mueven alrededor de la circunferencia (sentido de rotación) del anillo. La fricción entre estas ondas progresivas deflectoras en la superficie metálica del estator y la superficie del rotor produce fuerza, haciendo que el rotor gire. De este modo, el anillo de enfoque del objetivo que está conectado al rotor se mueve, dando como resultado una unidad de enfoque precisa. Este mecanismo presenta una configuración triaxial que utiliza tres pares de bobinas conductoras y rodamientos de baja fricción alrededor del grupo compensador del sistema óptico del objetivo para producir, un compensador de movimiento independiente, por lo que es capaz de compensar los movimientos de la cámara que ocurren en diagonal así como aquellos que ocurren de abajo hacia arriba y de lado a lado. Véase Fig. 1.12.

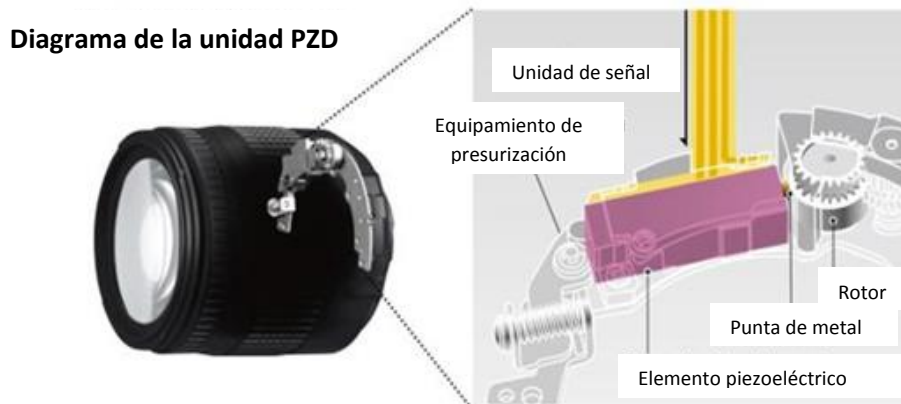


Fig. 1.12. Mecanismo de enfoque en una cámara fotográfica comercial [18].

Por otro lado, en [19) se presenta un diseño de un mecanismo de enfoque consistente en un actuador del motor paso a paso que permite un control preciso de la rotación angular, y puesto que acciona el mecanismo de enfoque directamente sin ningún engranaje reductor adicional, hace que sea silencioso. Estas características también proporcionan al objetivo un movimiento de enfoque automático progresivo; véase Fig. 1.13.

Esquema del motor paso a paso:



Fig. 1.13. Mecanismo de enfoque en una cámara fotográfica comercial [19].

En [20], se puede entender el tipo de mecanismo de alineación y enfoque de una cámara de teléfono portátil. Un módulo de accionamiento de lente que incluye un mecanismo de enfoque automático capaz de mover una lente de acuerdo con al tres grados de libertad y un sistema de estabilización de imagen óptica capaz de mover la lente de acuerdo con al menos dos grados de libertad. El mecanismo de enfoque puede estar configurado con cuatro imanes separados y cuatro bobinas separadas colocados alrededor de un portador de la lente. Cada bobina puede entregar una fuerza en una esquina del soporte de la lente a lo largo del eje óptico. De esta manera, si las cuatro bobinas son impulsadas apropiadamente con una corriente en modo común que pueden proporcionar las fuerzas necesarias para enfocar la lente. Sin embargo, si es impulsado diferencialmente, puede inclinar de forma activa el objetivo para compensar la inclinación de la lente parasitaria. La combinación del mecanismo de enfoque automático y la imagen óptica del mecanismo de estabilización dentro de un solo módulo de actuador permite modificar la posición de la lente en relación con el sensor de imagen a lo largo de cinco ejes de referencia. Véase Fig.1.14.

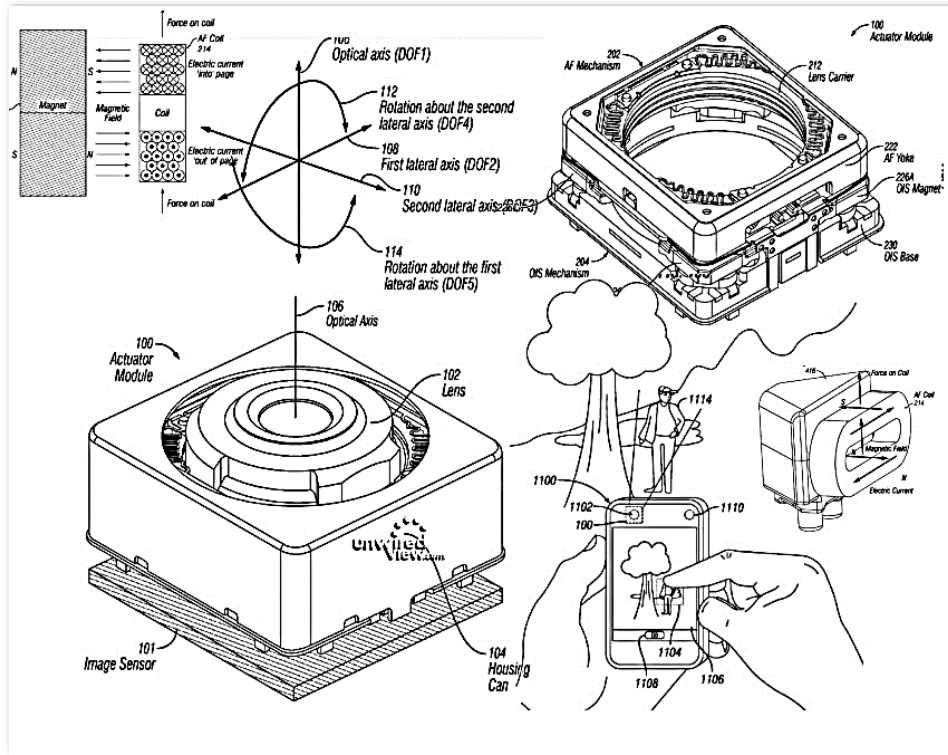


Fig. 1.14. Mecanismo de alineación y enfoque en una cámara de teléfono portátil [20].

En [21] Alejandro Farah investiga, diseña y fabrica un barril opto-mecánico para la cámara de OSIRIS del Gran Telescopio de Canarias, España, el cual integra el mecanismo de enfoque que funciona a partir de un sistema de engranes helicoidales restringidos a toda traslación por medio de rodamientos. La rotación es transmitida una celda óptica por medio de roscas. El enfoque se logra gracias a la traslación de la celda a lo largo de una guía lineal. El movimiento se transmite a partir de un motor de pasos. Para evitar los juegos entre las roscas, el sistema está precargado por medio de tres resortes. La celda no tiene rotación alguna solo presenta traslación a lo largo de ejes guía. Véase Fig. 1.15.

compensación de alineación, mas no por ser esos movimientos parte de su función crítica.

Si se parte de la premisa que el movimiento de alineación y enfoque es en realidad un posicionamiento, cabe decir que existen otros autores que han trabajado sobre sistemas de posicionamiento que están destinados a múltiples usos incluyendo a mecanismos espaciales de instrumentación astronómica, astronáutica, máquinas-herramienta, robots industriales, entre otros.

En [24] se ha investigado sobre los robot paralelos, que se caracterizan por contar con una plataforma fija y otra móvil unidas por cadenas cinemáticas consideradas de tipo serial, que a diferencia de la cadena cinemática que conforma a un robot manipulador serial con todas sus juntas actuadas, la cadena serial de un robot paralelo cuenta con juntas no actuadas incrementando su complejidad en cuanto al análisis cinemático, pero también aumentando la estabilidad del robot así como su capacidad de carga, permitiendo entonces realizar operaciones de posicionamiento de cargas a altas velocidades y con gran precisión. Entre este tipo de mecanismos de posicionamiento espacial (6 grados de libertad), la Plataforma Stewart [25] y [27] se distingue entre los robots paralelos por contar con un único actuador lineal en cada una de sus cadenas cinemáticas, generalmente hidráulico, lo que le permite cambiar la longitud de cada una de sus “patas” y le brinda una estabilidad sobresaliente entre todas las plataformas paralelas, así como una gran capacidad de carga. Tales virtudes han hecho a la Plataforma Stewart, ideal en tareas donde se necesite generar movimiento general en el espacio como los simuladores de vuelo, cabe mencionar que para esta aplicación se necesitan mover réplicas de cabinas de vuelo que llegan a tener masas de hasta 15000 Kg. El análisis cinemático para este mecanismo se efectúa a través del método de Denavit y Hartenberg [26]. Véase Fig. 1.17.

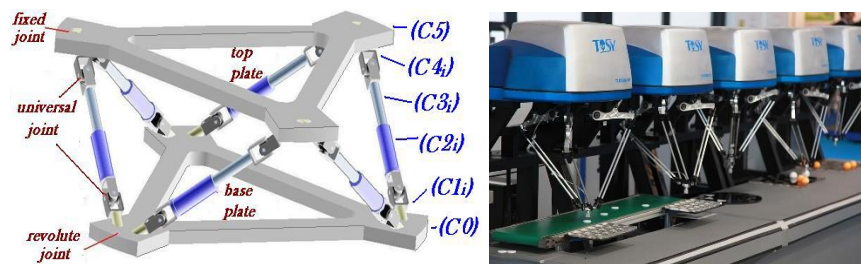


Fig. 1.17. Configuración de la Plataforma Stewart y una de sus aplicaciones [27].

Existen otros múltiples tipos de robots cuya función es la de posicionamiento. Algunos son de lazo abierto, otros de movimiento prismático y otros mixtos. Su accionamiento se da a base de servomotores para lograr la precisión requerida [26]. De manera elemental, se encuentra el mecanismo de posicionamiento mostrado en la Fig. 1.18, el cual consta de un sistema de tornillos de bolas que

mueven una plataforma y constan de resortes para efectuar el movimiento retráctil así como para reducir el retroceso (conocido en inglés como *backlash*). Este sistema es ampliamente usado en las máquinas-herramientas tanto de accionamiento manual como automático. El sistema puede ser de movimiento uniaxial, biaxial o triaxial [28].

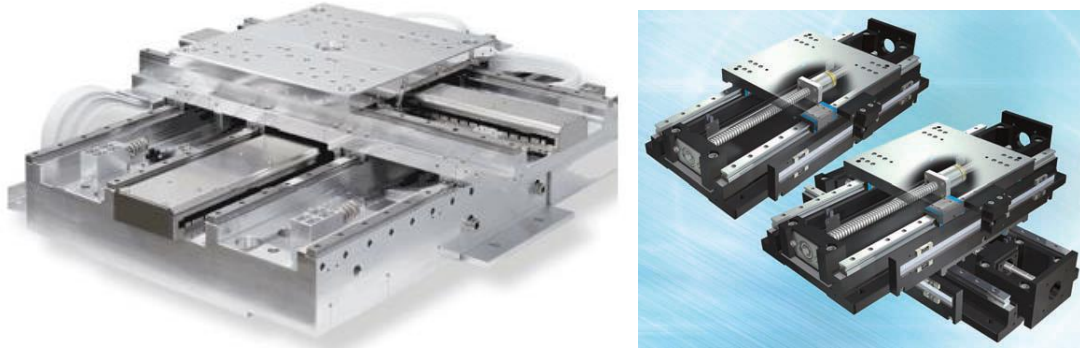


Fig. 1.18. Mecanismo de posicionamiento lineal biaxial [28].

2. MARCO TEÓRICO

Muchos son los enfoques que se tienen para diseñar “algo”. Existe abundante teoría respecto al tema del diseño, en la cual puede haber una u otra diferencia según sea el enfoque o el tipo de entes a diseñar; no obstante la teoría general es más o menos equivalente. En este capítulo se establecen las bases que rigen al diseño mecánico y que se han de emplear para poder desarrollar un mecanismo capaz de enfocar y alinear las lentes objeto de estudio. Es decir, la teoría aquí expuesta fue la que a criterio del autor de esta tesis se ajusta al tipo del problema a resolver según las condiciones iniciales que se tienen y las finales que se requieren. Cabe decir que la información contenida en este capítulo se describe de manera conceptual general, ya que en el capítulo 3 se aplica la teoría al problema a resolver específicamente empleando herramientas de diseño (diagramas funcionales, ecuaciones, software, matrices de decisión, prototipos, etc.) que aunque posiblemente no se muestren aquí por motivos de espacio, también forman parte del marco teórico. Más información puede encontrarse en la literatura referenciada en la bibliografía.

2.1. EL DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA

La ingeniería mecánica se define como la ciencia y arte que mediante la aplicación de principios físicos y tecnológicos investiga, crea, diseña, desarrolla e implementa principios, máquinas, productos, y procesos operativos para propósitos específicos del ser humano cuidando al medio ambiente [29] y [30].

Para el caso particular del problema que se aborda en esta tesis, la definición anterior se aplica para un mecanismo o máquina. En efecto:

“Un mecanismo transforma el movimiento en un patrón deseable y por lo general desarrolla fuerzas muy bajas y transmite poca potencia. Una máquina contiene mecanismos que están diseñados para producir y transmitir fuerzas significativas. No existe una clara línea divisoria entre mecanismos y máquinas. Difieren en su grado y no en su clase. Si las fuerzas o niveles de energía en el dispositivo son significativos se considerará como una máquina; si no es así, será considerado como un mecanismo. Una definición útil de trabajo de un mecanismo es un sistema de elementos acomodados para transmitir movimiento de una forma predeterminada. Ésta puede

ser convertida en una definición de una máquina si se le agregan las palabras “y energía” después de la palabra “movimiento.” [31].

De lo anterior, la meta principal para este proyecto es la elaboración (de principio a fin) de un mecanismo pasando por cada etapa del proceso del diseño en ingeniería mecánica, mismo que se describirá acto seguido.

2.2. EL PROCESO DEL DISEÑO MECÁNICO

La metodología del diseño mecánico tiene diversos enfoques. En primer lugar está la metodología general del diseño [32]. Desde otra óptica se encuentra el diseño axiomático o funcional [33], [34] y [35], el cual abarca los principios básicos a tomar en cuenta durante el diseño de detalle. También se encuentra el diseño comparativo [36] y [38], el cual basa sus principios en una inspiración de la naturaleza y, existe también el diseño apodíctico [37]. En resumen, existen varios enfoques del diseño aplicables según la etapa del proceso general del diseño en la que se esté trabajando. En este apartado se describirán de manera general los conceptos más relevantes del diseño mecánico que fueron tomados en cuenta para realizar el proyecto.

2.2.1. EL PROCESO GENERAL DE DISEÑO

De acuerdo con Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger [32] el proceso genérico de diseño se puede expresar en seis etapas, mismas que se muestran en la Fig. 2.1.

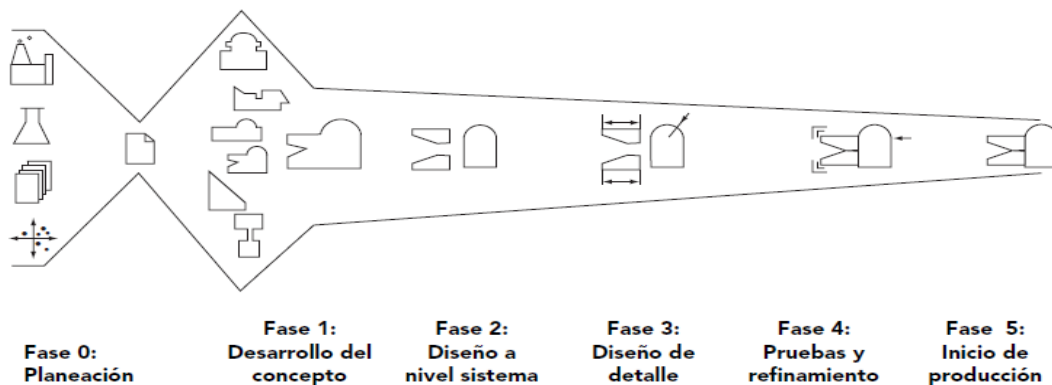


Fig. 2.1. Proceso genérico del desarrollo del producto [32].

- 0. Planeación:** También conocida como “fase cero” porque precede a la aprobación del proyecto y lanzamiento del proceso real de desarrollo del producto. Esta fase se inicia con una estrategia corporativa e incluye la evaluación de desarrollos tecnológicos y objetivos específicos. La salida de la fase de planeación es la declaración de misión del proyecto, la cual especifica el objetivo del producto, metas, suposiciones clave y restricciones.
- 1. Desarrollo del concepto:** Esta fase consiste en la identificación de necesidades del cliente, la generación y evaluación de conceptos alternativos al producto y la selección de uno de estos para desarrollo y pruebas. El concepto se define como una descripción de la forma, función y características de un producto, y por lo general está acompañado por un conjunto de especificaciones, un análisis de productos análogos y una justificación económica del proyecto.
- 2. Diseño a nivel sistema:** Esta etapa de diseño incluye la definición de la arquitectura del producto y la descomposición del producto en subsistemas y componentes. Aquí se realiza el análisis funcional del producto. El esquema de ensamble final para el sistema de producción suele definirse también durante esta fase final. La salida de esta fase por lo general comprende un diseño geométrico del producto, una especificación funcional de cada uno de los subsistemas del producto y un diagrama de flujo preliminar del proceso para el ensamble final.
- 3. Diseño de detalle:** La fase de diseño de detalle incluye la realización de cálculos ingenieriles mediante la aplicación de la investigación científica o la aplicación de conocimientos científicos ya existentes, lo que desemboca entonces en la especificación completa de la geometría, materiales y tolerancias de todas las partes únicas del producto y la identificación de todas las partes estándar a ser adquiridas. Se establece un plan de proceso y se diseña el herramental para cada pieza a ser fabricada dentro del sistema de producción. La salida de esta fase es la documentación de control del producto, es decir, los dibujos o archivos de computadora que describen la geometría de cada una de las piezas y su herramental de producción, las especificaciones de las piezas compradas, y los planes de proceso para la fabricación y ensamble del producto. Dos problemas de importancia crítica que se manejan en la fase de diseño de detalle son el costo de producción y el desempeño robusto del producto.
- 4. Pruebas y refinamiento:** Durante la fase de pruebas y refinamiento se abarca la construcción y evaluación de versiones múltiples de preproducción del producto. Los primeros prototipos (denominados alfa)

por lo general se construyen con piezas destinadas a producción, es decir, piezas con la misma geometría y propiedades de material que la versión de producción del producto, pero no necesariamente fabricadas con los procesos reales a usarse en producción. Los prototipos alfa se prueban para determinar si el producto funcionará como está diseñado y si el producto satisface las necesidades de los clientes clave. Los prototipos siguientes (llamados beta) por lo general se construyen con piezas obtenidas de los procesos destinados a producción pero no se pueden ensamblar usando el proceso de ensamble final pretendido. Los prototipos beta son evaluados exhaustivamente en forma interna y también en general son probados por clientes en su propio ambiente de uso. La meta para los prototipos beta suele ser responder preguntas acerca de la operación y confiabilidad para identificar cambios de ingeniería necesarios para el producto final.

5. Inicio de producción: En la fase de inicio de producción, el producto se manufactura usando el sistema de producción pretendido. El propósito del inicio es capacitar al personal y resolver cualquier problema en los procesos de producción. Los productos producidos durante el inicio se proporcionan a veces a clientes preferidos y son cuidadosamente evaluados para identificar cualquier falla. La transición de inicio de producción a producción en curso suele ser gradual. En algún punto en esta transición, el producto es lanzado y queda disponible para su distribución generalizada.

El proceso de diseño es un proceso iterativo, pues por su naturaleza no avanza en forma lineal sino que dependiendo de las necesidades y el grado de satisfacción y por diversas circunstancias de mejora u otras puede regresar n veces a una etapa previa para ser modificado. Además, cada etapa contiene en sí misma otro conjunto de sub-etapas que también son cíclicas. Es decir, el proceso de diseño se puede describir como una función de lazo cerrado en la que existen múltiples sub-funciones de retroalimentación para completar el ciclo de vida del producto [31]. A este respecto, esto último en cuanto a sustentabilidad queda fuera del alcance de esta tesis, aunque cabe aclarar que sí fue contemplado.

Es preciso aclarar que en esta tesis se empleará la voz “producto” entendiéndose a éste como el “mecanismo” de alineación y enfoque. Asimismo, la última etapa, la cual corresponde a “inicio de producción” debe entenderse para efectos de esta tesis como “fabricación final e integración”. En efecto, el producto que se desea desarrollar corresponde a un mecanismo cuya función crítica es la de alinear y enfocar.

La **función crítica** se define como la tarea o tareas principales que el producto a diseñar deberá realizar. Para este estudio la función crítica es la de alineación y enfoque.

Cada uno de los elementos que han de componer al mecanismo cumple con una función que en su conjunto al interactuar con los demás elementos efectúan la función crítica. Por lo tanto, el diseñador deberá poner especial énfasis en la ella (el qué) y los elementos que la llevan a cabo (el cómo) [33].

2.2.2. PRINCIPIOS DE DISEÑO MECÁNICO

En [35] Michael French describe una clasificación de principios generales de diseño mecánico a tomar en cuenta a la hora de diseñar, los cuales son:

G1. Claridad de función. Cada función requerida (el qué) en un diseño debe preverse por algo (el cómo) de una manera clara general y sencilla. Varias facetas de este principio pueden ser expresadas para considerar sus particularidades.

G1.1. Uniformidad. Significa que cierto elemento debe ser usado uniformemente mientras no haya razón para cambiar su esencia. Por ejemplo un material debe tener un esfuerzo uniforme en sus secciones al aplicarle una fuerza, un flujo debe procurarse uniforme, al menos que las condiciones o requerimientos obliguen a que sea de otro modo.

G1.2. Evitar la dependencia de variables irrelevantes. Esto es, tener siempre la óptica sobre el la función principal y esquivar funciones no críticas.

G2. Diseño cinemático y elástico y menos restricción. Este principio es de suma importancia para ingeniería de precisión. En general declara que debe evitarse la sobre-restricción en la instrumentación para conseguir mayor precisión. Por ende, para efectuar un diseño cinemático y elástico de algún mecanismo debe emplearse el mínimo de elementos requeridos con el objetivo de poder simplificar los cálculos y permitir los grados de libertad requeridos. Más principios dedicados a este tema se encuentran en tratados de ingeniería mecánica de precisión [41 a 44].

G3. Diseño de interfaces. Es de vital importancia poner atención al diseñar interfaces ya que frecuentemente se diseñan con la masa insuficiente. Es deseable pensarlas como entidades funcionales considerando cómo van a fungir. Por ejemplo, puede ser que funjan como conexiones estructurales, elementos de registro y sello, etc. Cada función de la interfaz debe entenderse y conocerse para diseñarse como un componente y no como una simple pieza secundaria.

G4. Evitar decisiones arbitrarias. Cada decisión, cada elección de dimensión, forma o material debe estar sustentada por un argumento fuertemente razonado. Según convenga, algunas decisiones deben ser sustituidas por otras mejores. Cada idea puede ser buena si se somete a un proceso de comprobación. Particulares principios de esto son los siguientes.

G4.1. Explotar todas las alternativas. Entre más se exploren las posibilidades de cómo llevar a cabo la función principal o crítica, más posibilidades habrá para seleccionar la mejor.

G4.2. Superposición. Si un elemento está sometidos a varias condiciones o que impliquen una reacción de la misma naturaleza en el elemento, todas las variables que expresen esas condiciones deberán sinterizarse para obtener una equivalencia total.

Hay varios principios relacionados al diseño de juntas (o uniones) estáticas desmontables entre partes tales como las uniones embridadas. Algunas de ellas se relacionan con la localización o la forma para considerarse en su diseño [35].

J1. Evitar hacer dos caras. Si existe movimiento relativo entre dos piezas en las que participan por cada una sólo una cara, no es necesario realizar un maquinado adicional en la otra si con una es suficientemente para mantener la alineación entre las dos piezas. El hacerlo en la cara donde se no se requiera, repercutirá en dificultad, tiempo y costo.

J2. Evitar “montaje en puente”. Esto aplica generalmente a piezas que serán alineadas y que tendrán un ensamble tipo guía. Es aconsejable evitar que la pieza que correrá sobre la guía no traspase a la otra, ya que pueden interferir negativamente y sería como hacer “dos caras” a la pieza guía.

J3. Juntas cerca de la sección máxima. Por facilidad de ensamble, facilidad de fundición, reducción de esfuerzos y conservación de la forma, hacer las juntas cerca de la sección máxima del cuerpo ya sea de manera diametral o extendida.

J4. Juntas cerca de la menor carga. Por cuestión de esfuerzos, forma, menor costo y menor masa, poner las juntas donde estén las cargas, para que los momentos flexores, sean pequeños.

J5. Juntas en pequeñas zonas. Por bajo costo y masa, hacer juntas en una zona de diámetro pequeño cuando el ensamble no presenta dificultades y hay bajo nivel de esfuerzos.

J6. Por economía hacer **juntas que fijen y sellen**. Esto está asociado con la fijación con un anillo o arandela de un tornillo o una tuerca, la cual puede ser usada para fijar abrazaderas para propósitos estructurales y de sellado.

J7. Por economía hacer **las caras de las juntas en planos intactos**. Esto es esencial cuando se requiere un grado específico y fino de cota superficial.

J8. Con **amplios bordes flexibles**, proporcionar un elemento adicional para efectuar el cierre o sello adecuado entre las juntas.

J9. Minimizar las áreas de las juntas. Considerar las funciones que ejecutará la junta (fuerza de flexión, sellado, o carga de abrazadera, fuerza cortante, etc.) y asignar para ella un área no mayor a la necesaria, pero considerando y permitiendo un posible cambio en su dimensión de ser necesario.

Ahora bien, a continuación se hace mención de los principios de diseño cinemático y de mínima restricción [33].

K1. Determinación estática. Dependiendo de las funciones del mecanismo, es deseable tener un sistema estáticamente determinado. Esto aplica para estructuras que han de estar fijas. Un sistema híper o hipo-estático conducirá a elementos y cálculos innecesarios.

K2. Usar grados de libertad balanceados. Esta filosofía puede entenderse como “dejar todo en un plano y que se ordene solo”. Lo cual quiere decir que no únicamente el centro de masa debe procurarse dejarlo en el centro geométrico del sistema sino también el centro dinámico del sistema. Dicho de otro modo, el sistema debe estar estática y dinámicamente balanceado.

K3. Usar auto-alineación. Ésta es una bien conocida idea, acertadamente en la forma de cómo se auto-alinean por ejemplo, baleros y engranes. Esto para asegurar la uniformidad de la carga.

K4. Evitar cargas adventicias (accidentales o extrañas). Este principio es importante para ingeniería de precisión e instrumentación donde, por ejemplo, un actuador lineal esté conectado mediante un elemento flexible en pos de asegurar que la carga que ejerza actúe estrictamente en la dirección requerida y no tenga un componente de fuerza transversal que pudiere introducir deflexiones no deseadas.

Respecto a los mecanismos, se tienen los siguientes principios [33].

M1. Preferir pivotes para deslizar y flexionar. Los pivotes son más baratos y protegen mejor contra la suciedad y el desgaste y concentran las cargas en puntos fijos de una mejor manera que aquellos que requieren de un “arrastre”.

Adicionalmente no sufren un “efecto cajón atorado” como aquéllos, por lo que son más eficientes cuando se trata de precisión y repetitividad. Los flexores son incluso mejores en algunos casos a este respecto, pero su uso se limita sólo a movimientos pequeños, como en los mecanismos de precisión. Una particular virtud de los flexores es la libertad de *backlash* (vocablo inglés que significa “retroceso”) y *stiction* (voz inglesa que quiere decir “fricción estática”), lo cual representa un gran valor en la instrumentación.

M2. Minimizar el movimiento de masa no suspendida (no apoyada adecuadamente). Por ejemplo en las suspensiones de los vehículos.

M3. Evitar ángulos de transmisión pobres.

M4. Transmitir movimiento al mejor radio. Para la mejor transmisión de potencia combinar óptimamente distancia y fuerza.

M5. Usar ejes-guías-base largas. Apoyos ampliamente separados reducen las cargas, incrementan la eficiencia de la forma de montaje (pero no sucede así si el eje a flexión es muy largo), y reduce el retroceso; las guías lineales largas reducen el efecto de fricción y superan el “efecto cajón atorado” e incrementan la eficiencia de la forma. Este principio es ampliamente empleado por ejemplo en máquinas-herramienta, suspensiones de vehículos aerodinámicos, etc.

M6. Diseñar ajustes para lo ortogonal. Si se deben hacer ajustes para la toma de una serie de datos conservando en cada uno de ellos lo ortogonal, es conveniente hacer ajustes primero para un dato, luego para el siguiente quitando los ajustes del primero y así sucesivamente. Esto garantizará una mejor función de los elementos.

M7. Usar conceptos de trabajo pico y potencia pico. Potencia pico es el producto del máximo torque y la máxima velocidad, y es el principal determinante de la talla de una máquina. Trabajo pico es el producto de la máxima fuerza por la distancia o carreta total y es un determinante esencial para saber si con un control manual será suficiente o si un servo es necesario. El concepto de potencia pico es la razón por la cual la idea de tener un motor de potencia constante es una fantasía, tal como el movimiento perpetuo.

Respecto al orden de anidamiento de los elementos, lo cual tiene que ver con la arquitectura del mecanismo o superposición de movimientos independientes, se puede enunciar los principios N1 a N4 [33]. En ellos, una cadena de movimientos anidados o superpuestos es referida como una rama, mientras que la tierra se refiere a la base o cuerpo. Estos principios ayudan a reducir requerimientos estructurales y masa en general.

N1. Anidar los movimientos críticos dentro de los que no lo son.

N2. Las ramas deben ser varias o pocas como sea más práctico.

N3. Los movimientos más ligeros, más pequeños, más rápidos y más frecuentes deben estar lo más alejados de la tierra.

N4. Los movimientos más pesados, más grandes, más lentos y menos frecuentes deben estar lo más cercano a la tierra.

Por otro lado, existen principios de diseño que son útiles para elementos estructurales [33], mismos que se enuncian enseguida.

S1. Fuerza directa. Proveer la fuerza de un elemento a otro de la manera más directa posible. Es decir, evitar emplear elementos que descompongan el vector de fuerza en direcciones indeseadas.

S2. Rutas de fuerza individuales. Proporcionar rutas de fuerza individuales en lugar de múltiples, ya que con éstas es difícil controlar la división de carga entre las rutas (o conectores) y el resultado demanda inciertamente elementos adicionales que pudieren ser necesarios.

S3. Hacer **vigas y bases amplias** para soportar momentos.

S4. Evitar cortes en miembros estructurales, o al menos moverlos hacia zonas no críticas. El tamaño y la forma deben ser considerados.

S5. Proteger a las columnas de momentos acorde con su espesor, pues generalmente están sometidas a esfuerzos combinados.

S6. En estructuras de baja solidez reforzar con puntales cortos y muchas cuerdas largas, por ejemplo en los cables de algunos puentes o techos de estadios.

S8. Para transmitir torque preferir secciones cerradas.

S9. Evitar cargas concentradas si son muy grandes, en lo posible tratar de distribuir uniformemente las cargas.

2.3. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Existe una necesidad de describir el comportamiento mecánico de una máquina desde un punto de vista integral. Esto es, considerando los aspectos que repercuten directamente en la conducta de los materiales de los componentes, por ejemplo, los esfuerzos debidos a las cargas, la transferencia de calor, transferencia de masa y de energía, los agentes corrosivos, etc., por mencionar los más importantes.

La dinámica de un sistema físico o su modelado matemático al considerar todos esos aspectos por lo general resulta en ecuaciones diferenciales que por medio de métodos matemáticos analíticos es imposible resolver, sobre todo para elementos u objetos de estudio cuya geometría es complicada; de ahí que en la ingeniería se empleen métodos numéricos para poder aproximarse a la solución tomando en cuenta los valores en la frontera. Un método para la solución de este tipo de ecuaciones diferenciales es el Método de los Elementos Finitos (MEF o FEM, por sus siglas en inglés *Finite Element Method*) [45] y [48].

La aplicación del MEF para un problema dado implica los siguientes seis pasos [46] y [49].

1. Desarrollo de las ecuaciones elemento.
2. Discreto del dominio solución en una malla de elementos finitos.
3. Ensamble de las ecuaciones elemento.
4. Introducción de las condiciones de frontera.
5. Solución para nodos desconocidos.
6. Cálculo de la solución y de cantidades relacionadas a cada elemento.

La idea clave del MEF es discretizar el dominio de la solución en un número más simple de dominios llamados “elementos”. Una solución aproximada se asume sobre un elemento en términos de soluciones en puntos seleccionados llamados *nodos*. Este método, al ensamblar las ecuaciones de los elementos desemboca en un sistema de ecuaciones muy grande que debe resolverse para determinar las soluciones en los nodos desconocidos.

Dado que el MEF es un procedimiento numérico, es necesario probar la precisión de la solución. Si el criterio de la solución no se conoce, la solución numérica debe repetirse con parámetros de solución refinados (tales como re-elaborar una malla más fina) hasta que una precisión suficiente sea lograda. Es decir, se deberá iterar lo suficientemente hasta obtener convergencia. La Fig. 2.2 representa el diagrama de flujo del MEF [45].

El análisis que se realizó para este mecanismo es un análisis integral que involucra a la mecánica y a la térmica. Su objetivo fue la incorporación bajo el

mismo sistema de ecuaciones una solución conjunta que permitió evaluar el comportamiento mecánico de los elementos estructurales que conforman el mecanismo bajo la acción de cargas y bajo los efectos de la temperatura.

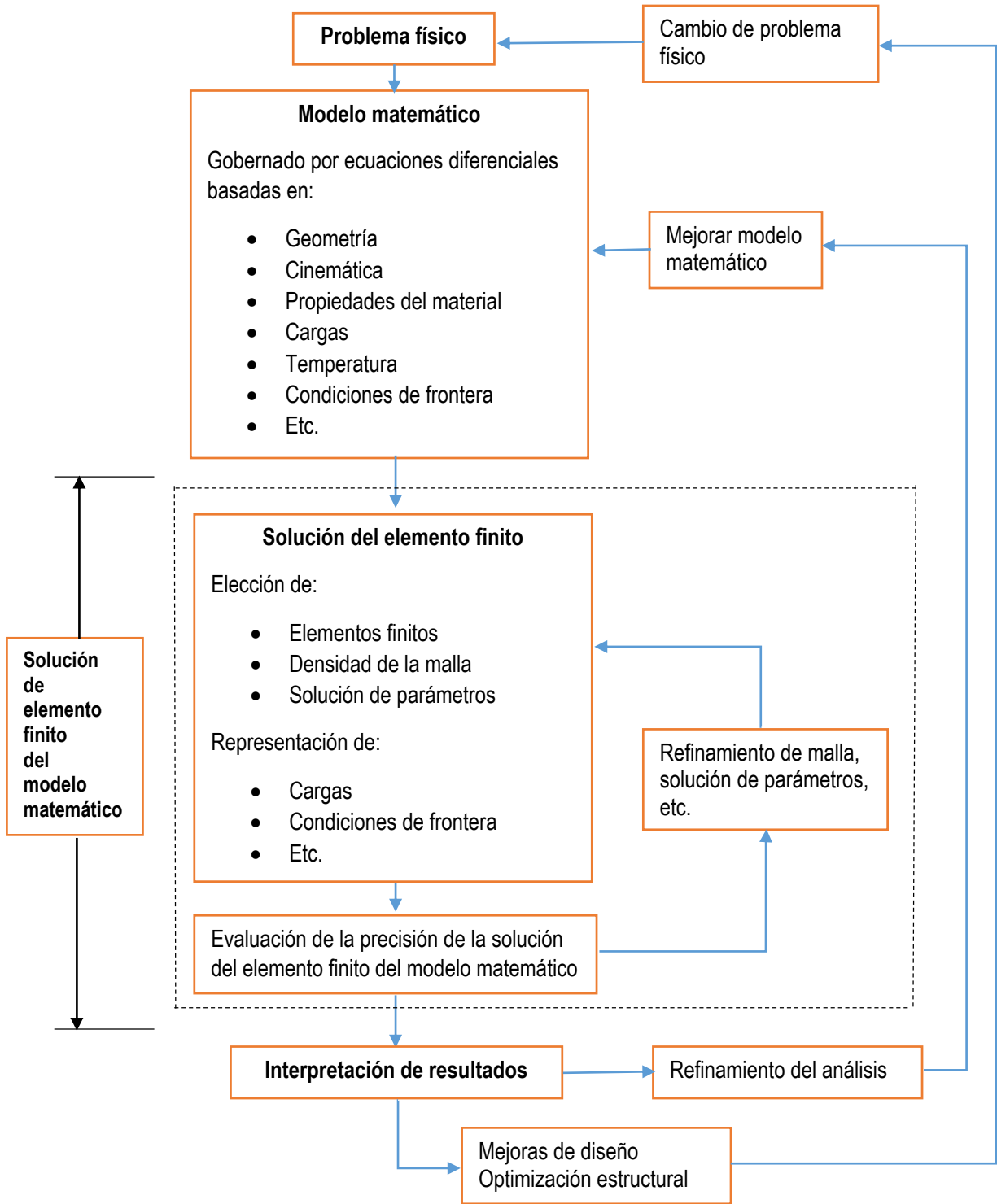


Fig. 2.2. El proceso de análisis del elemento finito.

Para hacer uso de este método, el diseñador deberá tener un criterio amplio a la hora de interpretar los resultados. De hecho, es recomendable que en el momento de elegir el método a emplear se evalúe si es conveniente o no, ya que dependiendo de la geometría de los objetos a analizar pudiere ser conveniente quizá emplear un método analítico, lo cual ahorraría una gran cantidad de tiempo en el proceso de solución. Afortunadamente día con día la ingeniería computacional crece a pasos agigantados, lo que permite emplear el MEF con más sencillez, rapidez y confiabilidad. Existen paquetes informáticos que están destinados a realizar el MEF y algunos de ellos se han empleado para el análisis del mecanismo diseñado; a saber, el SOLIDWORKS® y el ANSYS®, mostrándose en esta tesis, sólo los resultados del primero, desde luego, asegurándose que existió una adecuada convergencia entrambos.

2.4. ANÁLISIS TÉRMICO

El análisis térmico de los mecanismos opto-mecánicos se refiere a:

“Lograr que un sistema mantenga su desempeño dentro de cierto intervalo, aun cuando la temperatura de sus componentes y del medio varíe.” [21].

Supóngase por ejemplo que existe un gradiente térmico entre dos elementos acoplados que conforman un mecanismo, y que son de diferente material, entonces la variación de la deformación debida a los cambios de temperatura no debe exceder la permisible para los distintos efectos que tenga el mecanismo. A esto corresponde el vocablo inglés *athermalization* [50], el cual en síntesis se refiere al análisis térmico para el diseño mecánico. Para sistemas opto-mecánicos este aspecto es muy importante, toda vez que de ello depende la calidad de las imágenes proyectadas por el mecanismo que contenga a las lentes.

En general, la variación térmica Δ , la cual puede ser lineal, de superficie o volumétrica de un elemento se expresa como:

$$\Delta = \alpha \Delta T \quad (1)$$

Donde ΔT es el cambio de temperatura en el medio ambiente y α es el coeficiente de expansión térmica. Debido a que las fuerzas de unión entre átomos y moléculas varían de material a material, los coeficientes de expansión son característicos de los elementos y compuestos. Los metales más suaves tienen un coeficiente de expansión alto; por otra parte, los materiales más duros, como el tungsteno, tienen uno bajo. La incompatibilidad entre dos piezas de trabajo puede generar una tensión residual importante en la unión, la cual, al

combinarla con la tensión aplicada, puede causar fallas ante una menor resistencia a la tracción.

En este proyecto, el análisis térmico se desarrolló de manera integral con FEM. Las repercusiones que tienen los cambios de temperatura no fueron significativos, sin embargo, el examen no debe ser omitido.

2.5. ÓPTICA GEOMÉTRICA DE LENTES

De los elementos ópticos más empleados son las lentes y los espejos. Este breve espacio trata de la óptica geométrica de las lentes, ya que forman parte del objeto de estudio de este proyecto. **Una lente** es un elemento refractor, o sea una discontinuidad de un medio luminoso continuo dominante que reconfigura la distribución de la energía emitida [51].

Las lentes hacen que los rayos de luz converjan y se concentren en un punto, pero también pueden hacer que diverjan. La configuración de una lente es determinada según el modelado del frente de onda que se desee realizar. Dado que las fuentes de luz son fundamentales, con frecuencia es preferible convertir las ondas esféricas divergentes en un haz de ondas planas. Las lentes esféricas (véase Fig. 2.3) son las más comunes y están formadas por superficies de curvatura esférica en sus dos caras, por lo que entonces los radios correspondientes a esas curvaturas son R_1 y R_2 [52].

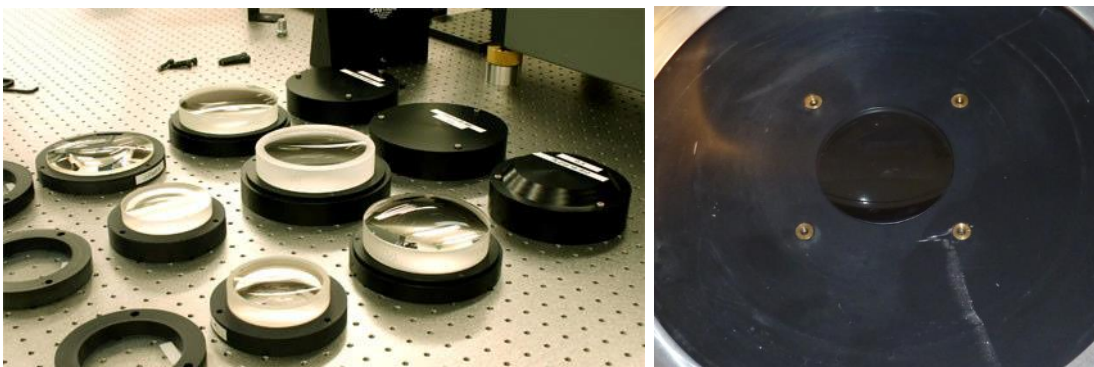


Fig. 2.3. Izquierda, algunas lentes esféricas. Derecha, lente de la cámara del espectroscopio Echelle.

Se denomina **eje óptico** (Fig. 2.5) a la línea que une los centros de las esferas envolventes de las superficies de las lentes. En una gran mayoría de lentes el eje óptico pasa a través del centro físico de la lente [53].

Las lentes se clasifican según el tipo de curvatura que tengan sus superficies. En la Fig. 2.4 se puede apreciar esa clasificación.

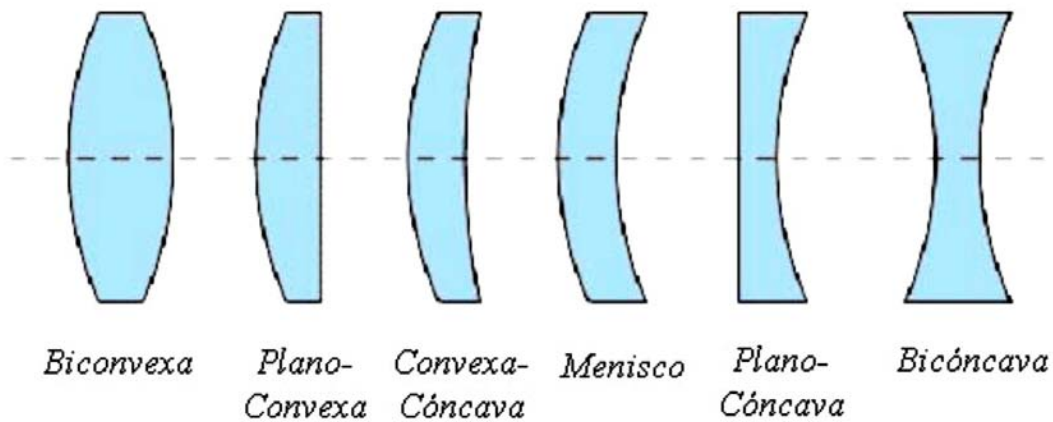


Fig. 2.4. Clasificación de las lentes [53].

Un haz de luz colimado o de rayos paralelos a su eje óptico pasa a través de una lente tipo biconvexa haciendo que los rayos converjan y sean enfocados en algún punto sobre el eje focal a cierta distancia de la lente denominada **distancia focal**. Desde este punto de vista a este tipo de lentes se les llama positivos o convergentes. En una lente bicóncava o planocóncava, ese haz de luz divergirá (difundiéndose). A este tipo de lentes se les denomina negativos o divergentes. (Véase Fig. 2.5). Si una lente tiene ambas superficies planas, la trayectoria del haz de luz no sufre ningún cambio en su dirección.

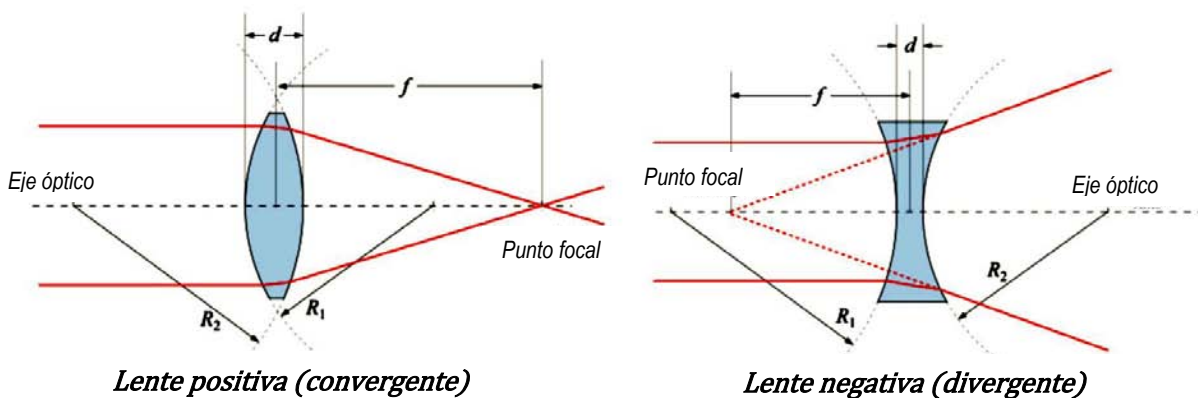


Fig. 2.5. Lente convergente y lente divergente [54].

La distancia focal se calcula a partir de la ecuación (2), en la que f es la distancia focal, n es el coeficiente de refracción del material de la lente, n_m es el índice de

refracción del medio, R_1 es el radio de curvatura de la lente más cercana a la fuente lumínica, R_2 es el radio de curvatura de la lente más alejada de la fuente lumínica y d es el espesor de la lente a lo largo del eje óptico y entre las dos superficies. Si d es muy delgada, puede considerarse como un valor de cero [54].

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n_m} - 1 \right) \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2} \right] \quad (2)$$

Ahora bien, existen **efectos ópticos a consecuencia del movimiento mecánico de las lentes**.

Cuando un elemento óptico en un sistema es perturbado, la imagen producida se verá afectada. Un elemento óptico puede ser perturbado axialmente (desfase), lateralmente (descentramiento) y lateralmente (inclinación o *tip-tilt* en inglés) [46]. Véase Fig. 2.6.

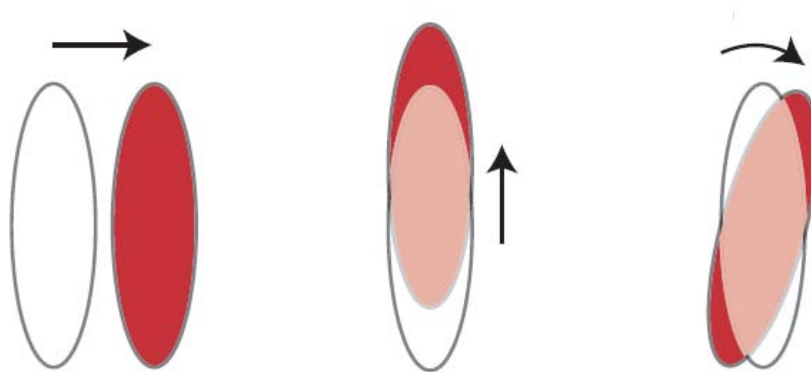


Fig. 2.6. Desfase, descentramiento e inclinación.

Estos efectos son típicamente conocidos como **errores de línea de visión** (LOS, por sus siglas en inglés *line-of-sight error*). Una turbación dinámica en la línea de visión, por ejemplo la vibración de un sistema típicamente se denomina “ruido opto-mecánico”. Muchas fuentes de ruido opto-mecánico pueden ser corregidas.

Los errores de líneas de visión pueden ser medidos desde el espacio objeto o desde el espacio imagen. Medidos desde éste, el error aparece como un desplazamiento sobre el plano de la imagen; medidos sobre el primero, el error aparece como un cambio angular en el objeto.

El eje Z en un sistema cartesiano es típicamente definido como el eje óptico, el cual representa el camino o la dirección de la luz que pasa a través del sistema óptico. Así que en adelante, el término “axial” (como en “movimiento axial”) se

referirá al que respecta al eje Z, mientras que el término “lateral” hará referencia a los ejes X y Y.

Los movimientos en las lentes que están contenidas en un sistema mecánico pueden ser **laterales o axiales**.

Los movimientos laterales causarán un cambio lateral y una desviación angular de la luz desde su trayectoria nominal. La magnitud de ese cambio es función de la magnificación m de la lente. Véase Fig. 2.7.

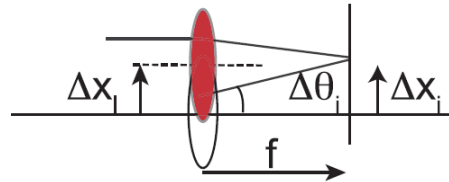


Fig. 2.7. Efecto de los movimientos laterales en una lente.

Regidos por las ecuaciones (3 y 4).

$$\Delta x_l = \Delta x_i(1 - m) \tag{3}$$

$$\Delta \theta_i \cong \frac{\Delta x_l}{f} \tag{4}$$

El movimiento axial de una lente causará un cambio axial en el foco de la imagen. Véase Fig. 2.8.

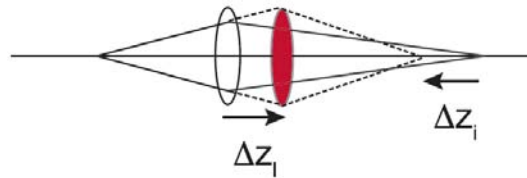


Fig. 2.8. Efecto del movimiento axial en una lente.

Regido por la ecuación (5).

$$\Delta z_l = \Delta z_i(1 - m^2) \tag{5}$$

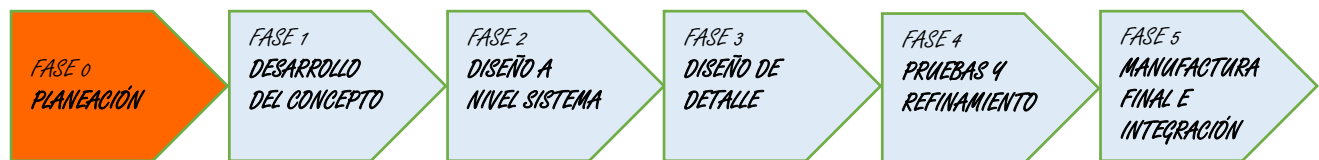
El *tip-tilt* pese a que pudiere tener sólo efectos pequeños, podría introducir grandes aberraciones de la imagen.

Por lo anterior, los sistemas ópticos de las lentes, para su adecuado desempeño deberán contar con mecanismos que eviten los errores citados. Dicho de otro modo, para garantizar la calidad permisible de las imágenes de los objetos observados, el sistema deberá estar perfectamente enfocado y alineado, hasta los límites de alineación y enfoque permisibles. Para la situación del espectrógrafo Echelle, ésta es la razón de ser del proyecto que se expone en esta tesis.

3. DISEÑO DEL MECANISMO

El mecanismo fue diseñado según se expresa en este capítulo, en el que las etapas del proceso abordadas fueron: la planeación, el desarrollo del concepto, y el diseño a nivel sistema. En esta tesis sólo se reportan los resultados finales que se obtuvieron en las últimas sub-etapas de cada una de esas fases. Recuérdese que cada una de las fases del diseño mecánico se subdivide en otras sub-etapas que son iterativas y que arrojan un resultado para continuar con la siguiente fase, y así sucesivamente hasta completar el ciclo, mismo que, dependiendo de las necesidades, puede ser nuevamente iterado en pos de la mejora del producto. De tal manera que esos resultados obtenidos en el ínterin del proceso general son los que se plasman aquí.

3.1. PLANEACIÓN



El proyecto del mecanismo para la alineación fue planeado previamente como ya se describía en la sección del estado del arte. La misión para el proyecto es el desarrollo de un producto capaz de alinear y enfocar la lente del espectrógrafo Echelle con la del CCD contenida en el criostato del telescopio de 2.1 m. El producto consistiría en una máquina o mecanismo robusto que pueda ser manipulado (instalado y calibrado) fácilmente por el personal técnico de astronomía para poder obtener una imagen aceptable del espectro de luz correspondiente a los objetos celestes que se deseen observar, mientras las características técnicas del instrumento lo permitan.

3.1.1. LA MISIÓN

En este caso, por la naturaleza del proyecto, no se puede hablar de un mercado al que esté enfocado el producto, sino de un sector, el cual es el científico. Es preciso indicar que este producto está sujeto a algunas restricciones geométricas, pues el espacio destinado para su instalación y funcionalidad dependerá de la disposición o *lay-out* de las piezas clave del espectrógrafo (y es

aquí donde cabe destacar la originalidad del proyecto), pues el mecanismo además de no ser comercial, requiere de mucha imaginación para diseñarse por colindar o estar en una geometría muy complicada, es decir, se tiene muy poco espacio de libertad; véase Fig. 1.7. La propuesta de valor que se pretende dar a este producto es, que a diferencia de sus antecesores, aporte robustez y repetitividad además de que pueda enfocar en las cinco áreas del espectro Azul-Azul, Azul-Rojo, Rojo-Azul, Rojo-Rojo y Centro, considerando que el límite permisible de pixeles para garantizar una calidad aceptable de la imagen es de 3.5; éste es el patrón de calidad. En general, la misión correspondiente a este producto se puede resumir en la Tabla 3.1.

DECLARACIÓN DE LA MISIÓN: PROYECTO DE MECANISMO PARA ESPECTRÓGRAFO ECHELLE	
DESCRIPCIÓN DE PRODUCTO	<ul style="list-style-type: none"> Dispositivo para alinear y enfocar las lentes del sistema óptico del espectrógrafo.
PROPUESTA DE VALOR	<ul style="list-style-type: none"> Capaz de alinear y enfocar en las cinco zonas del espectro: Azul-Azul, Azul-Rojo, Rojo-Azul, Rojo-Rojo y Centro.
METAS CLAVE DEL PROYECTO	<ul style="list-style-type: none"> Integrarse al proyecto ESOPPO (Ver apartado 1.6 de esta tesis). Servir para todos los criostatos de su tipo. Puesta en marcha en Diciembre de 2014.
SECTOR PRIMARIO	<ul style="list-style-type: none"> Científicos astrónomos de México.
SECTORES SECUNDARIOS	<ul style="list-style-type: none"> Científicos astrónomos de otras partes del mundo.
SUPOSICIONES Y RESTRICCIONES	<ul style="list-style-type: none"> Se desconocen las características ópticas de las lentes. Producto de diseño total, ya que la geometría es complicada. Patrón de calidad de imagen: 3.5 pixeles. Se desconocen las medidas de las piezas adyacentes pero es posible conocerlas mediante un levantamiento. Se desconoce el peso de las piezas así como sus centros de gravedad, pero es posible conocerlos mediante un levantamiento. No se pueden modificar los elementos adyacentes para que el producto cumpla su objetivo. Debe ser ligero, ergonómico y de fácil ensamblaje.
INVOLUCRADOS	<ul style="list-style-type: none"> Astrónomos. Ingenieros. Personal técnico del observatorio. Personal de manufactura. Compras. Proveedores.

Tabla 3.1. Declaración de la misión.

Por otra vertiente, para efectos de este proyecto se identifican a los usuarios del producto (mecanismo) a los astrónomos y a los técnicos de instalación del observatorio.

3.1.2. LA PROYECCIÓN

Declarada la misión, se procedió a realizar un diagrama de Gantt para proyectar las actividades de cada involucrado. Los diagramas fueron modificados según las circunstancias lo dictaban, sin embargo es preciso decir que los objetivos relativos a las tareas contenidas en ellos fueron cumpliéndose con una variación de tiempos no tan significativa. A continuación se muestra un diagrama general de la proyección de actividades de los principales participantes para el desarrollo del mecanismo. Véase Tabla 3.2.

ACTIVIDAD	Mes del 2013										Mes del 2014								
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
PLANEACIÓN GRUPAL	H, A, C																		
ENTENDIMIENTO DEL PROBLEMA Y DISEÑO DE PROTOCOLO DE TRABAJO PARA PROYECTO DE TESIS	H, A	H																	
LEVANTAMIENTO DE DATOS <i>IN SITU</i>		H	H																
ANÁLISIS DE INFORMACIÓN			H	H															
ASAMBLEA GRUPAL PARA ESTABLECER OBJETIVOS				H, A, C															
DESARROLLO DE CONCEPTOS				H	H, A, J														
EVALUACIÓN DE CONCEPTOS					H, A, J	H, A, J													
DISEÑO A NIVEL SISTEMA						H, A	H												
DISEÑO DE DETALLE						H	H	H	H										
PRUEBAS Y REFINAMIENTO									H, J, TO	H, J, TO			H, A, J	H, A, J	H, A, J				
MANUFACTURA FINAL									H, TM	H, TM	H, TM	H, TM	H, TM				H, A, J		
INTEGRACIÓN																	H, A, J	H, A, J	

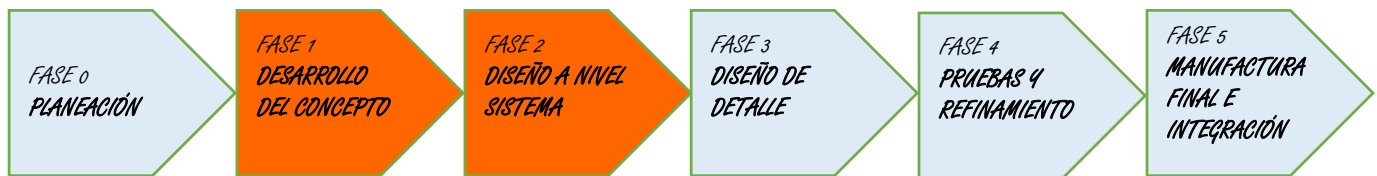
RESPONSABLES:	
Diseñador: Horacio Gutiérrez O.	H
Líder de gestión y aprobación de proyecto: Alejandro Farah	A
Jefe del proyecto y astrónomo principal: Juan M. Echevarría Román	J
Personal técnico del observatorio	TO
Personal técnico manufactura	TM

Tabla 3.2. Proyección general de actividades para el desarrollo del mecanismo.

Desde luego, en cada una de las actividades generales mostradas en la tabla anterior se desglosaron sub-tareas específicas con su respectivo tiempo de trabajo. Por motivos de espacio se omitieron en este escrito. Adicionalmente se emplearon otras herramientas de planeación de proyectos como el método PERT (Evaluación y Revisión de Programas) y el CPM (Método de la Ruta Crítica) [55] y [56]; los cuales por ser el líder del proyecto quien los controlaba, quedan fuera de este trabajo.

La función principal del autor de esta tesis en este proyecto fue la de diseñador y participante integral en todas las facetas del proyecto, ya que también se supervisó el proceso de manufactura y como parte elemental se trabajó en el diseño y desarrollo de los experimentos para caracterizar el mecanismo, así como su correspondiente refinamiento para la instalación final en el telescopio.

3.2. DISEÑO CONCEPTUAL



En esta fase del proceso de diseño, se establecieron de manera formal las necesidades de los usuarios en cuanto a las características del mecanismo se refiere y después de esto se establecieron las “especificaciones objetivo” para el mecanismo a diseñar. Durante esta fase se determinó la función crítica que debe realizar el mecanismo. También se definieron varios conceptos mediante una lluvia de ideas y se procedió a evaluarlos. El concepto final seleccionado es el que continuó o pasó a las siguientes etapas para poder ser desarrollado. A este respecto, es importante destacar que el concepto final en realidad es una hipótesis particular o específica de la hipótesis general enunciada en el capítulo primero; pues es una posible respuesta-solución al problema planteado que corresponde a esta indagación. En efecto, esta hipótesis es la que se desea comprobar (y se logró) mediante la investigación realizada a través del proceso de diseño mecánico.

En este apartado se introdujo también la fase del diseño a nivel sistema, ya que por su naturaleza, estas fases del diseño van hermanadas de manera especial,

pues su dependencia conduce a un proceso iterativo mayúsculo para determinar el concepto final.

3.2.1. LAS NECESIDADES DEL USUARIO Y EL DISEÑO FUNCIONAL.

Desglosando lo anterior por partes, se tiene en primer lugar la matriz de las necesidades del usuario (astrónomo y personal técnico del observatorio), la cual se muestra en la Tabla 3.3. Esta tabla es el resultado final de varias iteraciones de entrevistas directas con el usuario y del empleo del método de observación empático (o sea, ponerse en los zapatos del usuario para experimentar su dolor y saber qué necesita).

Necesidades Jerarquizadas del Usuario del Mecanismo	
Primarias	Secundarias
<ul style="list-style-type: none"> • Alineación y enfoque de las lentes. • Que enfoque en las cinco zonas del espectro. • Fácil instalación. • Fácil calibración para el personal técnico del Observatorio. • Alta robustez. • Que sea repetitivo. • Que no se empañen las lentes dadas las condiciones climáticas. • Que los controles para su calibración sean ergonómicos. • Material anticorrosivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Que no sea muy pesado. • Que sus elementos de unión o transmisión de energía sean normalizados. • Que su manufactura no sea muy complicada. • Fácil mantenimiento.

Tabla 3.3. Necesidades primarias y secundarias del usuario del mecanismo.

Entendido el problema se procedió a detallar las especificaciones del mecanismo requeridas por el usuario. Esto se determinó a partir de las necesidades primarias y secundarias así como de la observación realizada durante el levantamiento de datos. En la Tabla 3.4 se muestra la tabla de especificaciones finales para el mecanismo con sus respectivas métricas.

NÚM	MÉTRICA	UNIDAD	VALOR	TOLERANCIA
1	Movimiento del criostato para enfocar. Carrera sobre el eje Z.	mm	0 - 5	± 1.0
2	Movimiento del criostato para alinear. Carrera sobre el eje Y.	mm	0 - 2	± 0.5
3	Movimiento del criostato para alinear. Carrera sobre el eje X.	mm	0 - 2	± 0.5
4	Rotación del criostato alrededor del eje Z para alinear.	°	± 4	± 0.5
5	Rotación del criostato alrededor del eje X para encontrar el plano de alineación y enfoque (<i>Tip-tilt</i>).	°	± 2	± 0.5
6	Rotación del criostato alrededor del eje Y para encontrar el plano de alineación y enfoque (<i>Tip-tilt</i>).	°	± 2°	± 0.5
7	Movimientos que se le pueden realizar al sistema óptico del espectrógrafo.	mm ó °	0	0
8	Sensibilidad para enfocar y alinear.	µm	10	±1
9	Variación dimensional permisible debida a la temperatura y a los esfuerzos.	mm	0.05	± 0.025
10	Cantidad necesaria de pixeles en la imagen para considerarse enfocada.	Pixeles	3.5	- 3.3
11	Nivel de vibración.	Hz	≈ 0	≈ 0
12	Espacio volumétrico disponible de acuerdo con arquitectura existente entre el criostato y el sistema óptico del espectrógrafo. Véase Fig. 3.1. Ancho X, Largo Y, Alto Z.	mm	360, 305, 345	± 2
13	Tiempo de ensamble.	min	5	+ 2
14	Tiempo de calibración.	min	5	+ 2
15	Peso máximo permisible.	Kg	40	+ 0.5
16	Presencia de vapor de agua permisible entre el espacio de las lentes.	%	≈ 0	≈ 0
17	Cantidad de luz permisible entre el espacio de las lentes.	lx	≈ 0	≈ 0
18	Resistencia a la corrosión	Subj.	Anticorrosivo	--
19	Herramientas especiales para mantenimiento.	Lista	Métricas convencionales	--
20	Carga total a soportar	N	400	+ 10
21	Zonas del espectro a enfocar (AA-AR-RZ-RR-Centro).	Lista	Todas	--

Tabla 3.4. Especificaciones finales para el mecanismo.

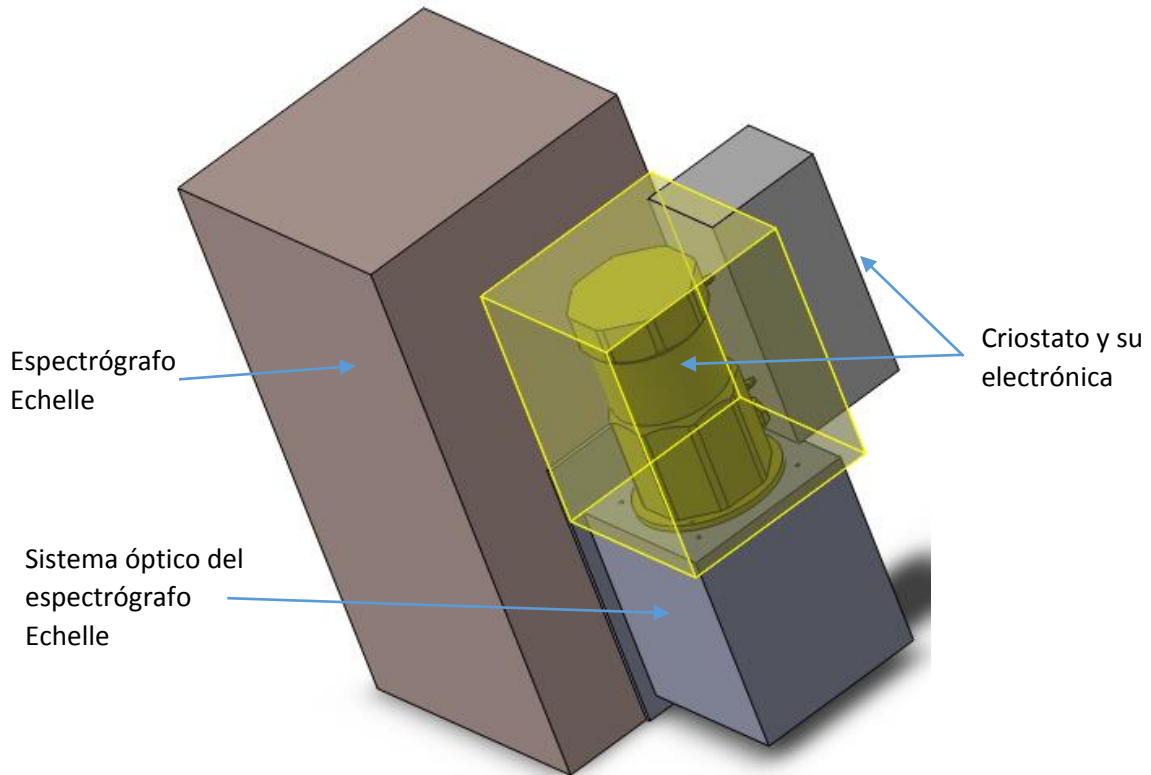
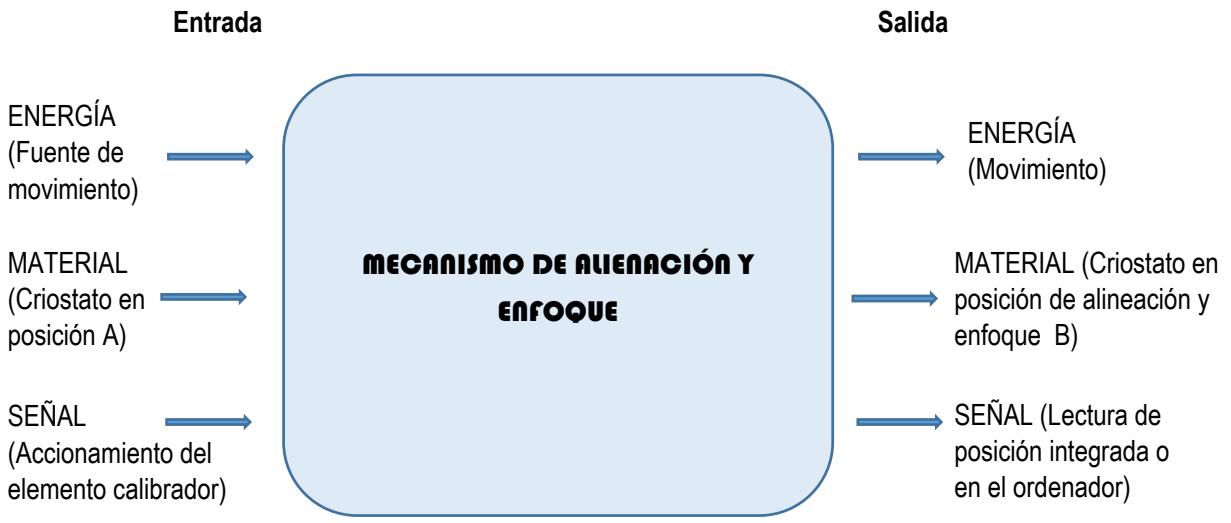
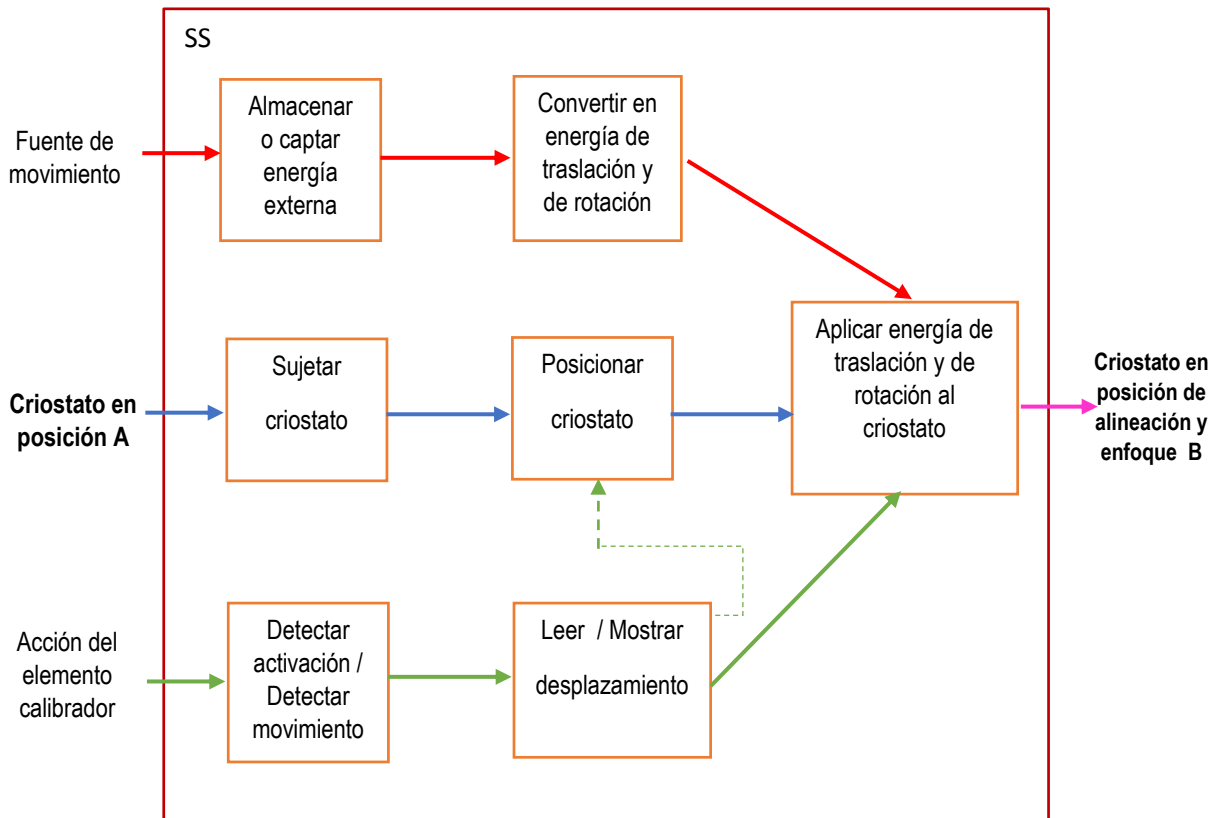


Fig. 3.1. Espacio disponible para el mecanismo.

Durante esta fase, para la generación de conceptos la metodología que se realizó fue, en primer lugar, una vez que ya se ha entendido el problema así como las necesidades y especificaciones, el proceso de descomponerlo para enfocarlo a sub-problemas críticos. Para resolver éstos, se realizó una investigación profunda adicional al estado del arte (ver capítulo 1) tanto interna como externamente sobre mecanismos destinados a la instrumentación astronómica o de otros usos que realicen la **función crítica** de alinear y enfocar lentes cuando se desconocen sus características óptico-geométricas. Todo ello con el objetivo de explorar sistemáticamente los datos obtenidos y reflexionando sobre las posibles soluciones para tener una base sólida y una futura retroalimentación constructiva para el momento de llevar a cabo la lluvia de ideas. Como resultado de esta sub-etapa en la fase del diseño conceptual, a partir del análisis de los datos investigados, se obtuvo el **diagrama funcional** que se muestra en la Fig. 3.2.



a)



b)

Fig. 3.2. Diagrama funcional en el mecanismo de alineación y enfoque:
a) "caja negra" general; b) refinamiento que muestra sub-funciones.

reitera, sólo se muestra el resultado final de esta sub-etapa, para pasar a la siguiente.

3.2.3. LA EVALUACIÓN DEL CONCEPTO

Hecho el filtrado de los conceptos generados y quedando los últimos 7 para su siguiente análisis, se procedió a efectuar la evaluación de los conceptos para la posterior selección de uno de ellos o de otro producto de su combinación.

La matriz de evaluación de conceptos empleada en la parte final del proceso de filtrado de conceptos se hizo ponderando la importancia relativa de los criterios de selección y enfocándose en comparaciones más refinadas respecto a cada criterio. Las evaluaciones de cada concepto están determinadas por la suma ponderada de las calificaciones [32].

Para la elaboración de esta matriz, luego de introducir los criterios, se procedió a identificar una referencia ubicada en diferentes criterios de evaluación de los diversos conceptos. Esto con el objetivo de evitar usar un solo concepto como referencia y dejar fuera características que podrían ser mejores en otros conceptos; dicho de otro modo, para tener mayor neutralidad en la evaluación. Para este desarrollo, se empleó una escala de 1 a 5 para evaluar los conceptos, misma que se muestra en la Tabla 3.5 [32].

Desempeño relativo	Calificación
Mucho peor que la referencia	1
Peor que la referencia	2
Igual que la referencia	3
Mejor que la referencia	4
Mucho mejor que la referencia	5

Tabla 3.5. Escala para evaluar los conceptos [32].

Introducidas las evaluaciones para cada concepto, las evaluaciones ponderadas se calcularon al multiplicar las evaluaciones sin procesar por las evaluaciones de criterios. La evaluación total para cada concepto se determinó mediante la ecuación (6) [32].

$$S_j = \sum_{i=1}^n r_{ij} w_i \quad (6)$$

Donde: r_{ij} es la evaluación de fila del concepto j para el i -ésimo criterio; w_i es la ponderación del i -ésimo criterio; n es el número de criterios y S_j es la evaluación

total para el concepto j . Así, cada concepto recibirá su correspondiente evaluación total como se muestra en la Tabla 3.5.

#	Criterios	%	CONCEPTO 1		CONCEPTO 2		CONCEPTO 3		CONCEPTO 4		CONCEPTO 5		CONCEPTO 6		CONCEPTO 7	
			Calific.	Punt. Pond.	Calific.	Punt. Pond.	Calific.	Punt. Pond.	Calific.	Punt. Pond.	Calific.	Punt. Pond.	Calific.	Punt. Pond.	Calific.	Punt. Pond.
1	Cumplir la función crítica	15	3	0.45	2	0.3	3	0.45	3	0.45	4	0.6	3	0.45	4	0.6
2	Confiabilidad funcional (repetitivo)	12	3	0.36	2	0.24	2	0.24	4	0.48	4	0.48	3	0.36	4	0.48
3	Sencillez (en sus elementos)	10	4	0.4	2	0.2	2	0.2	4	0.4	1	0.1	3	0.3	1	0.1
4	Facilidad de manufactura	7	3	0.21	1	0.07	2	0.14	4	0.28	1	0.07	2	0.14	1	0.07
5	Tipo de accionamiento (menor consumo de energía y menor dificultad para control automático)	9	4	0.36	2	0.18	3	0.27	5	0.45	1	0.09	3	0.27	1	0.09
6	Peso del equipo	7	4	0.28	3	0.21	4	0.28	4	0.28	3	0.21	4	0.28	3	0.21
7	Precisión de medición (sensibilidad)	9	3	0.27	3	0.27	2	0.18	5	0.45	5	0.45	3	0.27	4	0.36
8	Nivel de vibración	6	4	0.24	3	0.18	2	0.12	5	0.3	3	0.18	4	0.24	3	0.18
9	Facilidad de ensamble	7	4	0.28	3	0.21	2	0.14	4	0.28	1	0.07	3	0.21	1	0.07
10	Facilidad de uso	6	5	0.3	2	0.12	3	0.18	5	0.3	3	0.18	4	0.24	3	0.18
11	Ergonomía	5	2	0.1	1	0.05	1	0.05	3	0.15	3	0.15	3	0.15	3	0.15
12	Costo	5	5	0.25	4	0.2	4	0.2	5	0.25	3	0.15	4	0.2	3	0.15
13	Estética	2	2	0.04	1	0.02	1	0.02	2	0.04	3	0.06	2	0.04	3	0.06
Puntos totales		100														
Calificación			3.54		2.25		2.47		4.11		2.79		3.15		2.7	
¿Continúa?			Continúa combinado		No continúa		No continúa		Continúa. Desarrollar		No continúa		Continúa combinado		No continúa	

Tabla 3.5. Matriz de evaluación de conceptos para el mecanismo de alineación y enfoque.

3.2.4. LA SELECCIÓN DEL CONCEPTO

A partir de la matriz mostrada en la Tabla 3.5, se puede observar que el concepto 4 obtuvo la mejor calificación de acuerdo con los criterios establecidos y éste se tomó como la base para desarrollar el concepto final. Pero también se observa

que los conceptos 1 y 6 pueden continuar. La decisión que se tomó fue la de basarse en el 4 pero al mismo tiempo realizado una última combinación tomando en cuenta los conceptos 1 y 6 para hacer las mejoras y así conseguir un concepto final más refinado.

Con este proceso surgieron algunas de las mejoras al percatarse de los puntos fuertes y de los débiles inherentes de ciertas características de los conceptos del mecanismo. La pregunta que se realizó para llevar a cabo esta última combinación a partir de los últimos conceptos fue esencialmente: ¿cómo puede modificarse el método para mejorar el rendimiento? A partir de ahí, se generó la última matriz de combinación de principios funcionales (de acuerdo con la metodología de G. Pahl and W. Beitz, [33]), lo que dio como resultado una serie de principios mecánicos funcionales para aplicarse directamente a los múltiples bosquejos para el concepto final. Véase dicha matriz en Tabla 3.6.

Subfunciones		Soluciones	de concepto 1	de concepto 4	de concepto 6
1	ENERGÍA (SISTEMA DE ACCIONAMIENTO).	Por medio de sistema de tres micrómetros que cargan a la placa móvil y dos micrómetros que mueven a una placa móvil en un plano horizontal.		Sistema de tres sub-sistemas tornillo de alta sensibilidad-resorte que se apoyan sobre unos perfiles que cargan al CCD y se apoyan sobre la tapa superior del sistema óptico del espectrógrafo.	Por medio de mesa de posicionamiento lineal XY - rotacional Z con tornillo de bolas y tres micrómetros piezo-eléctricos.
2	SUJECCIÓN DEL CCD.	Estructura de fijación con tornillos y componente de movimiento rotacional relativo en Z. Estructura apoyada sobre una placa móvil y ésta sobre otra en Y para generar movimiento relativo en X y Y.		Por medio de tres perfiles que en su parte superior sujetan al CCD con una abrazadera y contienen al sistema tornillo-resorte.	Abrazadera apoyada sobre tres micrómetros piezo-eléctricos y éstos a su vez sobre mesa de posicionamiento XY.
3	MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN EN X.	Al accionar micrómetro sobre placa móvil. Movimiento relativo entre placas.		Al accionar los tornillos con punta de bola que empujan con movimiento relativo a los perfiles sobre un plano horizontal.	Al accionar el el tornillo de bolas en X.
4	MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN EN Y.	Al accionar micrómetro sobre placa móvil. Movimiento relativo entre placas.		Al accionar los tornillos con punta de bola que empujan con movimiento relativo a los perfiles sobre un plano horizontal.	Al accionar el el tornillo de bolas en Y.
5	MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN EN Z.	Al accionar simultáneamente los micrómetros bajo la placa móvil. Efecto émbolo.		Al accionar simultáneamente los tornillos de alta sensibilidad.	Al accionar simultáneamente los micrómetros piezo-eléctricos..
6	MOVIMIENTO DE ROTACIÓN EN X.	Al accionar un micrómetro sobre bajo la placa móvil. Movimiento de <i>tip-tilt</i> .		Al accionar un tornillo de alta sensibilidad ubicado en el perfil. Movimiento de <i>tip-tilt</i> .	Al accionar un micrómetro piezo-eléctrico. Movimiento de <i>tip-tilt</i> .
7	MOVIMIENTO DE ROTACIÓN EN Y.	Al accionar un micrómetro sobre bajo la placa móvil. Movimiento de <i>tip-tilt</i> .		Al accionar un tornillo de alta sensibilidad ubicado en el perfil. Movimiento de <i>tip-tilt</i> .	Al accionar un micrómetro piezo-eléctrico. Movimiento de <i>tip-tilt</i> .
8	MOVIMIENTO DE ROTACIÓN EN Z.	Al mover componente de movimiento de rotación relativo de la estructura de sujeción del CCD.		Al accionar los tornillos con punta de bola que empujan con movimiento relativo a los perfiles sobre un plano horizontal.	Al accionar sub-sistema de rotación con un componente de movimiento relativo sobre la abrazadera.
9	LEER DESPLAZAMIENTO.	Micrómetro bajo placa móvil.		Palpador mecánico	Micrómetros piezo-eléctricos.
10	MOSTRAR DESPLAZAMIENTO.	Micrómetro bajo placa móvil.		Carátula analógica.	Carátula digital.

Concepto final.

Tabla 3.6. Combinación de principios funcionales de solución.

3.2.5. PROTOTIPO DE FUNCIÓN CRÍTICA

La realización de los múltiples bosquejos ha sido acompañada de varios prototipos de función crítica para aprender de ellos experimentando las funciones de los elementos del mecanismo. En las Fig. 3.4 y 3.5 se muestran, en calidad de ejemplo, dos prototipos. Recuérdese que éstos sólo muestran la función crítica, ya que en la sección siguiente se muestra el concepto final.

A grandes rasgos, lo que se buscaba en el prototipo de función crítica de la Fig. 3.4 era probar que el movimiento de *tip-tilt* mediante el sistema tornillo-resorte era factible; mientras que lo que se pretendía en el prototipo de la Fig. 3.5 era probar ya un poco más en forma que mediante el sistema tornillo-resorte era factible hacer el *tip-tilt* y mediante los topes podría hacerse un movimiento de traslación lineal mediante movimiento relativo entre las superficies de un plano horizontal. Este prototipo se utilizó para verificar principios funcionales análogos al mecanismo de alineación y enfoque del espectrógrafo Echelle, objeto de este estudio.



Fig. 3.4. Prototipo de función crítica para el *tip-tilt*.



Fig. 3.5. Prototipo de función crítica para el *tip-tilt* y los movimientos de los topes.

3.3. EL CONCEPTO FINAL Y SU DESCRIPCIÓN



Ahora bien, el concepto final (Fig. 3.6 y 3.7), resultado de la aplicación de la metodología de diseño hasta esta etapa fue el que a continuación se describe.

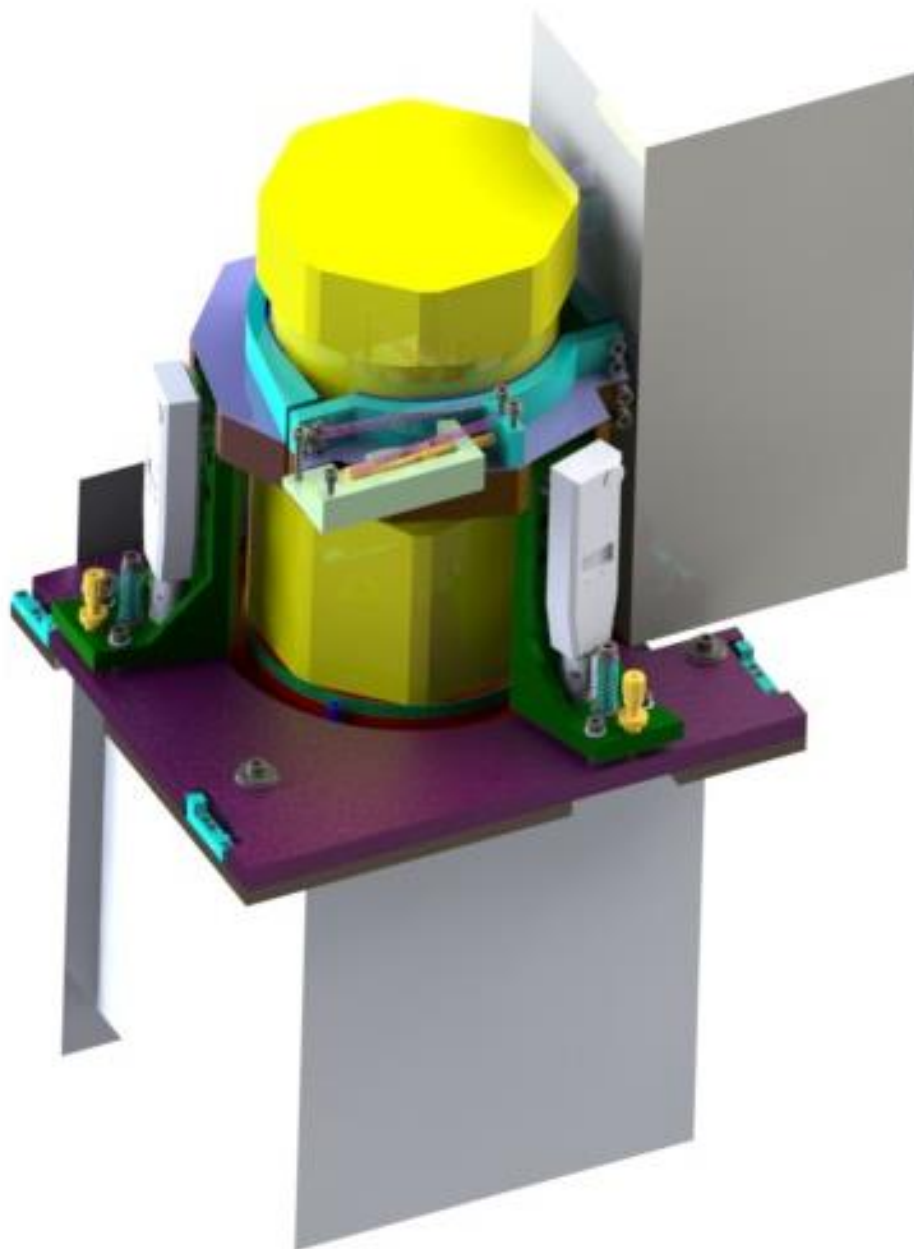


Fig. 3.6. Concepto final acoplado. Vista frontal.

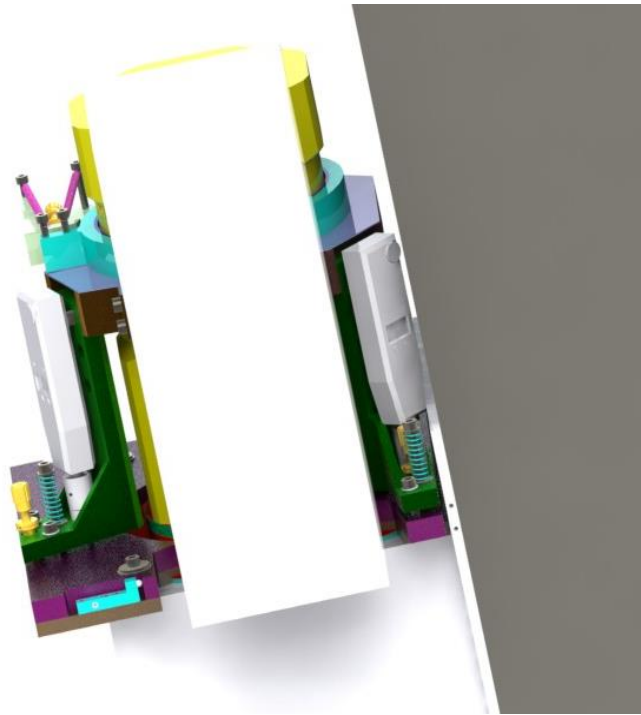
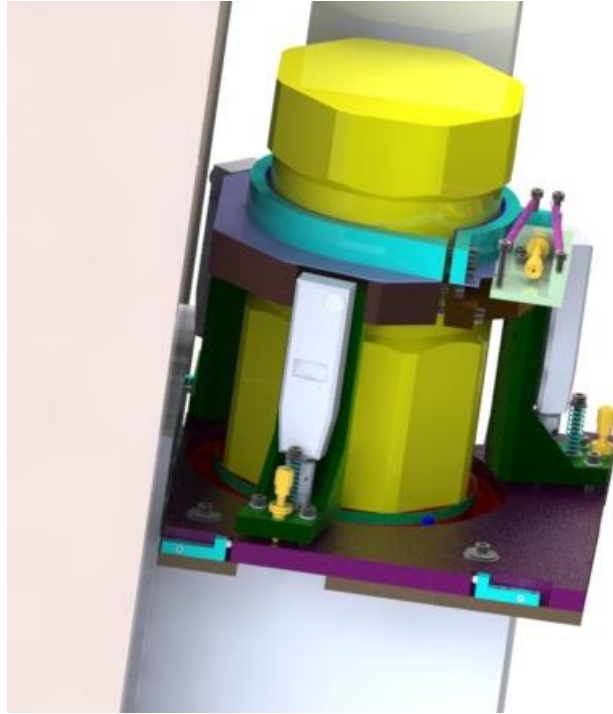


Fig. 3.7. Concepto final acoplado. Vistas laterales.

El sistema mecánico está compuesto (Véase Fig. 3.8) por los siguientes elementos:

- I. Dos semi-abrazaderas principales, una mayor y otra menor cuya función es la de sostener mediante presión al criostato del CCD y a su electrónica.
- II. Tres perfiles tipo “L” cuya función es la de fungir como columnas. En la parte superior las esas columnas sujetan a las abrazaderas mientras que la parte inferior tienen los elementos que conforman el sistema motriz rotativo o de *tip-tilt* y de sujeción con las bases.
- III. Por cada perfil en “L”: Un sensor de movimiento lineal con carátula digital, un resorte de compresión, un tornillo que comprime al resorte, dos tornillos de fijación (o de seguridad) y un tornillo de alta sensibilidad con perilla de control, un soporte para el sensor electrónico que lo une con el perfil, todos ellos son parte del sistema de movimiento cartesiano lineal a lo largo del eje Z y de rotación alrededor de los ejes X, y Y. Para uno de los perfiles, por la complejidad de su geometría, sólo existe un tornillo de seguridad.
- IV. Una placa móvil deslizante que por medio de topes sujetos a la placa fija efectúa el movimiento lineal cartesiano en X y Y.
- V. Una placa fija que sostiene a todo el sistema mecánico que está atornillada directamente sobre la superficie superior de la cámara del espectrógrafo.
- VI. Una funda de neopreno negro conectada entre la placa fija y el criostato de por medio de una banda elástica que impide el paso de luz hacia el espacio entre las lentes.
- VII. Una válvula neumática en la platina del criostato permitirá el suministro de CO₂ al espacio entre las lentes para evitar el empañamiento.
- VIII. Dos resortes de extensión, un tornillo con perilla de alta sensibilidad, un soporte fijo y dos semi-abrazaderas secundarias ubicadas justo arriba de las semi-abrazaderas principales permiten que el criostato pueda efectuar el movimiento de rotación alrededor del eje Z.
- IX. Un cinturón de Nylamid® que sirve como interface entre las abrazaderas y el criostato para evitar que éstas lastimen las superficies del criostato.

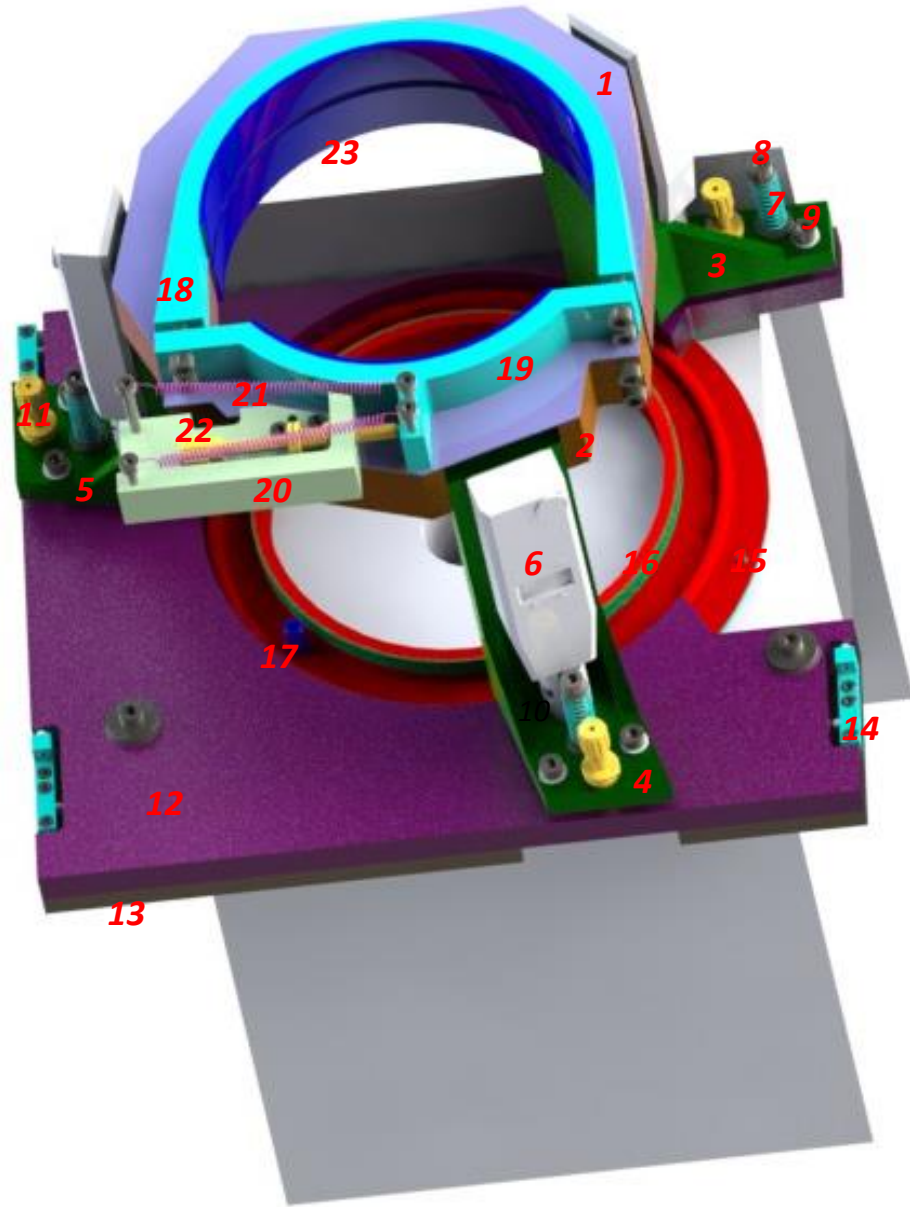


Fig. 3.8. Partes del mecanismo de alineación y enfoque.

De acuerdo con la Fig. 3.8 los elementos del mecanismo de alineación y enfoque son:

1. Abrazadera principal mayor.
2. Abrazadera principal menor.
3. Columna 1.
4. Columna 2.
5. Columna 3.

6. Sensor electrónico con carátula digital.
7. Resorte de compresión.
8. Tornillo del resorte de compresión.
9. Tornillo de seguridad.
10. Soporte del sensor electrónico.
11. Tornillo de alta sensibilidad con perilla para la columna.
12. Placa móvil.
13. Placa fija.
14. Tope para movimiento en XY.
15. Funda de neopreno.
16. Banda elástica.
17. Válvula para suministro de CO₂.
18. Abrazadera secundaria mayor.
19. Abrazadera secundaria menor.
20. Soporte fijo.
21. Resorte de extensión.
22. Tornillo de alta sensibilidad para rotación en Z.
23. Cinturones de las abrazaderas.

3.3.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para enfocar y alinear las lentes, dada la configuración de los elementos, es conveniente mover al criostato. Para ello, éste es sujetado por medio de las abrazaderas principales que a su vez están unidas a las tres columnas. Cada una de éstas en su parte inferior o “patín” tiene el sensor de movimiento lineal, que se sujeta mediante la pequeña abrazadera roscada con tornillo de apriete integrado; la punta redonda del sensor está en contacto tangencial a la superficie superior de la placa móvil y palpa las diferencias de altura que experimenta el criostato (y por tanto el CCD) cada vez que se mueve el tornillo con palanca de ajuste reflejando tales medidas en su carátula. Para hacer el *tip-tilt* se tiene el sistema formado por el resorte de compresión colocado entre el tornillo de precarga atornillado en la placa móvil; para permitir los movimientos, el agujero concéntrico correspondiente a ese tornillo tiene la suficiente holgura. Los resortes y el tornillo de precarga “empujan” la columna hacia la placa móvil mientras que tornillo de alta sensibilidad con perilla atornillado sobre el patín de la columna el cual tiene punta de bola en contacto tangencial a la placa móvil “jala” o separa la columna de la placa móvil. Así que cada vez que se mueve dicho tornillo en sentido levógiro o dextrógiro, el CCD sube o baja cierta altura que el sensor registra en su carátula. Si se requiere que el CCD se mueva linealmente a lo largo del eje Z en forma de émbolo, entonces se deben mover los tres tornillos de alta sensibilidad con perilla para que las alturas de las columnas sean las mismas; mientras que si se requiere que el CCD haga un *tip-tilt*, entonces basta

con mover sólo el tornillo de alta sensibilidad con perilla de alguna de las columnas para que los de las otras dos columnas sirvan de pivote; así se logran las rotaciones alrededor de los ejes X e Y. Mediante la combinación de los movimientos descritos es posible encontrar el plano de alineación y enfoque de las lentes del CCD y de la cámara del espectrógrafo Echelle. Una vez alineado y enfocado se procede a restringir el movimiento entre las columnas y la placa móvil mediante los dos tornillos de seguridad que “empujan” las columnas hacia la placa móvil. La rosca de éstos se encuentra en dicha placa y los agujeros concéntricos correspondientes en los patines de las columnas tienen la suficiente holgura para permitir los movimientos. Véase Fig. 3.9.

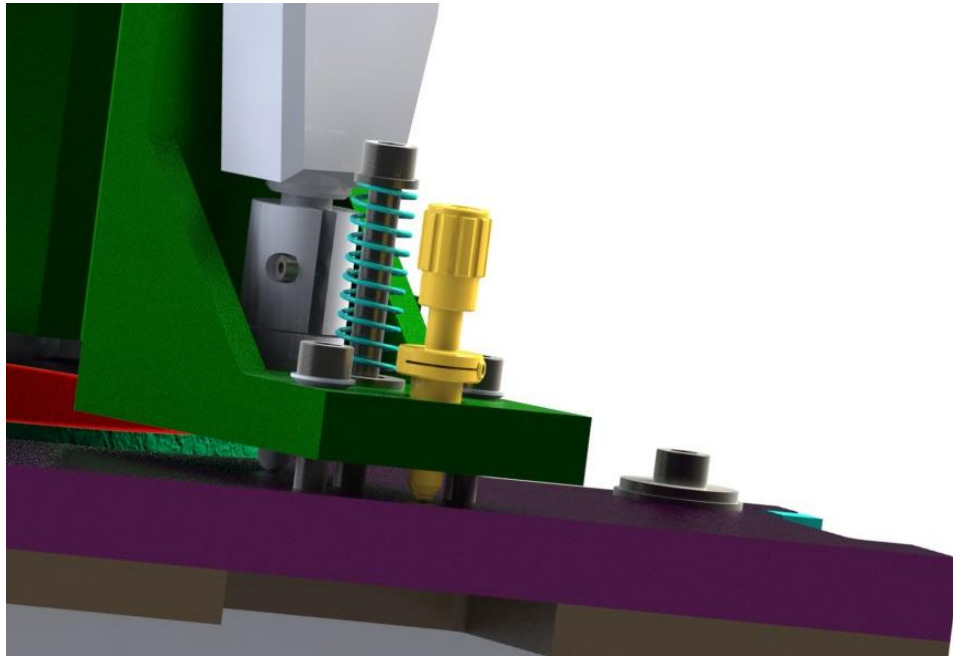


Fig. 3.9. Detalle del sistema de *tip-tilt*.

Para hacer la rotación del CCD respecto al eje Z, basta con liberar momentáneamente el apriete de las semi-abrazadera principales del CCD y mover la perilla del tornillo de alta sensibilidad para rotación, el cual tiene punta esférica; así se logra el movimiento relativo entre las abrazaderas principales y las secundarias que en ese instante sostienen al criostato logrando de este modo el movimiento de rotación del CCD. Hecho esto hasta la posición angular adecuada se aprietan nuevamente las semi-abrazadera principales del CCD. Véase Fig. 3.10.

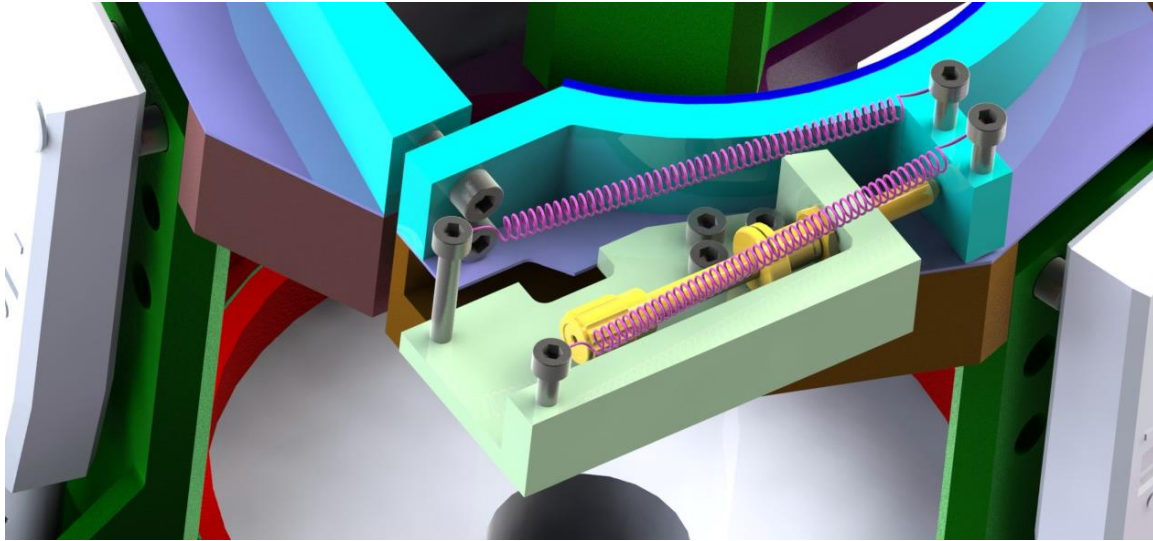


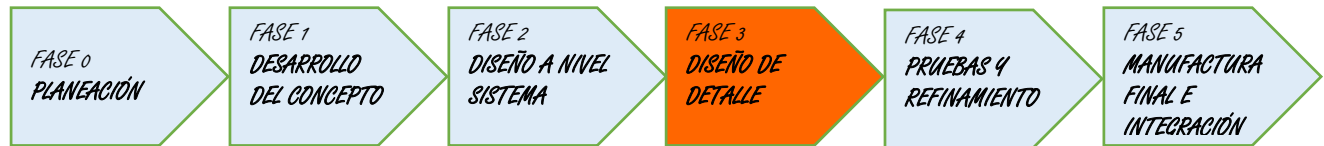
Fig. 3.10. Detalle del sistema de rotación respecto al eje Z.

Para compensar la leve desconcentricidad entre la lente del CCD y la del espectrógrafo generada por la serie de movimientos hechos al CCD durante la etapa de alineación y enfoque, se hace el ajuste a lo largo de los ejes X e Y de la placa móvil con la placa fija mediante los tornillos prisioneros de ajuste con punta esférica que están embebidos en los topos fijos a la placa fija, con este sistema se permite el movimiento relativo lineal entre ambas placas. Para fijar totalmente el sistema se procede a apretar los tres tornillos de fijación entre la placa fija y la móvil, la cual tiene los agujeros concéntricos a los barrenos roscados de la placa fija lo suficientemente holgados para permitir el movimiento. Véase Fig. 3.11. Efectuados los aprietes descritos, se tiene el sistema listo para la investigación astronómica.



Fig. 3.11. Detalle del sistema de movimiento en X e Y.

3.4. DISEÑO DE DETALLE



Durante esta fase del proceso de diseño, se procedió a realizar los cálculos ingenieriles para poder *a posteriori* sentar las bases para la manufactura de las piezas. Esta fase es muy importante para garantizar la funcionalidad del mecanismo y la seguridad, factores que resultarán en la robustez del producto final.

3.4.1. EL MODELO MATEMÁTICO

La ecuación que describe la cinemática del movimiento del plano generado por los tres puntos de contacto tangencial entre la superficie superior de la placa móvil con las puntas esféricas de los sensores de movimiento lineal instalados en las tres columnas depende elementalmente del paso P de los tornillos de alta sensibilidad con perilla y punta esférica, y del número de vueltas N_A , N_B y N_C que se realicen en tales tornillos al estar efectuando la alineación y el enfoque.

Si se ubica al sistema de referencia cartesiano en cualquiera de los puntos tangenciales $A = (a_{ix}, a_{iy}, a_{iz})$ que generan las puntas de los sensores, y a partir de ahí se ubica al eje X como la línea que pasa por ese punto de referencia A y por otro de los puntos tangenciales $B = (b_{ix}, b_{iy}, b_{iz})$ que genera otra punta de otro sensor, entonces se construye el sistema cartesiano XYZ . El punto restante $C = (c_{ix}, c_{iy}, c_{iz})$ estará ubicado en el punto tangencial de la punta del restante sensor. La ecuación del plano que se genera al mover entonces el CCD es:

$$f(N, P) = 0$$
$$n_{ix}(x - a_{ix}) + n_{iy}(y - a_{iy}) + n_{iz}(x - a'_{iz}) = 0 \quad (7)$$

Con:

$$n_{ix} = (b_{iy} - a_{iy})(c'_{iz} - a'_{iz}) - (c_{iy} - a_{iy})(b'_{iz} - a'_{iz}) \quad (8)$$

$$n_{iy} = (c_{ix} - a_{ix})(b'_{iz} - a'_{iz}) - (b_{ix} - a_{ix})(c'_{iz} - a'_{iz}) \quad (9)$$

$$n_{iz} = (b_{ix} - a_{ix})(c_{iy} - a_{iy}) - (c_{ix} - a_{ix})(b_{iy} - a_{iy}) \quad (10)$$

Donde:

$$a'_{iz} = a_{iz} + N_A P \quad (11)$$

$$b'_{iz} = b_{iz} + N_B P \quad (12)$$

$$c'_{iz} = c_{iz} + N_C P \quad (13)$$

Mientras tanto, el ángulo generado entre el plano (7) con el plano base (cuando aún no se ha movido alguna de las columnas) se determina empleando el vector: $\mathbf{N}_{1i} = (n_{ix}, n_{iy}, n_{iz})$ y el vector: $\mathbf{M}_i = (0, 0, a'_{iz})$ mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_i = \text{ArcCos} \left[\frac{\mathbf{N}_{1i} \cdot \mathbf{M}_i}{\|\mathbf{N}_{1i}\| \|\mathbf{M}_i\|} \right] \quad (14)$$

El baricentro Q_i (del triángulo en el plano generado (7)) se encuentra con la ecuación:

$$Q_i = \left(\frac{a_{ix} + b_{ix} + c_{ix}}{3}, \frac{a_{iy} + b_{iy} + c_{iy}}{3}, \frac{a'_{iz} + b'_{iz} + a'_{iz}}{3} \right) \quad (15)$$

Mientras que para el baricentro Q_0 cuando no se ha movido el CCD se tiene la ecuación:

$$Q_0 = \left(\frac{a_{0x} + b_{0x} + c_{0x}}{3}, \frac{a_{0y} + b_{0y} + c_{0y}}{3}, \frac{a_{0z} + b_{0z} + c_{0z}}{3} \right) \quad (16)$$

De esta manera el desplazamiento d_i que sufre el centro de la lente del CCD de la posición base (cuando $i = 0$) a la posición final una vez que se ha movido (cuando $i > 0$) es:

$$d_i = |\overrightarrow{Q_0 Q_i}| \quad (17)$$

Nótese que i representa el número de etapa en la cual se efectúa un movimiento ya sea individual o simultáneo de las “L’s” durante el proceso de alineación y enfoque. De tal manera que $i \in \{ \mathbf{E} > 0 \}$. Véase Fig. 3.12.

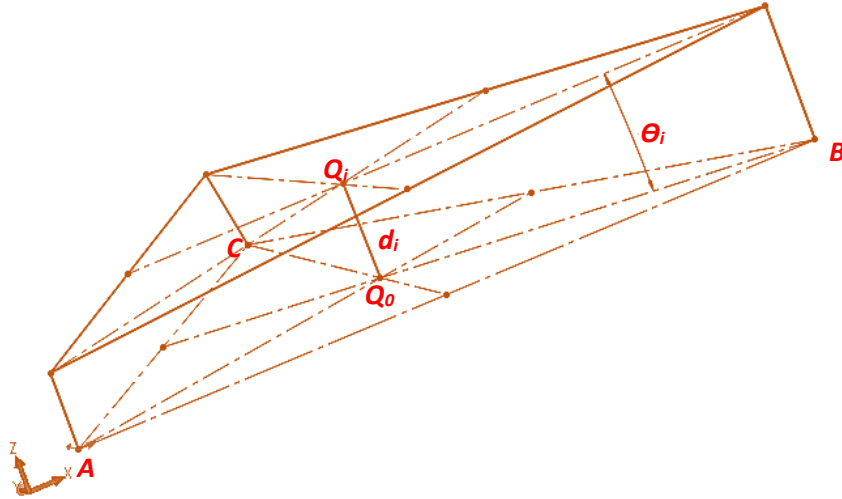


Fig. 3.12. Esquema que representa la cinemática del mecanismo.

Para facilitar los cálculos, adicionalmente se realizó para esta tesis un algoritmo en una hoja de cálculo en la cual los datos de entrada están en función de N y P, y los datos de salida son la ecuación del plano cinemático así como el desplazamiento del centro del CCD. La hoja de cálculo se integra en archivo electrónico a esta tesis.

3.4.2. ANÁLISIS TÉRMICO DEL MECANISMO

Este análisis, (en inglés *athermalization*) consiste en efectuar el análisis termomecánico con el objetivo de seleccionar materiales que sean compatibles para poder compensar las deformaciones presentadas en los elementos mecánicos debidos a la acción del cambio de temperatura.

Se parte del hecho de que el criostato está hecho de un material que por su geometría ante las variaciones térmicas tendrá un cambio en sus dimensiones $\Delta_{\text{Criostato}}$, que de acuerdo con la ecuación (1), estará en función de su coeficiente de expansión térmica $\alpha_{\text{Criostato}}$. Adicionalmente, las condiciones ambientales en el lugar donde estará operando el mecanismo integrado en el telescopio, específicamente en el espacio volumétrico que ocupará el mecanismo, son

constantes, por lo que se asumirá que la temperatura es la misma en cada uno de los puntos que estén en esa vecindad espacial. Así que

$$\Delta_{Criostato} = \alpha_{Criostato} \Delta T \quad (18)$$

Por otro lado, por las propiedades térmicas del material del que estén hechas las columnas, al cambiar la temperatura sufrirán un cambio en sus dimensiones, por lo que análogamente a la ecuación (18):

$$\Delta_{Columnas} = \alpha_{Columnas} \Delta T \quad (19)$$

Según la configuración del mecanismo acoplado con el criostato (Véase Fig. 3.6) la variación por temperatura más significativa que puede causar desenfoque entre las lentes de la cámara y del CCD se tiene en el eje axial de criostato paralelo a las columnas que lo soportan. Al cambiar la temperatura, por ejemplo al aumentar, el criostato tenderá a aumentar su longitud hacia su parte no restringida, o sea hacia abajo; mientras que las columnas tenderán a cambiar su longitud en sentido contrario, pues su parte restringida es la placa móvil donde posan. Es así que para compensar el cambio en las dimensiones del criostato es necesario que tanto en éste como en las columnas exista la misma deformación dimensional. Entonces:

$$\begin{aligned} \Delta_{Criostato} &= \Delta_{Columnas} \\ \alpha_{Criostato} \Delta T &= \alpha_{Columnas} \Delta T \\ \therefore \alpha_{Criostato} &= \alpha_{Columnas} \end{aligned} \quad (20)$$

Luego, los coeficientes térmicos de los materiales de los elementos mecánicos del mecanismo de alineación y enfoque deben ser iguales que el del criostato. Esto, naturalmente, desde el enfoque térmico; por lo que para determinar definitivamente el material a emplear se realizaron varias iteraciones de análisis mecánico en conjunto con el térmico para poder garantizar robustez al mecanismo. Los resultados de esto se muestran en la sección siguiente.

3.4.3. MATERIAL

El sistema mecánico cuenta con piezas de diferentes materiales para cumplir con los requerimientos técnicos de esfuerzo-deformación debida a las cargas y a

los cambios térmicos. Derivado de un análisis termo-mecánico, se seleccionó aluminio de la serie 7075 comercialmente conocido como AluMold® 500 para fabricar todas las abrazaderas, las columnas y los soportes de los sensores electrónicos. Por otra vertiente, para ambas placas se ha empleado acero del llamado comercialmente Cold Rolled 1018. Los topes para hacer el movimiento relativo entre ambas placas así como el soporte para el movimiento rotacional son también de este tipo de acero. La funda para evitar que entre la luz al espacio entre las lentes es de neopreno. Cabe decir que las puntas de bola de los tornillos de alta sensibilidad con perilla tendrán un recubrimiento de teflón para evitar la penetración sobre la superficie superior de la placa móvil por la diferencia de durezas. Este mismo fenómeno se evita de igual modo para el las abrazaderas principales y las secundarias de rotación del CCD alrededor del eje Z. Adicionalmente, el cinturón plástico flexible el cual sirve de interfaz entre el criostato y las abrazaderas es de un material comercialmente conocido como Nylamid®. Los demás elementos de unión como tornillos, resortes, etc., se han elegido de catálogos comerciales y se ha procurado en todo momento la normalización (en inglés *standardization*) para su fácil aseguibilidad. En los anexos de esta tesis se muestran las propiedades de los materiales empleados.

3.4.4. ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

A continuación se mostrarán de manera general algunos de los cálculos mecánicos que sustentan el Diseño Mecánico del mecanismo, los cuales se realizaron para los casos más drásticos. Cabe decir que las técnicas que se ha empleado incluyen cálculos analíticos, simulaciones por el Método de Elementos Finitos así como criterios de diseño establecidos y comprobados por otros investigadores [42, 57 y 58]. Se realizaron los cálculos para cada uno de los elementos que conforman este sistema; no obstante, en esta tesis por motivos de espacio sólo se muestran los cálculos que corresponden a las tres columnas porque son los elementos mecánicos estructurales críticos. Se considera que el total de la carga a soportar es de 400 N, con el 80% de ésta perteneciendo al CCD y el resto a su electrónica.

I. Columna 1

Esta pieza tiene una configuración un poco ardua, y está expuesta a la mayor carga dada la configuración del sistema mecánico, toda vez que su lugar geométrico está ubicado a la cercarías de la electrónica del criostato. Empero, como puede verse en la Fig. 3.13, la deformación que tendría se encuentra dentro de los límites establecidos de 0.025 mm. También se aprecia que el esfuerzo máximo no rebasa el límite elástico del material, por lo que puede manufacturarse confiablemente.

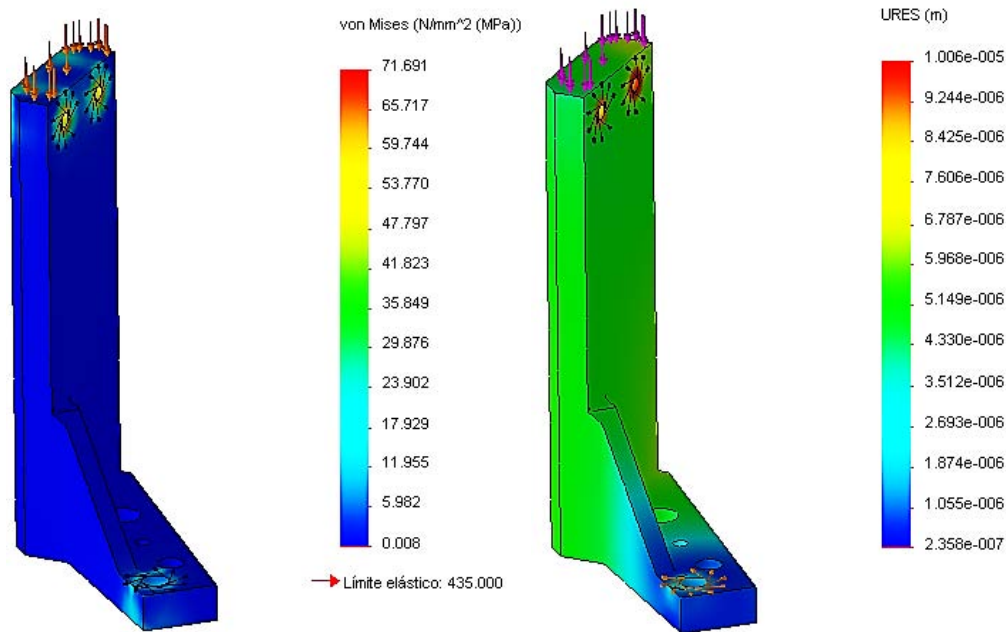


Fig. 3.13. Esfuerzos y deformaciones en la Columna 1.

II. Columna 2

Para este elemento, la Fig. 3.14 muestra que al actuar las fuerzas sobre él, se producen esfuerzos principalmente en las zonas de sujeción como es de esperarse; no obstante, las deformaciones producidas debidas a tales esfuerzos no rebasan el permisible de 0.025 mm, ni tampoco los esfuerzos máximos que tendrá la pieza rebasan el límite elástico del material, que en este caso es aluminio AluMold® 500; por ende, es factible la fabricación de esta pieza sin problemas.

III. Columna 3

De acuerdo con la Fig. 3.15, para la tercera columna es posible inferir que el elemento mecánico soportará las cargas actuantes sin que exista una deformación preocupante. Para este elemento también puede notarse que el límite elástico del material no es superado bajo ninguna circunstancia, ni tampoco la deformación permisible, de ahí que también se puede manufacturar sin problema alguno.

El criterio de falla empleado para el MEF fue el de Von Mises o de la energía de distorsión o deformación elástica, ya que por tratarse de un material dúctil el que se empleará, es un indicador confiable para el diseño de los elementos mecánicos estructurales [30].

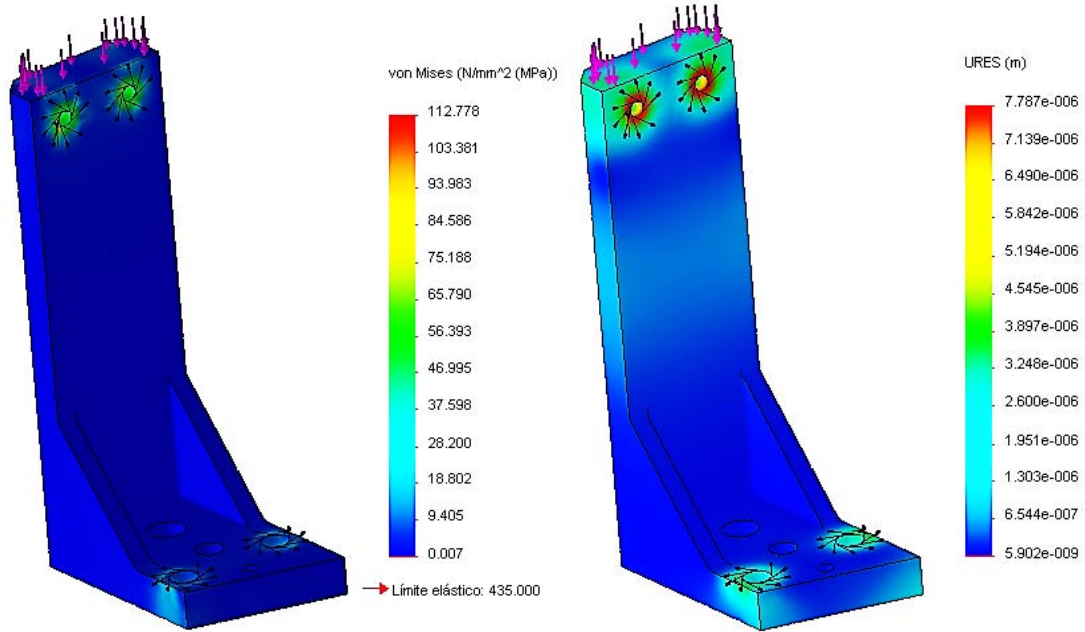


Fig. 3.14. Esfuerzos y deformaciones en la Columna 2.

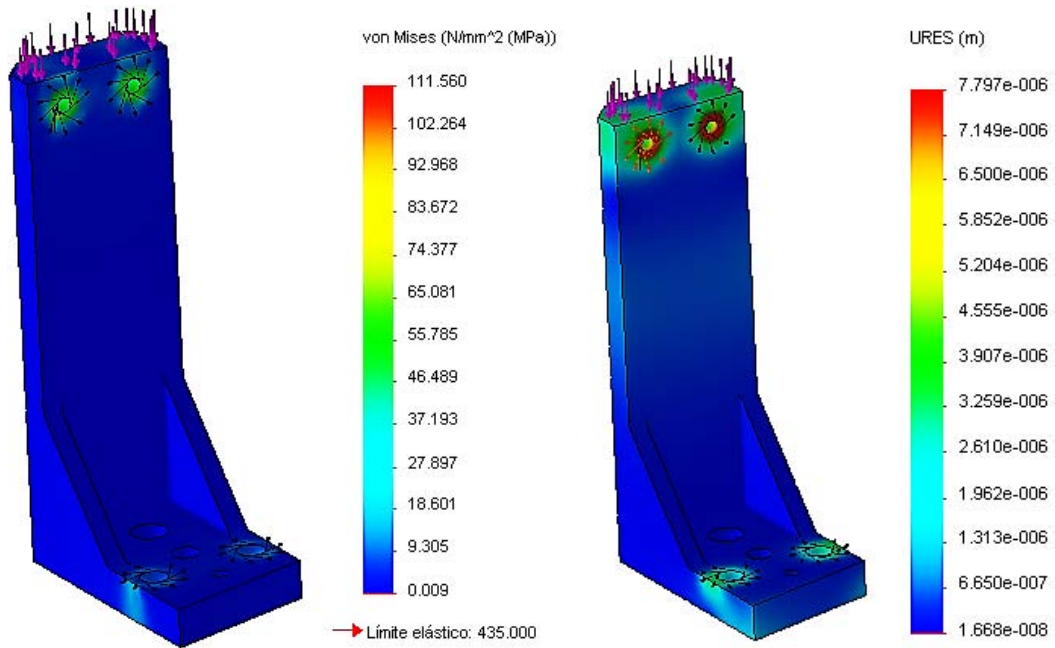


Fig. 3.15. Esfuerzos y deformaciones en la Columna 3.

La Tabla 3.7 resume los máximos esfuerzos y deformaciones en estos elementos mecánicos.

Máximo esfuerzo	
Columna 1	112.78 MPa.
Columna 2	71.691 MPa.
Columna 3	111.50 Mpa.
Máxima deformación	
Columna 1	7.787×10^{-3} mm.
Columna 2	1.006×10^{-2} mm.
Columna 3	7.797×10^{-3} mm.

Tabla 3.7. Esfuerzos y deformaciones máximos.

Como puede notarse, a manera de reiteración, la deformación máxima no excede el requerimiento permisible que puede encontrarse en la Tabla 1.2 de 0.05 mm en ninguno de los elementos que mecánicos bajo la acción de las cargas. Tal variación sería nociva de presentarse por ejemplo en el centro de la lente del CCD, pues afectaría sobremanera la calidad de enfoque. Para asegurarse que tanto la malla generada así como los resultados son confiables se hicieron varias simulaciones con tamaños y geometría de mallado diferentes hasta apreciar que los valores concurrieran.

4. FABRICACIÓN DEL MECANISMO

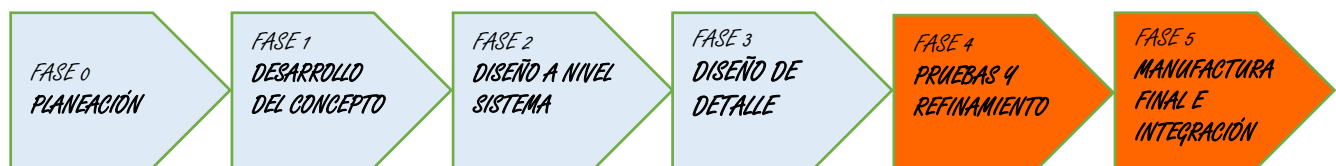
En este capítulo se abordan las actividades desarrolladas concernientes a la manufactura del mecanismo de alineación y enfoque. Las partes estructurales del mismo requieren de un proceso de manufactura en el cual se emplearon máquinas-herramienta típicas y centros de maquinados CNC.

El diseño mecánico de cada uno de los componentes que conforman el mecanismo se ha realizado paramétricamente según los modelos CAD en 3D; lo que implica que cada cambio que para efectos de mejora continua se requiera efectuar, bastaría con hacerlo desde tal modelo para que se refleje directamente en los planos de fabricación.

Las tolerancias consideradas para las piezas oscilan por los ± 0.01 mm en las dimensiones generales y para la localización de los barrenos de la placa fija por los ± 0.001 mm. La manufactura se ha realizado en máquinas-herramienta tipo CNC del Instituto de Astronomía (para las abrazaderas) así como de tipo convencional.

A la fecha de elaboración de este documento se ha concluido la fabricación de las piezas clave para realizar el movimiento de *tip-tilt*, a saber: las tres columnas, las dos abrazaderas principales, los tres soportes para la sujeción de los sensores, la placa fija, los topes fijos para el movimiento en XY, la placa móvil y el cinturón plástico flexible; los elementos restantes se encuentran en proceso de manufactura.

4.1. PROCESO DE FABRICACIÓN EN GENERAL



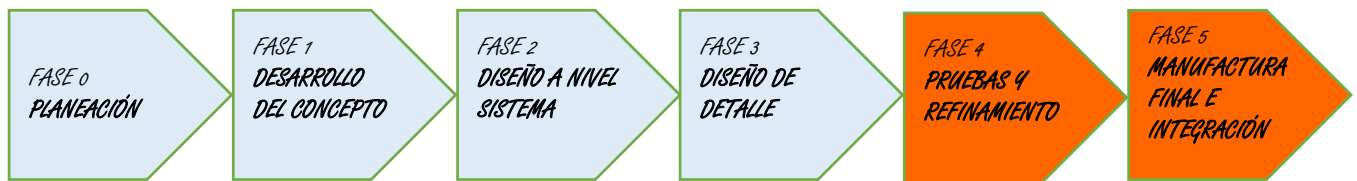
A continuación se analiza de manera general el proceso de manufactura para cada una de las piezas que requieren maquinado. Esto se realizó con base en la metodología de Timings [59], la cual es una herramienta útil para plantear de manera general el procesamiento de la materia prima para transformarla en un producto.

#	PROCESO	Abrazadera principal mayor	Abrazadera principal menor	Abrazadera secundaria mayor	Abrazadera Secundaria mayor	Abrazadera principal menor	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Placa móvil	Placa Fija	Topes fijos de movimiento en XY	Soporte fijo para movimiento rotativo en Z	Soportes de los sensores	Cinturón plástico rígido	Funda de neopreno	Cinturón plástico flexible
1	Dimensionar bloque primario de material en bruto	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•
2	Cortar bloque en bruto con sierra cinta	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•
3	Cantear bloque con cepillo	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•
4	Dimensionar bloque canteado	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
5	Generar archivo CAD/CAM	•	•	•	•	•											
6	Preparación de CNC	•	•	•	•	•											
7	Colocación de pieza	•	•	•	•	•											
8	Operación de maquinado con fresa	•	•	•	•	•											
9	Trazado en caras						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
10	Operación de corte con fresa						•	•	•	•	•	•	•	•			•
11	Generar puntos para barrenos	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
12	Operación de barrenado con taladro	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
13	Operación de roscado con machuelo	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
14	Operación de rectificad									•	•						
15	Operación de torneado													•			
16	Operación de roscado con tarraja													•			
17	Operación de corte con segueta													•	•		•
18	Matar filos	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
19	Operación de corte con tijeras															•	
20	Operación confección															•	
21	Anodizado	•	•	•	•	•								•			
22	Pavonado						•	•	•	•	•	•	•				
23	Pieza terminada	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Tabla 4.1. Matriz del proceso general de fabricación.

La matriz expresada en la Tabla 4.1 es muy útil toda vez que proporcionará al personal técnico de manufactura un panorama que le permitirá saber qué herramientas y qué máquinas deberá emplear para la fabricación del producto. La información contenida en dicha tabla ayudará también a diseñar el proceso de fabricación específico de cada una de las piezas a maquinar pues a partir de esa información se puede deducir el orden de cada operación, es decir, es la base para efectuar el análisis de movimientos y tiempos con el objetivo de optimizar materia, energía y tiempo.

4.2. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS



Una vez efectuado el análisis del proceso de fabricación en general se procedió a diseñar el proceso de fabricación específico de cada pieza. Como se mencionó al principio de este capítulo, las piezas que se han elaborado hasta ahora son:

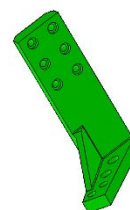
- a) La columna 1
- b) La columna 2
- c) La columna 3
- d) La abrazadera principal mayor
- e) La abrazadera principal menor
- f) La placa móvil
- g) La placa fija
- h) Los tres topes fijos para el movimiento en XY
- i) Los tres soportes para la sujeción de los sensores
- j) El cinturón plástico flexible

Con estos elementos mecánicos primordiales más tarde se realizaron las pruebas preliminares como se describe en el siguiente apartado.

Ahora bien, para efectos de esta tesis, en la tabla 4.2 se describe, a manera de ejemplo, el proceso de manufactura diseñado y llevado a cabo en el taller de metal-mecánica del Instituto de Astronomía para la columna 1; mientras que para el resto de cada una de las partes metálicas con antelación mencionadas se puede remitir a la sección de anexos.

Hoja de proceso

Denominación: Columna 1
Material: AluMold®
Dimensiones en bruto: 94 x 90 x 164 mm
Tiempo estimado: 10 horas
Página: 1 de 1



Op.	Descripción	Útiles y herramientas
1	Limpieza de material	Alcohol, thinner, agua, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
2	Colocación en cepillo de retorno rápido	Cepillo de retorno rápido, llaves métricas y estándar, buril, líquido lubricante
3	Careado de una cara mayor	
4	Cambio a fresadora	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
5	Desbastado fino de cara refrentada	
6	Desbaste fino de todas las caras	
7	Cambio a banco de trabajo	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos
8	Trazado en caras	
9	Colocación en fresadora	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
10	Fresado	
11	Cambio a banco de trabajo	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos, punto, martillo
12	Marcación de puntos para barrenos pasados de D=9 mm	
13	Marcación de puntos para barreno roscado fino de 1/2 inch	
14	Marcación de puntos para barreno roscado de D=3/8 inch x 40	
15	Marcación de puntos para barrenos refrentados y pasados M6	
16	Cambio a taladro	Taladro, llave de portabrocas, brocas
17	Taladrado	
18	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
19	Roscado	Juego de machuelos
20	Cambio a banco de trabajo	Herramienta mata-filos
21	Eliminación de filos	
22	Comprobación general de calidad	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro
23	Limpieza	Alcohol, thinner, agua, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
24	Anodizado	Proveedor externo
25	Almacenaje	Espacio libre

Tabla 4.2. Proceso de manufactura de la columna 1.

Todos los procesos descritos en las hojas de proceso son acompañados con su respectivo plano de fabricación. Los planos de estas piezas están disponibles en el archivo electrónico que acompaña a esta tesis el cual contiene los dibujos en CAD 3D así como las respectivas proyecciones CAD 2D.

A continuación se muestran algunas fotografías relacionadas con la manufactura de los elementos mecánicos estructurales del mecanismo así como algunas de las piezas terminadas.

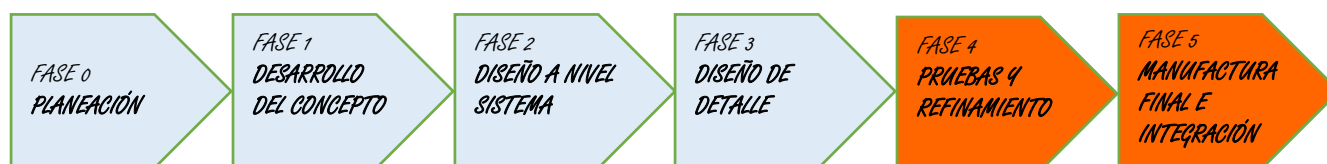


Fig. 4.1. Proceso de manufactura.



Fig. 4.2. Piezas terminadas.

4.3. PRUEBAS PRELIMINARES



Con las piezas hasta ahora fabricadas, se procedió a la realización de las pruebas *in situ* para poder refinar el producto, encontrar la mejor manera de ensamblar y encontrar la alineación y el enfoque óptimos, desde luego bajo tolerancias permisibles.

El objetivo de estas pruebas preliminares fue: ensamblar el mecanismo en el criostato Marconi II, directamente en el telescopio para analizar su comportamiento, sus posibles interferencias, su repetividad, así como sus puntos débiles.

Cabe decir que durante esta prueba se encontraron algunos detalles mínimos que no se consideraron en el diseño ni durante la manufactura debido a que no se contaba con esa información y durante la etapa de levantamiento de datos no se contempló tampoco dada la falta amplia de fichas y planos técnicos por parte del proveedor del CCD Marconi II. Resultado de eso, fue que hubo una interferencia entre la abrazadera principal menor y la válvula de inyección de nitrógeno líquido del criostato (el nitrógeno se inyecta al criostato para mantener una temperatura del $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ al CCD con el objetivo de que este detector funcione adecuadamente). Para resolver este problema, se procedió a efectuar un cambio en la geometría de dicha abrazadera en el modelo CAD 3D y tras iterar nuevamente un cálculo por el Método de los Elementos Finitos para analizar los esfuerzos y deformaciones y ver que pese a la modificación de la geometría realizada no habría afectación, se procedió entonces a realizar el cambio físicamente con el apoyo del personal técnico del taller de manufactura del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir.

Se procedió de manera análoga para la modificación de las placas móvil y fija, pues al hacer el *tip-tilt* exageradamente (es decir con alguna de las columnas levantadas a más de 6 mm) durante el proceso de la búsqueda del foco y de la alineación óptimas, resultó que la caja electrónica interfería con las placas. Por tal motivo, se procedió a cambiar también su geometría. Actualmente (ver capítulo 5, pruebas finales) ya no se tiene este problema y el instrumento funciona sin complicaciones de esta índole.

En la Fig. 4.3 se muestran las modificaciones realizadas para mejorar el mecanismo de alineación y enfoque mientras que en la Fig. 4.4 se muestra el mecanismo montado en el telescopio durante las pruebas preliminares. Como puede verse en ambas figuras, para este momento las piezas aún no se les aplicaba su tratamiento anticorrosivo y para efectos de pruebas, los elementos de medición se realizaron a base de micrómetros manuales y el tornillo de perilla usado de prueba no tenía la sensibilidad del oficialmente integrado. Los resultados de estas pruebas se analizan en el capítulo 6.



Fig. 4.3. Modificaciones de mejora en la abrazadera y en las placas.



Fig. 4.4. Proceso de instalación del mecanismo para las pruebas.

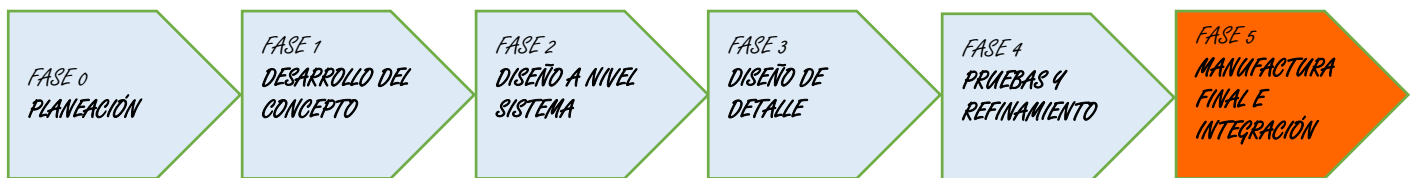


Fig. 4.5. El mecanismo instalado en el telescopio

5. INTEGRACIÓN DEL MECANISMO

Hasta ahora se ha descrito en esta tesis el proceso de diseño y manufactura del mecanismo de alineación y enfoque. Corresponde a este capítulo la descripción de la integración del mismo en el espectrógrafo Echelle del telescopio así como la realización de las pruebas finales.

5.1. EL PROCESO DE INTEGRACIÓN



Durante esta última etapa del proceso de diseño, a partir del prototipo ya existente verificado y probado, se procedió a la adquisición de los elementos de del sistema *tip-tilt* definitivos para ser integrados al mecanismo. Para ello, se realizó la última adecuación en la manufactura de las columnas para acoplar el tornillo de alta sensibilidad en su lugar respectivo. Asimismo se procedió con los sensores electrónicos, que en esta última etapa se adquirieron y se les adecuó su soporte, para el cual, se realizaron unas laminillas de aluminio para “abrazar” ajustadamente al vástago del sensor. También se llevó a efecto la protección anticorrosiva de las piezas metálicas: anodizado para las de aluminio, pavonado para las de acero.

El proceso de integración en el instrumento Echelle del telescopio se llevó a cabo con el fin de efectuar las pruebas finales que se detallan al final de este capítulo, pero su principal objetivo fue el de establecer la metodología de ensamble y mostrarla al usuario astronómico operativo final para que en el futuro se use sin problema alguno el mecanismo.

Las etapas que se desarrollaron durante el proceso de integración *in situ* fueron:

- A. Realizar lista de los elementos del mecanismo a integrar (en inglés *check list*).
- B. Reunión de todos los elementos con ayuda del *check list*.

- C. Embalaje, el cual consistió en envolver los elementos mecánicos con una película plástica comercialmente conocida como *player*.
- D. Traslado y transporte de los elementos embalados en una caja de cartón convencional o en una maleta simple.
- E. Desempaque de los elementos del mecanismo.
- F. Colocación de los elementos en el banco de trabajo.
- G. Preparación del instrumento Echelle del telescopio.
- H. Limpieza.
- I. Ensamble del mecanismo para fungir como la interfaz entre la cámara del espectrógrafo y el CCD.
- J. Realización de pruebas finales de alineación y enfoque.
- K. Marcación de los puntos de referencia para futuras integraciones (Ver manual en apéndice).
- L. Capacitación del personal técnico operativo astronómico como usuario final.
- M. Retroalimentación y elaboración del manual de instalación, alineación y enfoque (Véase anexo)
- N. Entrega del producto a los usuarios finales para la investigación científica.

Cabe mencionar que la integración fue realizada únicamente con las piezas manufacturadas descritas en el capítulo 4 y que se encuentran en el *check list* de la Tabla 5.1. Esto fue primordialmente porque durante las pruebas preliminares se notó que el movimiento rotacional se efectúa únicamente en un evento en el cual se posiciona por única ocasión en cada instalación, no teniendo variación que posteriormente se deba corregir mediante el sistema diseñado para ello. Sin embargo, si llegare a haber la necesidad por cambios en la geometría de los criostatos, se puede implementar este sistema de rotación sin problema alguno.

El proceso de ensamble para el mecanismo se encuentra descrito paso a paso en el apéndice, en el cual se muestran también los cuidados y/o precauciones que deben realizarse. En el mismo manual se describe el proceso de alineación y

enfoque así como la imagen referencia del espectro a obtener para considerarse adecuada e iniciar la investigación astronómica.

En la Fig. 5.1 se muestra la integración del mecanismo de alineación y enfoque en el espectrógrafo Echelle del telescopio.

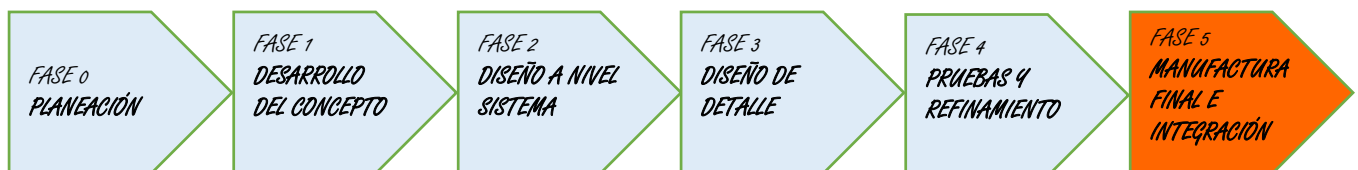
CHECK LIST DE PIEZAS Y UTILLAJE DEL MECANISMO DE ALINEACIÓN Y ENFOQUE			
#	Descripción	Cantidad	Verific.
1	Abrazadera mayor	1	✓
2	Abrazadera menor	1	✓
3	Columna 1	1	✓
4	Columna 2	1	✓
5	Columna 3	1	✓
6	Placa móvil	1	✓
7	Placa Fija	1	✓
8	Cinturón plástico flexible	1	✓
9	Cinturón plástico rígido	1	✓
10	Tope de placa fija para movimiento en XY	3	✓
11	Soporte de sensor electrónico	3	✓
12	Sensor electrónico	3	✓
13	Resorte de compresión	3	✓
14	Tornillo M6 de resorte de compresión (con 2 arandelas M6)	3	✓
15	Tornillo M6 de seguridad (con 1 arandela M6)	5	✓
16	Tornillo de alta sensibilidad con perilla	3	✓
17	Tornillo M6 de unión entre columna y abrazadera	6	✓
18	Tornillo M6 de unión entre abrazaderas	4	✓
19	Laminillas de ajuste para soporte de sensor electrónico	6	✓
20	Tornillo M2.5 para apriete de soporte de sensor electrónico	3	✓
21	Tornillo M3 para fijación de tope de placa fija para movimiento en XY	9	✓
22	Tornillo prisionero M5 para tope de placa fija para movimiento en XY	6	✓
23	Tornillo M6 para fijación de movimiento relativo entre placas (con 1 arandela M6 y 1 arandela M10)	3	✓
24	Tornillo M6 para fijación de placa fija a la cámara del Echelle	4	✓
25	Tornillo con cabeza ranurada para apriete de cinturón plástico rígido	2	✓
26	Llave Allen M2.5 con punta de bola	1	✓
27	Llave Allen M3 con punta de bola	1	✓
28	Llave Allen M5 con punta de bola	1	✓
29	Llave Allen M6 con punta de bola	1	✓
30	Llave Allen larga con perilla para tornillo de alta sensibilidad con perilla	1	✓
31	Desarmador plano	1	✓
32	Rollo de teflón	1	✓
33	Toallas para limpieza	3	✓
34	Pilas de repuesto para sensor electrónico	3	✓
35	Tornillos, arandelas y resorte de repuesto	1 por cada tipo	✓

Tabla 5.1. Check list del mecanismo de alineación y enfoque.



Fig. 5.1. El mecanismo de alineación y enfoque integrado al espectrógrafo Echelle del telescopio.

5.2. PRUEBAS FINALES



Se realizaron dos pruebas finales. Una fue llevada a cabo una antes de la integración y la otra fue realizada durante la integración, una vez ensamblado el mecanismo e instalado en el instrumento científico.

A continuación se describen tales pruebas.

PRUEBAS FINALES I

Su objetivo principal fue el de realizar un análisis de repetividad y determinar cuánto se desplazaría el centro del CCD por cada movimiento en uno de los micrómetros (sensores electrónicos), lo cual podría catalogarse como la medición de la resolución del mecanismo.

Para llevar a efecto este experimento, se procedió a montar el mecanismo ensamblado en una mesa de trabajo en el laboratorio del Instituto de Astronomía colocando en lugar del CCD una cámara fotográfica semi-profesional teniendo la precaución de colocar su captador de luz en el centro del mecanismo con el objetivo de caracterizar de la manera más real posible el comportamiento del mecanismo. Véase Fig. 5.2.

Sirvió como objeto a enfocar un punto de referencia colocado en la pared a una distancia de 4.43 m al centro de la cámara. Véase Fig. 5.3.

Las condiciones para realizar la toma de las fotografías fueron:

- Marca: Nikon D200.
- Distancia al objetivo: 4.43 m.
- Posición del tornillo activador respecto a la cámara: 80 mm.
- Zoom: 200.
- F: 5.6
- L: 1/160
- Escala: 0.4 cm virtuales = 0.1 cm real.



Fig. 5.2. Montaje para pruebas finales I.

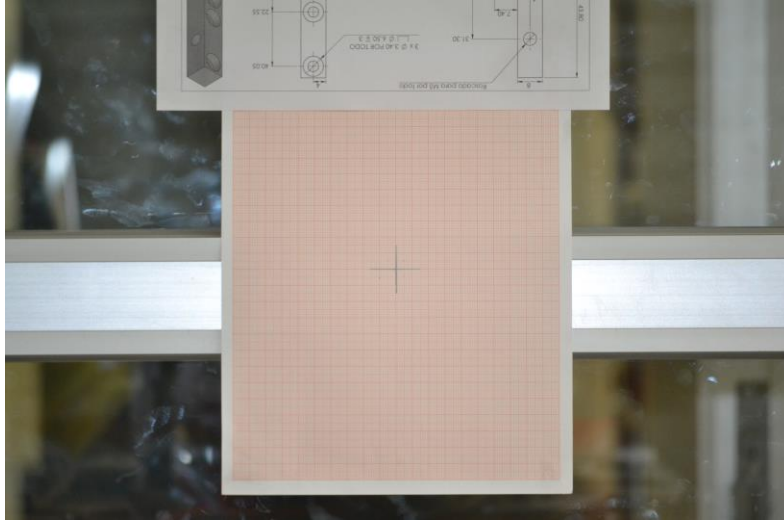


Fig. 5.3. Objetivo de enfoque para las pruebas finales I.

La escala fue determinada mediante el análisis de las fotografías con ayuda del software Adobe Photoshop cs6®. Véase Fig. 5.4.

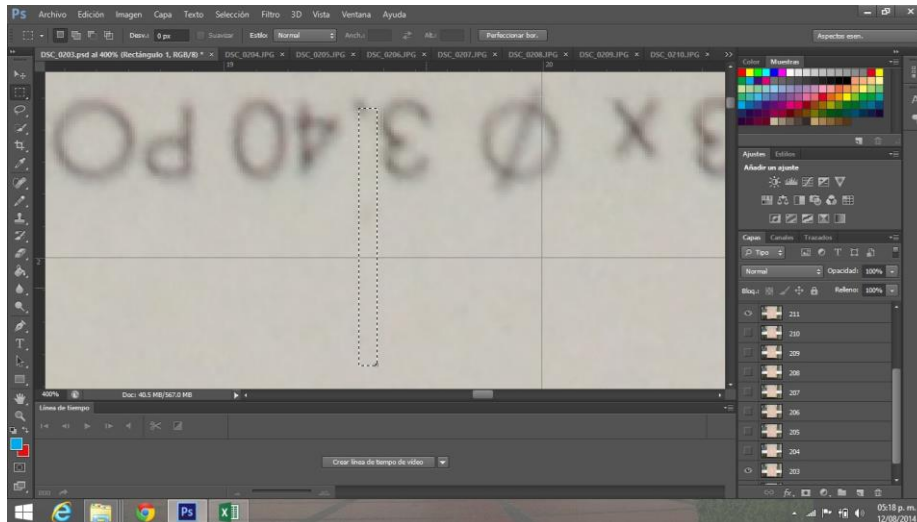


Fig. 5.4. Análisis de imagen para mediante Adobe Photoshop cs6

Ahora bien el método para realizar el experimento fue de la siguiente manera: para cada micrómetro, se hicieron 12 movimientos mediante el tornillo de levantamiento de la columna. Los movimientos fueron a intervalos de $250 \mu\text{m}$ partiendo de cero, llegando a un máximo de $1500 \mu\text{m}$ y descendiendo otra vez a cero. Antes de efectuar los movimientos todos los micrómetros se pusieron a 1

mm; es decir, las columnas estaban “flotando” esa cantidad a partir de la placa móvil con el fin de evitar interferencias durante los movimientos.

El orden para mover los micrómetros fue el siguiente: primero el micrómetro de la columna 1 con sus 12 movimientos, seguido del de la columna 2 con sus 12 movimientos y finalmente el de la columna 3 con sus 12 movimientos. Por cada ciclo de 12 movimientos se generaron 12 fotografías. El proceso fue repetido 5 veces. La Tabla 5.2 representa esta metodología.

Cantidad de movimientos y fotografías en:	Secuencia	Micrómetro 1	Micrómetro 2	Micrómetro 3
Ciclo 1		12	12	12
Ciclo 2		12	12	12
Ciclo 3		12	12	12
Ciclo 4		12	12	12
Ciclo 5		12	12	12
Total de movimientos		60	60	60
Total de fotografías		60	60	60

Tabla 5.2. Método para las pruebas finales I.

Obtenidas las imágenes se procedió a medir el desplazamiento del punto de referencia por cada movimiento realizado a los intervalos mencionados con ayuda del software citado. Así, se pudo caracterizar al mecanismo en su cinemática de posición del centro, en el cual se encuentra teóricamente el CCD. Cabe mencionar que en este análisis se realizaron comparaciones con el modelo matemático teniendo una variación mínima y tolerable. Los resultados de este experimento se encuentran analizados en el capítulo 6. De acuerdo con ellos, se tuvo la firme determinación para augurar un comportamiento robusto del producto.

PRUEBAS FINALES II

Estas pruebas se realizaron con el mecanismo directamente ensamblado e instalado en el instrumento Echelle.

Su objetivo fue primordialmente el de encontrar el foco y la alineación óptima dentro tolerancias, análogamente a lo que se hizo durante las pruebas preliminares.

Cabe mencionar que inicialmente, el criostato a acoplar era el llamado Marconi II, al cual se le había encontrado la posición focal y de alineación durante las pruebas preliminares; sin embargo, en esta ocasión, por decisión del personal responsable de instrumentación astronómica del Observatorio, se cambió el criostato a uno similar denominado Marconi IV, el cual contiene algunas diferencias en su geometría, lo cual, hace cambiar la posición del foco y de alineación respecto a la del Marconi II. Aunado a lo anterior, se realizaron algunos trabajos y modificaciones a los elementos ópticos del espectrógrafo Echelle (Véase Fig. 5.6), en especial a la cámara, lo que provocó que ahora el objetivo no fuera sólo enfocar y alinear con el Marconi II, sino también con el Marconi IV. El asunto de las diferencias en la geometría no fue un problema, pues durante la etapa del proceso de diseño mecánico de refinamiento se detectó la posibilidad de usar otros criostatos y se previó esta situación. Recuérdense los cambios realizados en esta etapa a algunos elementos mecánicos del mecanismo descritos en el capítulo 4.



Fig. 5.6. Cámara del espectrógrafo Echelle durante la modificación de sus elementos ópticos.

El método para sacar adelante las pruebas finales II fue el siguiente: se realizaron una serie de movimientos aleatorios y combinados en los tres micrómetros para encontrar el mejor foco. Hecho lo anterior y después de múltiples iteraciones se pudo encontrar la posición de los tres micrómetros que garantizarían una alineación y enfoque óptimos dentro de tolerancia. De tal manera que durante los siguientes eventos se procedió a colocar directamente los micrómetros en esa posición para analizar la repetitividad del mecanismo; esto fue realizado cinco veces. Todas estas operaciones fueron hechas en ambos criostatos: Marconi IV y Marconi II.

Ahora bien, las cantidades a medir para efecto de estas pruebas así como las de las preliminares, consisten en pixeles medidos mediante un software astronómico de procesamiento de imágenes llamado Ds9 y su complemento llamado IRAF. Esto puede comprobarse directamente en la pantalla del ordenador mediante el software astronómico el cual despliega las exposiciones según un patrón pre-establecido con una lámpara de Torio-Argón. Se considera que si el ancho de cada línea (véase Figura 9) es menor o igual a 3.5 pixeles, entonces se tiene una alineación y enfoque óptimos y listos para la observación de los objetos celestes [12]. Las zonas del espectro que despliega la pantalla son cinco y se denominan como sigue: tomando como referencia el centro de la imagen de la Fig. 5.7, las esquinas noroeste, noreste, suroeste y sureste corresponden a las zonas azul-azul, azul-rojo, rojo-azul y rojo-rojo respectivamente.

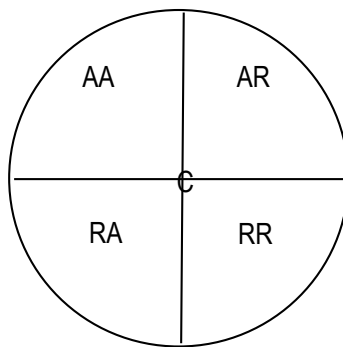


Fig. 5.7. Las cinco zonas del espectro.

En la Fig. 5.8 se proporciona una fotografía en la cual se aprecia la realización de estas pruebas. La Tabla 5.3 describe la secuencia del método aplicado para éstas. El correspondiente análisis de resultados de las mismas se trata en el capítulo 6.

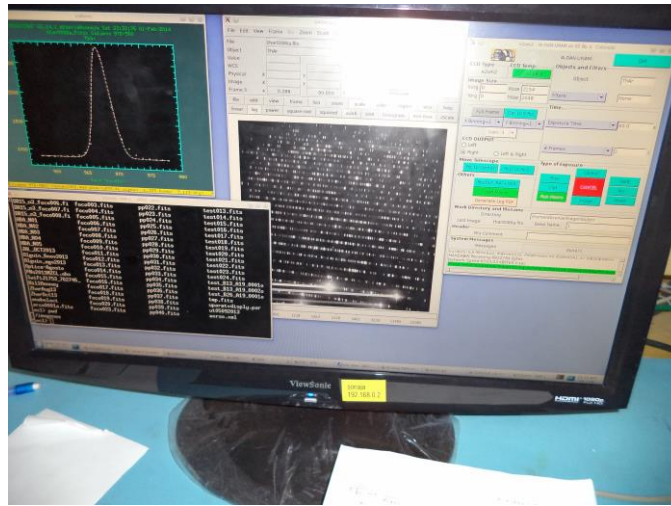


Fig. 5.8. Análisis del tamaño de píxeles del espectro durante las pruebas de alineación y enfoque finales.

Etapa	Movimientos realizados en los micrómetros	Objetivo y resultado
Etapa 0	Movimientos para alinear y enfocar	Encontrar la posición óptima
Evento 1	Micrómetros en posición óptima	Medir píxeles en ordenador en las cinco zonas.
Evento 2	Micrómetros en posición óptima	Medir píxeles en ordenador en las cinco zonas.
Evento 3	Micrómetros en posición óptima	Medir píxeles en ordenador en las cinco zonas.
Evento 4	Micrómetros en posición óptima	Medir píxeles en ordenador en las cinco zonas.
Evento 5	Micrómetros en posición óptima	Medir píxeles en ordenador en las cinco zonas.

Tabla 5.3. Método para las pruebas finales II.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo final se detallan en primer término, cuantitativamente, los resultados de las pruebas efectuadas según se explicó en las partes finales de los capítulos 4 y 5. Para el análisis de los resultados se empleó como herramienta estadística el análisis ANOVA. En segundo término, se enuncian las conclusiones finales a las que se llegó con el desarrollo de este producto.

Para el análisis de los resultados se empleó en primer lugar la tabulación de los datos finales obtenidos para obtener luego la gráfica de las variables involucradas en las pruebas, posteriormente, como herramienta estadística se utilizó el análisis ANOVA (por sus siglas en inglés *Analysis of Variance*), ya que por el tipo de experimento realizado es una técnica ideal para medir qué tanta variación tienen los resultados de las mediciones y poder inferir si existe repetitividad y así poder concluir en una caracterización confiable. La herramienta fue empleada con el apoyo de la función “análisis de datos” del paquete estadístico del software Excel. Para más información respecto a las ecuaciones que gobiernan esta teoría se puede consultar la [63] y [64].

6.1. RESULTADOS

Los resultados de las **pruebas preliminares** se presentan en la Tabla 6.1. La simbología AA, AR, RA, RR, Centro equivale las zonas Azul-Azul, Azul-Rojo, Rojo-Azul, Rojo-Rojo y Centro, del espectro generado con la lámpara de prueba de Th-Ar, respectivamente.

Zona	Medición 1 (píxeles)	Medición 2 (píxeles)	Medición 3 (píxeles)	Medición 4 (píxeles)	Promedio (píxeles)
AA	1.98	2.16	2.09	2.71	2.24
AR	3.35	2.75	3.24	2.09	2.86
RA	2.37	2.62	2.36	2.95	2.58
RR	2.75	3.19	3.1	3.28	3.08
Centro	2.77	3.75	2.85	4.2	3.39

Tabla 6.1. Resultados de las pruebas preliminares.

Como puede verificarse en la tabla anterior, salvo en la zona centro de la medición 2 y la medición 4, las mediciones no excedieron el límite permisible de 3.5 píxeles. En general, los promedios indican que los valores obtenidos por las mediciones se encuentran dentro de tolerancia. Para el experimento anterior, las posiciones de enfoque de cada columna fueron: Columna 1: 2 mm; Columna 2: 3 mm y columna 3: 0.25 mm.

Ahora bien, para las **pruebas finales I**, los datos que resultaron del experimento se muestran en la Tabla 6.2. Recuérdese que las pruebas se elaboraron repetidamente con el objetivo de caracterizar al mecanismo investigando las posiciones que dan una alineación y foco adecuados y que se encuentren dentro de tolerancia.

Micrómetro 1. Ciclo 1 (Repetición 1)															Micrómetro 2. Ciclo 1 (Repetición 1)															Micrómetro 3. Ciclo 1 (Repetición 1)																
# Mov	Avance (µm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} centro (mm)	Dif d	Ángu lo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avance (µm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} centro (mm)	Dif d	Ángu lo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avance (µm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} centro (mm)	Dif d	Ángu lo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)				
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	250	1.21	2.41	3.03	6.03	6.74	0.08	0.08	0.00	63.34	0.07	0.09	0.02	0.35	250	1.35	2.40	3.38	6.00	6.88	0.08	0.08	0.00	60.64	0.07	0.09	0.02	0.36	250	1.26	2.26	3.15	5.65	6.47	0.08	0.08	0.00	60.86	0.07	0.08	0.01	0.33				
2	500	2.43	5.00	6.08	12.50	13.90	0.17	0.17	0.00	64.08	0.14	0.18	0.04	0.36	500	2.51	4.77	6.28	11.93	13.48	0.17	0.16	0.01	62.25	0.14	0.17	0.03	0.35	500	2.47	4.83	6.18	12.08	13.56	0.17	0.17	0.00	62.92	0.14	0.18	0.04	0.35				
3	750	3.44	7.21	8.60	18.03	19.97	0.25	0.24	0.01	64.49	0.21	0.26	0.05	0.34	750	3.50	7.28	8.75	18.20	20.19	0.25	0.25	0.00	64.32	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.51	7.28	8.78	18.20	20.20	0.25	0.25	0.00	64.26	0.21	0.26	0.05	0.35				
4	1000	1.35	9.80	3.38	24.50	24.73	0.33	0.30	0.03	82.16	0.28	0.32	0.04	0.32	1000	1.55	10.09	3.88	25.23	25.52	0.33	0.31	0.02	81.27	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.47	10.33	3.68	25.83	26.09	0.33	0.32	0.01	81.90	0.28	0.34	0.06	0.34				
5	1250	1.00	12.98	2.50	32.45	32.55	0.42	0.40	0.02	85.59	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	1.21	12.99	3.03	32.48	32.62	0.42	0.40	0.02	84.68	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	1.07	13.00	2.68	32.50	32.61	0.42	0.40	0.02	85.29	0.35	0.42	0.07	0.34				
6	1500	0.25	14.99	0.63	37.48	37.48	0.50	0.46	0.04	89.04	0.42	0.48	0.06	0.32	1500	0.31	15.07	0.78	37.68	37.68	0.50	0.46	0.04	88.82	0.42	0.49	0.07	0.32	1500	0.24	15.21	0.60	38.03	38.03	0.50	0.46	0.04	89.10	0.42	0.49	0.07	0.33				
7	1250	1.20	13.01	3.00	32.53	32.66	0.42	0.40	0.02	84.73	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	1.23	13.12	3.08	32.80	32.94	0.42	0.40	0.02	84.64	0.35	0.43	0.08	0.34	1250	0.97	12.95	2.43	32.38	32.47	0.42	0.40	0.02	85.72	0.35	0.42	0.07	0.34				
8	1000	1.33	10.11	3.33	25.28	25.49	0.33	0.31	0.02	82.51	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.52	10.09	3.80	25.23	25.51	0.33	0.31	0.02	81.43	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.52	10.11	3.80	25.28	25.56	0.33	0.31	0.02	81.45	0.28	0.33	0.05	0.33				
9	750	3.51	7.25	8.78	18.13	20.14	0.25	0.25	0.00	64.17	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.48	7.19	8.70	17.98	19.97	0.25	0.24	0.01	64.17	0.21	0.26	0.05	0.34	750	3.44	7.22	8.60	18.05	19.99	0.25	0.24	0.01	64.52	0.21	0.26	0.05	0.34				
10	500	2.55	4.70	6.38	11.75	13.37	0.17	0.16	0.01	61.52	0.14	0.17	0.03	0.35	500	2.43	4.89	6.08	12.23	13.65	0.17	0.17	0.00	63.58	0.14	0.18	0.04	0.35	500	2.43	4.79	6.08	11.98	13.43	0.17	0.16	0.01	63.10	0.14	0.17	0.03	0.35				
11	250	1.28	2.40	3.20	6.00	6.80	0.08	0.08	0.00	61.93	0.07	0.09	0.02	0.35	250	1.35	2.33	3.38	5.83	6.73	0.08	0.08	0.00	59.91	0.07	0.09	0.02	0.35	250	1.29	2.41	3.23	6.03	6.83	0.08	0.08	0.00	61.84	0.07	0.09	0.02	0.35				
12	0	0.04	0.10	0.10	0.25	0.27	0.00	0.00	0.00	68.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.10	0.05	0.25	0.13	0.28	0.00	0.00	0.00	26.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.02	0.11	0.05	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00	79.70	0.00	0.00	0.00	0.00				

Micrómetro 1. Ciclo 2 (Repetición 2)															Micrómetro 2. Ciclo 2 (Repetición 2)															Micrómetro 3. Ciclo 2 (Repetición 2)																
# Mov	Avance (µm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} centro (mm)	Dif d	Ángu lo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avance (µm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} centro (mm)	Dif d	Ángu lo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avance (µm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} centro (mm)	Dif d	Ángu lo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)				
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	250	1.25	2.37	3.13	5.93	6.70	0.08	0.09	0.01	62.19	0.07	0.09	0.02	0.35	250	1.25	2.23	3.13	5.58	6.39	0.08	0.08	0.00	60.73	0.07	0.08	0.01	0.33	250	1.22	2.37	3.05	5.93	6.66	0.08	0.08	0.00	62.76	0.07	0.09	0.02	0.34				
2	500	2.41	5.01	6.03	12.53	13.90	0.17	0.18	0.01	64.31	0.14	0.18	0.04	0.36	500	2.52	4.95	6.30	12.38	13.89	0.17	0.17	0.00	63.02	0.14	0.18	0.04	0.36	500	2.45	4.71	6.13	11.78	13.27	0.17	0.16	0.01	62.52	0.14	0.17	0.03	0.34				
3	750	3.49	7.23	8.73	18.08	20.07	0.25	0.26	0.01	64.23	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.44	7.21	8.60	18.03	19.97	0.25	0.24	0.01	64.49	0.21	0.26	0.05	0.34	750	3.39	7.27	8.48	18.18	20.05	0.25	0.24	0.01	65.00	0.21	0.26	0.05	0.35				
4	1000	1.32	9.95	3.30	24.88	25.09	0.33	0.32	0.01	82.44	0.28	0.32	0.04	0.32	1000	1.58	9.97	3.95	24.93	25.24	0.33	0.31	0.02	80.99	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.45	9.99	3.63	24.98	25.24	0.33	0.31	0.02	81.74	0.28	0.33	0.05	0.33				
5	1250	0.95	12.51	2.38	31.28	31.37	0.42	0.40	0.02	85.66	0.35	0.41	0.06	0.32	1250	1.00	13.60	2.50	34.00	34.09	0.42	0.42	0.00	85.79	0.35	0.44	0.09	0.35	1250	0.89	12.88	2.23	32.20	32.28	0.42	0.39	0.03	86.05	0.35	0.42	0.07	0.33				
6	1500	0.27	14.85	0.68	37.13	37.13	0.50	0.47	0.03	88.96	0.42	0.48	0.06	0.32	1500	0.21	14.99	0.53	37.48	37.48	0.50	0.46	0.04	89.20	0.42	0.48	0.06	0.32	1500	0.20	15.07	0.50	37.68	37.68	0.50	0.46	0.04	89.24	0.42	0.49	0.07	0.32				
7	1250	0.99	12.67	2.48	31.68	31.77	0.42	0.40	0.02	85.53	0.35	0.41	0.06	0.33	1250	1.21	12.98	3.03	32.45	32.59	0.42	0.40	0.02	84.67	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	1.12	13.00	2.80	32.50	32.62	0.42	0.40	0.02	85.08	0.35	0.42	0.07	0.34				
8	1000	1.35	10.10	3.38	25.25	25.47	0.33	0.32	0.01	82.39	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.65	10.12	4.13	25.30	25.63	0.33	0.31	0.02	80.74	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.30	10.14	3.25	25.35	25.56	0.33	0.31	0.02	82.69	0.28	0.33	0.05	0.33				
9	750	3.47	7.35	8.68	18.38	20.32	0.25	0.26	0.01	64.73	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.51	7.31	8.78	18.28	20.27	0.25	0.25	0.00	64.35	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.50	7.19	8.75	17.98	19.99	0.25	0.24	0.01	64.04	0.21	0.26	0.05	0.34				
10	500	2.50	4.88	6.25	12.20	13.71	0.17	0.17	0.00	62.87	0.14	0.18	0.04	0.35	500	2.43	5.00	6.08	12.50	13.90	0.17	0.17	0.00	64.08	0.14	0.18	0.04	0.36	500	2.49	5.07	6.23	12.68	14.12	0.17	0.17	0.00	63.84	0.14	0.18	0.04	0.37				
11	250	1.27	2.33	3.18	5.83	6.63	0.08	0.08	0.00	61.41	0.07	0.09	0.02	0.34	250	1.34	2.33	3.35	5.83	6.72	0.08	0.08	0.00	60.10	0.07	0.09	0.02	0.35	250	1.26	2.34	3.15	5.85	6.64	0.08	0.08	0.00	61.70	0.07	0.09	0.02	0.34				
12	0	0.09	0.20	0.22	0.50	0.54	0.00	0.01	0.01	66.73	0.00	0.01	0.01	0.00	0	0.13	0.07	0.33	0.18	0.37	0.00	0.00	0.00	28.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.20	0.17	0.50	0.43	0.66	0.00	0.01	-0.01	40.36	0.00	0.01	0.01	0.00				

Tabla 6.2. Resultados de las posiciones de los micrómetros en cada repetición o ciclo...

Micrómetro 1. Ciclo 3 (Repetición 3)														Micrómetro 2. Ciclo 3 (Repetición 3)														Micrómetro 3. Ciclo 3 (Repetición 3)																	
# Mov.	Avance (μm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} (mm)	Dif d	Ángulo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avance (μm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} (mm)	Dif d	Ángulo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avance (μm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} (mm)	Dif d	Ángulo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)			
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	250	1.33	2.25	3.33	5.63	6.53	0.08	0.08	0.00	59.41	0.07	0.08	0.01	0.34	250	1.21	2.36	3.03	5.90	6.63	0.08	0.08	0.00	62.86	0.07	0.09	0.02	0.34	250	1.22	2.29	3.05	5.73	6.49	0.08	0.08	0.00	61.95	0.07	0.08	0.01	0.34			
2	500	2.51	4.70	6.28	11.75	13.32	0.17	0.16	0.01	61.90	0.14	0.17	0.03	0.34	500	2.45	4.98	6.13	12.45	13.88	0.17	0.17	0.00	63.80	0.14	0.18	0.04	0.36	500	2.51	4.99	6.28	12.48	13.96	0.17	0.17	0.00	63.30	0.14	0.18	0.04	0.36			
3	750	3.48	7.23	8.70	18.08	20.06	0.25	0.24	0.01	64.30	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.39	7.32	8.48	18.30	20.17	0.25	0.25	0.00	65.15	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.44	7.31	8.60	18.28	20.20	0.25	0.25	0.00	64.80	0.21	0.26	0.05	0.35			
4	1000	1.37	10.10	3.43	25.25	25.48	0.33	0.31	0.02	82.28	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.25	10.00	3.13	25.00	25.19	0.33	0.31	0.02	82.87	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.27	10.00	3.18	25.00	25.20	0.33	0.31	0.02	82.76	0.28	0.33	0.05	0.33			
5	1250	1.10	13.33	2.75	33.33	33.44	0.42	0.41	0.01	85.28	0.35	0.43	0.08	0.35	1250	1.17	12.85	2.93	32.13	32.26	0.42	0.39	0.03	84.80	0.35	0.42	0.07	0.33	1250	1.19	13.00	2.98	32.50	32.64	0.42	0.40	0.02	84.77	0.35	0.42	0.07	0.34			
6	1500	0.29	15.20	0.73	38.00	38.01	0.50	0.46	0.04	88.91	0.42	0.49	0.07	0.33	1500	0.27	15.21	0.68	38.03	38.03	0.50	0.46	0.04	88.98	0.42	0.49	0.07	0.33	1500	0.23	15.15	0.58	37.88	37.88	0.50	0.46	0.04	89.13	0.42	0.49	0.07	0.33			
7	1250	1.12	13.01	2.80	32.53	32.65	0.42	0.40	0.02	85.08	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	1.18	13.00	2.95	32.50	32.63	0.42	0.40	0.02	84.81	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	1.17	12.98	2.93	32.45	32.58	0.42	0.40	0.02	84.85	0.35	0.42	0.07	0.34			
8	1000	1.55	9.87	3.88	24.68	24.98	0.33	0.30	0.03	81.08	0.28	0.32	0.04	0.32	1000	1.22	10.07	3.05	25.18	25.36	0.33	0.31	0.02	83.09	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.33	9.98	3.33	24.95	25.17	0.33	0.31	0.02	82.41	0.28	0.33	0.05	0.33			
9	750	3.39	7.20	8.48	18.00	19.90	0.25	0.24	0.01	64.79	0.21	0.26	0.05	0.34	750	3.41	7.17	8.53	17.93	19.85	0.25	0.24	0.01	64.56	0.21	0.26	0.05	0.34	750	3.48	7.25	8.70	18.13	20.10	0.25	0.25	0.00	64.36	0.21	0.26	0.05	0.35			
10	500	2.41	4.99	6.03	12.48	13.85	0.17	0.17	0.00	64.22	0.14	0.18	0.04	0.36	500	2.50	4.87	6.25	12.18	13.69	0.17	0.17	0.00	62.83	0.14	0.18	0.04	0.35	500	2.49	5.00	6.23	12.50	13.96	0.17	0.17	0.00	63.53	0.14	0.18	0.04	0.36			
11	250	1.28	2.30	3.20	5.75	6.58	0.08	0.08	0.00	60.90	0.07	0.09	0.02	0.34	250	1.26	2.27	3.15	5.68	6.49	0.08	0.08	0.00	60.97	0.07	0.08	0.01	0.34	250	1.30	2.38	3.25	5.95	6.78	0.08	0.08	0.00	61.36	0.07	0.09	0.02	0.35			
12	0	0.03	0.09	0.08	0.23	0.24	0.00	0.00	0.00	71.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.04	0.12	0.10	0.30	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.10	0.12	0.25	0.30	0.39	0.00	0.00	0.00	50.19	0.00	0.01	0.01	0.00				

Micrómetro 1. Ciclo 4 (Repetición 4)														Micrómetro 2. Ciclo 4 (Repetición 4)														Micrómetro 3. Ciclo 4 (Repetición 4)																			
# Mov.	Avance (μm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} (mm)	Dif d	Ángulo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avance (μm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} (mm)	Dif d	Ángulo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avance (μm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{mat} (mm)	d _{real} (mm)	Dif d	Ángulo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)					
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	250	1.35	2.29	3.38	5.73	6.65	0.08	0.08	0.00	59.48	0.07	0.09	0.02	0.34	250	1.35	2.29	3.38	5.73	6.65	0.08	0.08	0.00	59.48	0.07	0.09	0.02	0.34	250	1.29	2.33	3.23	5.83	6.66	0.08	0.08	0.00	61.03	0.07	0.09	0.02	0.34					
2	500	2.44	4.70	6.10	11.75	13.24	0.17	0.16	0.01	62.56	0.14	0.17	0.03	0.34	500	2.48	4.76	6.20	11.90	13.42	0.17	0.16	0.01	62.48	0.14	0.17	0.03	0.35	500	2.41	4.79	6.03	11.98	13.41	0.17	0.16	0.01	63.29	0.14	0.17	0.03	0.35					
3	750	3.41	7.22	8.53	18.05	19.96	0.25	0.24	0.01	64.72	0.21	0.26	0.05	0.34	750	3.47	7.25	8.68	18.13	20.09	0.25	0.24	0.01	64.42	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.35	7.35	8.38	18.38	20.19	0.25	0.25	0.00	65.50	0.21	0.26	0.05	0.35					
4	1000	1.39	9.74	3.48	24.35	24.60	0.33	0.30	0.03	81.88	0.28	0.32	0.04	0.32	1000	1.48	9.82	3.70	24.55	24.83	0.33	0.30	0.03	81.43	0.28	0.32	0.04	0.32	1000	1.29	10.22	3.23	25.55	25.75	0.33	0.31	0.02	82.81	0.28	0.33	0.05	0.33					
5	1250	1.14	12.95	2.85	32.38	32.50	0.42	0.40	0.02	84.97	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	0.98	13.30	2.45	33.25	33.34	0.42	0.41	0.01	85.79	0.35	0.43	0.08	0.34	1250	1.00	12.79	2.50	31.98	32.07	0.42	0.39	0.03	85.53	0.35	0.41	0.06	0.33					
6	1500	0.20	14.83	0.50	37.08	37.08	0.50	0.45	0.05	89.23	0.42	0.48	0.06	0.32	1500	0.23	15.07	0.58	37.68	37.68	0.50	0.46	0.04	89.13	0.42	0.49	0.07	0.32	1500	0.28	15.11	0.70	37.78	37.78	0.50	0.46	0.04	88.94	0.42	0.49	0.07	0.33					
7	1250	0.97	13.33	2.43	33.33	33.41	0.42	0.41	0.01	85.84	0.35	0.43	0.08	0.35	1250	1.00	12.96	2.50	32.40	32.50	0.42	0.40	0.02	85.59	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	1.14	12.67	2.85	31.68	31.80	0.42	0.39	0.03	84.86	0.35	0.41	0.06	0.33					
8	1000	1.55	10.09	3.88	25.23	25.52	0.33	0.31	0.02	81.27	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.55	9.97	3.88	24.93	25.22	0.33	0.31	0.02	81.16	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.48	10.10	3.70	25.25	25.52	0.33	0.31	0.02	81.66	0.28	0.33	0.05	0.33					
9	750	3.51	7.27	8.78	18.18	20.18	0.25	0.25	0.00	64.23	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.46	7.19	8.65	17.98	19.95	0.25	0.24	0.01	64.30	0.21	0.26	0.05	0.34	750	3.45	7.28	8.63	18.20	20.14	0.25	0.25	0.00	64.64	0.21	0.26	0.05	0.35					
10	500	2.52	5.10	6.30	12.75	14.22	0.17	0.17	0.00	63.71	0.14	0.18	0.04	0.37	500	2.51	4.72	6.28	11.80	13.36	0.17	0.16	0.01	62.00	0.14	0.17	0.03	0.35	500	2.44	5.10	6.10	12.75	14.13	0.17	0.17	0.00	64.43	0.14	0.18	0.04	0.37					
11	250	1.35	2.28	3.38	5.70	6.62	0.08	0.08	0.00	59.37	0.07	0.09	0.02	0.34	250	1.35	2.42	3.38	6.05	6.93	0.08	0.08	0.00	60.84	0.07	0.09	0.02	0.36	250	1.31	2.34	3.28	5.85	6.70	0.08	0.08	0.00	60.76	0.07	0.09	0.02	0.35					
12	0	0.10	0.10	0.25	0.25	0.35	0.00	0.00	0.00	45.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.11	0.06	0.28	0.15	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.15	0.02	0.38	0.05	0.38	0.00	0.00	0.00	7.59	0.00	0.00	0.00	0.00							

Tabla 6.2. Resultados de las posiciones de los micrómetros en cada repetición o ciclo. *Cont...*

# Mo v.	Micrómetro 1. Ciclo 5 (Repetición 5)														Micrómetro 2. Ciclo 5 (Repetición 5)														Micrómetro 3. Ciclo 5 (Repetición 5)															
	Avance (µm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{nat} (mm)	d _{real} centro (mm)	Dif d	Ángu lo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avanc e (µm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{nat} (mm)	d _{real} centro (mm)	Dif d	Ángu lo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/mm)	Avanc e (µm)	Xv (mm)	Yv (mm)	X (mm)	Y (mm)	r (mm)	d _{nat} (mm)	d _{real} centro (mm)	Dif d	Ángu lo pro (°)	Ang mat	Ang real	Dif ang	Resol. (°/m m)		
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	250	1.27	2.31	3.18	5.78	6.59	0.08	0.08	0.00	61.20	0.07	0.09	0.02	0.34	250	1.24	2.25	3.10	5.63	6.42	0.08	0.08	0.00	61.14	0.07	0.08	0.01	0.33	250	1.27	2.27	3.18	5.68	6.50	0.08	0.08	0.00	60.77	0.07	0.08	0.01	0.34		
2	500	2.48	4.89	6.20	12.23	13.71	0.17	0.17	0.00	63.11	0.14	0.18	0.04	0.35	500	2.49	4.93	6.23	12.33	13.81	0.17	0.17	0.00	63.20	0.14	0.18	0.04	0.36	500	2.53	4.99	6.33	12.48	13.99	0.17	0.17	0.00	63.11	0.14	0.18	0.04	0.36		
3	750	3.51	7.30	8.78	18.25	20.25	0.25	0.25	0.00	64.32	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.52	7.21	8.80	18.03	20.06	0.25	0.24	0.01	63.98	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.47	7.30	8.68	18.25	20.21	0.25	0.25	0.00	64.58	0.21	0.26	0.05	0.35		
4	1000	1.30	10.07	3.25	25.18	25.38	0.33	0.31	0.02	82.64	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.45	10.13	3.63	25.33	25.58	0.33	0.31	0.02	81.85	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.33	10.00	3.33	25.00	25.22	0.33	0.31	0.02	82.42	0.28	0.33	0.05	0.33		
5	1250	1.10	12.99	2.75	32.48	32.59	0.42	0.40	0.02	85.16	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	1.07	12.69	2.68	31.73	31.84	0.42	0.39	0.03	85.18	0.35	0.41	0.06	0.33	1250	0.98	12.88	2.45	32.20	32.29	0.42	0.39	0.03	85.65	0.35	0.42	0.07	0.33		
6	1500	0.22	15.01	0.55	37.53	37.53	0.50	0.46	0.04	89.16	0.42	0.49	0.07	0.32	1500	0.30	14.96	0.75	37.40	37.41	0.50	0.46	0.04	88.85	0.42	0.48	0.06	0.32	1500	0.31	15.22	0.78	38.05	38.06	0.50	0.46	0.04	88.83	0.42	0.49	0.07	0.33		
7	1250	0.99	12.97	2.48	32.43	32.52	0.42	0.40	0.02	85.64	0.35	0.42	0.07	0.34	1250	1.25	12.73	3.13	31.83	31.98	0.42	0.39	0.03	84.39	0.35	0.41	0.06	0.33	1250	0.99	12.98	2.48	32.45	32.54	0.42	0.40	0.02	85.64	0.35	0.42	0.07	0.34		
8	1000	1.45	10.00	3.63	25.00	25.26	0.33	0.31	0.02	81.75	0.28	0.33	0.05	0.33	1000	1.35	10.30	3.38	25.75	25.97	0.33	0.32	0.01	82.53	0.28	0.34	0.06	0.34	1000	1.37	10.12	3.43	25.30	25.53	0.33	0.31	0.02	82.29	0.28	0.33	0.05	0.33		
9	750	3.45	7.31	8.63	18.28	20.21	0.25	0.25	0.00	64.73	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.51	7.26	8.78	18.15	20.16	0.25	0.25	0.00	64.20	0.21	0.26	0.05	0.35	750	3.41	7.24	8.53	18.10	20.01	0.25	0.24	0.01	64.78	0.21	0.26	0.05	0.35		
10	500	2.54	5.06	6.35	12.65	14.15	0.17	0.17	0.00	63.34	0.14	0.18	0.04	0.37	500	2.41	5.02	6.03	12.55	13.92	0.17	0.17	0.00	64.36	0.14	0.18	0.04	0.36	500	2.50	4.75	6.25	11.88	13.42	0.17	0.16	0.01	62.24	0.14	0.17	0.03	0.35		
11	250	1.31	2.29	3.28	5.73	6.60	0.08	0.08	0.00	60.23	0.07	0.09	0.02	0.34	250	1.31	2.35	3.28	5.88	6.73	0.08	0.08	0.00	60.86	0.07	0.09	0.02	0.35	250	1.32	2.40	3.30	6.00	6.85	0.08	0.08	0.00	61.19	0.07	0.09	0.02	0.35		
12	0	0.07	0.07	0.18	0.18	0.25	0.00	0.00	0.00	45.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.10	0.12	0.25	0.30	0.39	0.00	0.00	0.00	50.19	0.00	0.01	0.01	0.00	0	0.14	0.04	0.35	0.10	0.36	0.00	0.00	0.00	15.95	0.00	0.00	0.00	0.00		

Tabla 6.2. Resultados de las posiciones de los micrómetros en cada repetición o ciclo.

Donde:

Avance: Representa la distancia del micrómetro instalado en la columna que va de la superficie superior de la placa superior móvil a la superficie inferior de la columna.

Xv: Es la distancia del punto de referencia de la fotografía, sobre el eje X, medida desde el punto de referencia en la posición cero a la posición actual generada al mover el tornillo de accionamiento para el cual responde el micrómetro.

Yv: Es la distancia del punto de referencia de la fotografía, sobre el eje Y, medida desde el punto de referencia en la posición cero a la posición actual generada al mover el tornillo de accionamiento para el cual responde el micrómetro.

X: Es la distancia real del punto de referencia, sobre el eje X, medida desde el punto de referencia en la posición cero a la posición actual generada al mover el tornillo de accionamiento para el cual responde el micrómetro al aplicar el factor de escala 10 mm reales = 4 mm virtuales (medidos con Photoshop).

Y: Es la distancia real del punto de referencia, sobre el eje Y, medida desde el punto de referencia en la posición cero a la posición actual generada al mover el tornillo de accionamiento para el cual responde micrómetro al aplicar el factor de escala 10 mm reales = 4 mm virtuales (medidos con Photoshop).

r: Representa la distancia proyectada que recorre el punto central del mecanismo (donde está el centro de la cámara) desde su posición inicial hasta la posición actual, es decir:

$$r = \text{Raíz cuadrada (X, Y)}$$

d_{mat} : Es la distancia teórica que se mueve el centro del mecanismo obtenida con las ecuaciones de su modelo matemático.

$d_{\text{real}_{\text{centro}}}$: Es la distancia real que se mueve el centro del mecanismo. Se obtiene al convertir la r en una distancia equivalente propia de la cámara, pues el centro de ésta es el que “se mueve” y los otros valores sólo son “proyecciones”. Para la conversión se aplica el factor de acuerdo con las características del zoom y del número F aplicado. Para ello se consultaron las propiedades de la cámara proporcionadas por el fabricante así como las referencias: [65 a 68].

Dif d: Es la diferencia entre el d_{mat} y $d_{\text{real}_{\text{centro}}}$.

Ángulo pro: Es el ángulo proyectado en grados, resultante del vector que va del punto de referencia en la posición cero al punto (X, Y) de la posición actual.

Ang mat: Es el ángulo de inclinación en grados, que tiene el mecanismo al moverse alguno de los micrómetros, obtenido a partir del modelo matemático.

Ang real: Es el ángulo de inclinación en grados, que tiene el mecanismo al moverse alguno de los micrómetros, obtenido a partir del experimento.

Dif ang: Es la diferencia entre Ang mat y Ang real.

Resol.: Es el cociente entre el Avance y el Ang real que indica la resolución angular o bien la cantidad de inclinación en grados que tendrá el mecanismo al moverse o avanzar el micrómetro.

Cabe decir que de estos resultados, los concernientes a la distancia que se mueve el centro del mecanismo así como el ángulo generado son los más importantes, pues dan una aproximación bastante buena pese a que el experimento detallado en el capítulo 5 es medido únicamente con las proyecciones en el plano fotográfico. Por otro lado, tales resultados coinciden en buena medida con los arrojados por el modelo matemático, por lo que se puede concluir que éste es también una buena aproximación de la realidad cinemática del mecanismo.

Para una mejor apreciación, se presenta a continuación algunas gráficas con el objetivo de comparar el potencial de repetitividad del mecanismo. Las gráficas tienen como variable independiente al Avance, y como independientes a X_v , Y_v , $d_{real_{centro}}$, Ang real, d_{mat} y Ang mat. Se muestran sólo algunas de ellas seleccionadas a partir de los datos concernientes a las repeticiones o ciclos de los micrómetros de la Tabla 6.2; las demás se omitieron por motivos de espacio.

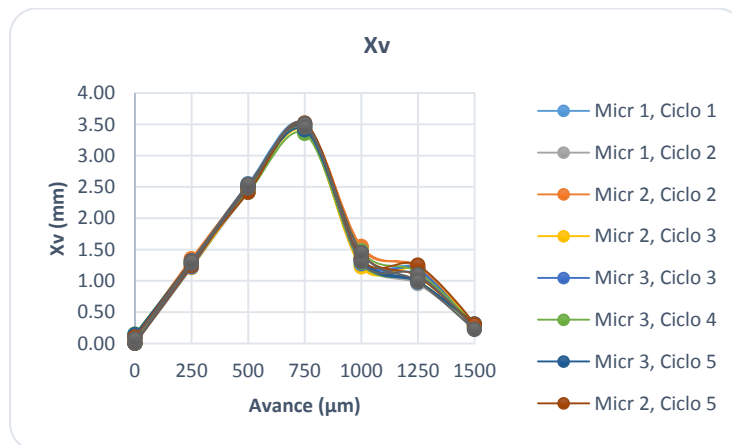


Fig. 6.1. Gráfica de Avance- X_v para varios ciclos de los tres micrómetros.

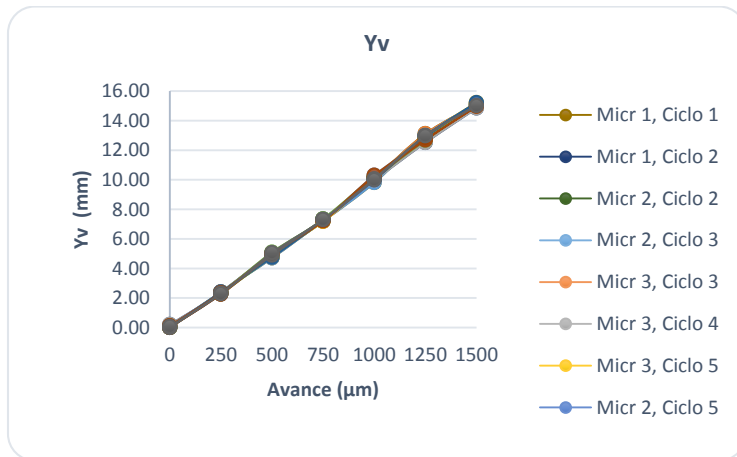


Fig. 6.2. Gráfica de Avance-Yv para varios ciclos de los tres micrómetros.

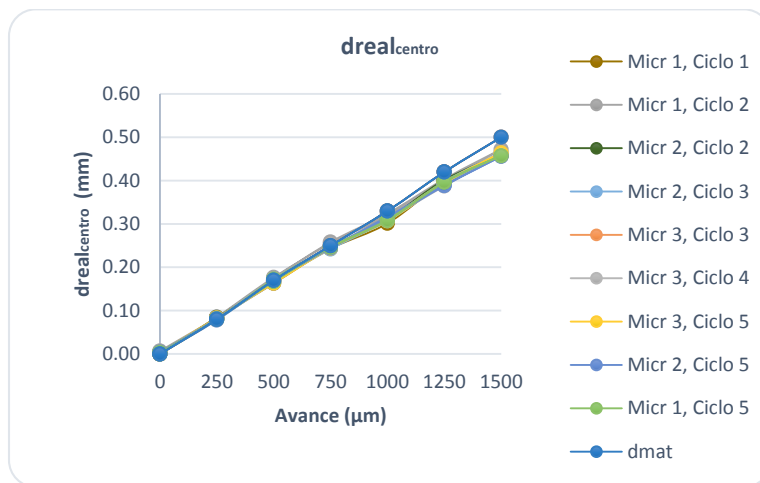


Fig. 6.3. Gráfica de Avance-dreal_{centro} para varios ciclos de los tres micrómetros.

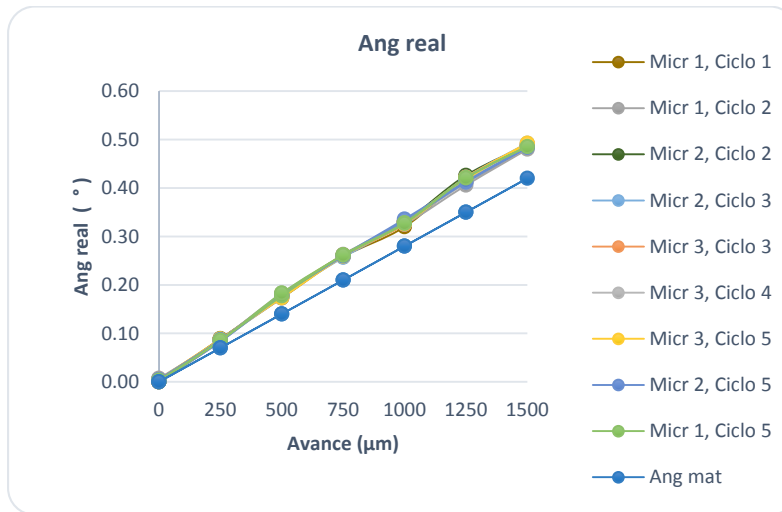


Fig. 6.4. Gráfica de Ang real-dreal para varios ciclos de los tres micrómetros.

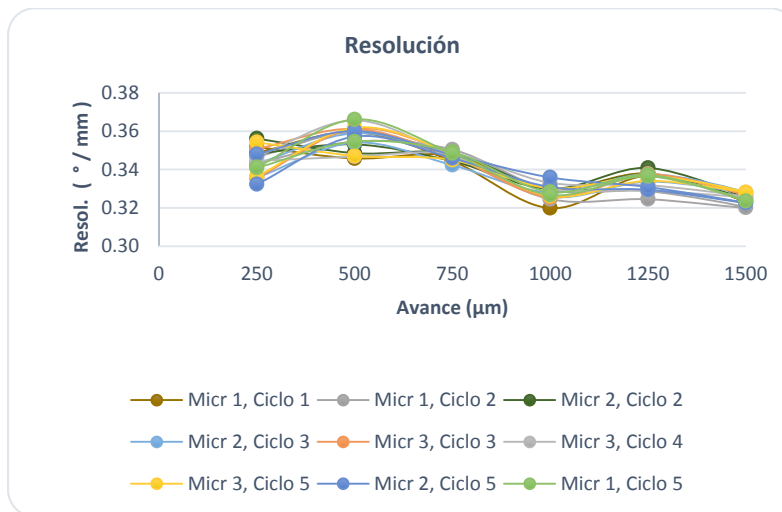


Fig. 6.5. Gráfica de Avance-Resolución para varios ciclos de los tres micrómetros.

Las gráficas de las figuras 6.1 y 6.2 muestran cómo las coordenadas del punto de referencia se mueven de fotografía en fotografía con respecto al punto de referencia cero inicial, a partir de ellas se puede inferir que existe una repetibilidad aceptable al mover los micrómetros n veces, pues las curvas son muy similares y por su poca diferencia se concluye que son concurrentes.

La Fig. 6.3 muestra el desplazamiento real del centro del mecanismo comparado con la curva del desplazamiento teórico tomado a partir del modelo matemático. Nótese que esta curva característica es muy similar y concurrente con las demás curvas de desplazamiento real para diferentes repeticiones; a lo más, existe una

pequeña diferencia o error absoluto de 0.05 mm entre lo que supone el modelo matemático y la realidad “aproximada” del experimento. Lo mismo ocurre con la gráfica de la Fig. 6.4 en la que se muestra las curvas del ángulo real comparada con la curva del ángulo teórico obtenido a partir del modelo matemático; en este caso la máxima diferencia o error absoluto es de 0.09 °.

Por otra parte, en la gráfica de la Fig. 6.5 es posible apreciar que la resolución se comporta de manera constante como era de esperarse. El promedio general de todas las resoluciones obtenidas a partir del experimento es de 0.34 °/mm, lo cual se traduce en que por cada milímetro de avance en alguno de los micrómetros existirá una inclinación en el plano generado por los tres micrómetros de 0.34° respecto al plano horizontal XY. Estas curvas características tienden a ser una línea recta cuya ordenada constante es de 0.34°/mm a medida que el micrómetro “avanza” o se mueve.

Resumiendo, las curvas del desplazamiento y del ángulo de inclinación del mecanismo concurren y expresan el comportamiento cinemático de posición del mecanismo, obteniendo con ello una adecuada caracterización del mismo.

Para el caso de las **pruebas finales II**, se tiene lo siguiente.

Se efectuaron pruebas con algunas posiciones de las columnas una vez identificadas aquellas que logran un foco y alineación aceptables dentro de tolerancias después de haber efectuado más de 300 iteraciones que consistieron en combinar los avances de cada uno de los micrómetros a diferentes alturas para hacer el *tip-tilt* hasta lograr visualizar el patrón Th-Ar de manera adecuada. A saber, existen algunas posiciones en las que se alcanza el objetivo mediante un efecto “émbolo”. En la Tabla 6.3 se pueden apreciar los resultados obtenidos.

En dicha tabla se puede ver de nueva cuenta, análogamente a las pruebas preliminares, los pixeles medidos mediante el software ds9 y su complemento IRAF para las diferentes zonas del espectro, AA, AR, RR, RA y Centro: Azul-Azul, Azul-Rojo, Rojo-Rojo, Rojo-Azul y Centro respectivamente. Una vez más, el promedio de los pixeles para cada medición (repetición) se encuentran dentro del límite de tolerancia de 3.5 pixeles. Además, es fácil verificar a simple vista que los datos para cada repetición de cada una de las cinco posiciones que hacen foco y alineación ópticamente aceptables concurren, razón por la cual se concluye nuevamente que el mecanismo proporciona una repetividad aceptable.

L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	AA (pixeles)	AR (pixeles)	RA (pixeles)	RR (pixeles)	Centro (pixeles)	Promedio (pixeles)
0.63	0.63	0.63	2.450	1.810	2.780	2.680	4.290	2.802
0.63	0.63	0.63	2.253	1.692	2.941	2.855	4.564	2.861
0.63	0.63	0.63	2.750	1.740	2.946	2.777	4.274	2.897
0.63	0.63	0.63	2.790	1.740	2.920	2.950	4.420	2.964
0.64	0.64	0.64	2.660	1.770	3.030	2.660	3.900	2.804
0.64	0.64	0.64	2.850	1.898	2.884	2.645	4.017	2.859
0.64	0.64	0.64	2.850	1.898	2.884	2.645	4.017	2.859
0.65	0.65	0.65	2.880	1.960	3.060	2.520	3.760	2.836
0.65	0.65	0.65	2.706	1.781	2.932	2.513	3.719	2.730
0.65	0.65	0.65	2.766	1.921	2.889	2.575	3.841	2.798
0.67	0.67	0.67	3.154	1.935	2.923	2.140	2.995	2.629
0.67	0.67	0.67	3.030	1.960	2.990	2.140	2.750	2.574
0.72	0.72	0.72	3.928	2.099	2.903	1.528	1.638	2.419
0.72	0.72	0.72	3.817	2.090	2.910	1.740	1.750	2.461

Tabla 6.3. Resultados de las pruebas finales II.

Adicionalmente, de la tabla anterior, se puede inferir que la posición de alineación y enfoque que no rebasa los 3.5 pixeles en todas sus zonas es en la cual todas las columnas, denotadas por “L1”, “L2” y “L3” tienen una altura de 0.67 mm, por lo que se considerará esta posición como la posición de referencia para las futuras calibraciones que se realicen con este instrumento con el objeto de aplicarse formalmente en la investigación científica.

Otras posiciones muy cercanas a la posición de 0.67 mm también logran que en todas las zonas del espectro se tenga una medida en pixeles menor a 3.5. Véase Tabla 6.4.

L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	AA (pixeles)	AR (pixeles)	RA (pixeles)	RR (pixeles)	Centro (pixeles)	Promedio (pixeles)
0.65	0.64	0.71	3.020	1.946	2.927	2.136	2.967	2.599
0.65	0.64	0.72	3.100	1.961	2.896	2.106	3.026	2.618
0.66	0.62	0.72	3.100	1.954	2.918	2.188	2.936	2.619
0.62	0.66	0.73	3.076	1.910	2.954	2.085	2.984	2.602
0.6	0.7	0.72	3.099	1.990	2.910	1.950	2.770	2.544
0.67	0.67	0.67	3.030	1.960	2.990	2.140	2.750	2.574

Tabla 6.4. Algunas otras posiciones para los micrómetros que arrojan la medida de todas las zonas espectrales dentro de tolerancia.

ANÁLISIS ANOVA

Hasta ahora, se han expuesto los resultados de las pruebas preliminares y finales. De primera instancia, se puede afirmar, dado el análisis de los valores obtenidos *vs* los permitidos que el mecanismo tiene buen diseño en lo respectivo a repetitividad, característica de suma importancia para poder usarse confiablemente.

Con objetivo de investigar más profundamente el aspecto de la repetitividad se expone a continuación un análisis ANOVA, con el cual se identificará si existe variación significativa entre los resultados que se obtuvieron tras efectuar las diversas repeticiones de las mediciones, según el experimento diseñado para las pruebas preliminares y finales. Es preciso señalar que solamente se muestran los resultados de tales análisis para efectos de esta tesis.

Análisis ANOVA para las pruebas preliminares

A partir de los datos de la Tabla 6.1, se obtienen los resultados siguientes tras aplicarles un análisis ANOVA. Ver Tabla 6.5.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Filas	3.9934625	4	0.998365625	5.955791609	0.003928586	3.00691728
Columnas	0.47868	4	0.11967	0.713896356	0.594481752	3.00691728
Error	2.68207	16	0.167629375			
Total	7.1542125	24				

Tabla 6.5. Análisis ANOVA para las pruebas preliminares.

En la Tabla anterior, se tienen dos estadísticos de variación F: cuyo origen es entre filas y entre columnas. Dado el acomodo de la Tabla 6.1, que fue de donde se aplicó la herramienta estadística y la naturaleza de este experimento, lo que interesa es medir la variación entre las columnas, que representan la variación entre las mediciones de la 1 a la 4. Ahora bien, se tienen por esta misma razón

dos valores críticos para F, que resultan de aplicar la teoría estadística de la “distribución F o de Fisher” del percentil 95, ver [69] y [70]. De estos valores críticos el que interesa es el valor crítico para las columnas, el cual al ser comparado con el valor F, se podrá inferir si existe variación entre el factor columnas o la variación es insignificante y se puede despreciar.

En efecto, si $F \leq F_{\text{crítico}}$ se puede concluir que la variación no es significativa entre el factor que representen las columnas; por lo tanto, existe repetividad en el experimento.

Entonces, para los resultados obtenidos en la Tabla 6.5, al comparar $F = 0.71$ y $F_{\text{crítico}} = 3.00$, se verifica que la hipótesis de que no hay variación significativa en el experimento es aceptada, luego entonces, el mecanismo repite aceptablemente.

Análisis ANOVA para las pruebas finales I

Para las pruebas finales I, el análisis ANOVA se realizó, de una manera más estricta estudiando el comportamiento del mecanismo por partes, es decir, analizando la varianza individual que existe entre las variables independientes X_v , Y_v , $d_{\text{real}_{\text{centro}}}$, y la resolución. Todo ello para los tres micrómetros y para cada punto de la variable dependiente Avance. Así que al adecuar la Tabla 6.2 para las diferentes posiciones de la variable dependiente de los tres micrómetros se obtienen las tablas de ANOVA enseguida mostradas.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.00368667	2	0.00184333	0.88041748	0.42617768	3.35413083
Dentro de los grupos	0.05653	27	0.0020937			
Total	0.06021667	29				

Tabla 6.6. ANOVA para X_v , con los tres micrómetros a 250 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.00170667	2	0.00085333	0.26756474	0.76724604	3.35413083
Dentro de los grupos	0.08611	27	0.00318926			
Total	0.08781667	29				

Tabla 6.7. ANOVA para Yv, con los tres micrómetros a 250 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1.8303E-06	2	9.1517E-07	0.24538378	0.7841301	3.35413083
Dentro de los grupos	0.0001007	27	3.7295E-06			
Total	0.00010253	29				

Tabla 6.8. ANOVA para dreal, con los tres micrómetros a 250 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	3.3141E-06	2	1.6571E-06	0.0318232	0.96871411	3.35413083
Dentro de los grupos	0.00140591	27	5.2071E-05			
Total	0.00140923	29				

Tabla 6.9. ANOVA para la resolución, con los tres micrómetros a 250 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.00028667	2	0.00014333	0.07321226	0.92958739	3.35413083
Dentro de los grupos	0.05286	27	0.00195778			
Total	0.05314667	29				

Tabla 6.10. ANOVA para Xv, con los tres micrómetros a 500 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.00122	2	0.00061	0.03281792	0.96775329	3.35413083
Dentro de los grupos	0.50186	27	0.01858741			
Total	0.50308	29				

Tabla 6.11. ANOVA para Yv, con los tres micrómetros a 500 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2.0465E-05	2	1.0233E-05	0.58657289	0.56316246	3.35413083
Dentro de los grupos	0.00047101	27	1.7445E-05			
Total	0.00049147	29				

Tabla 6.12. ANOVA para dreal, con los tres micrómetros a 500 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	5.2717E-06	2	2.6358E-06	0.04312639	0.95785617	3.35413083
Dentro de los grupos	0.00165022	27	6.1119E-05			
Total	0.00165549	29				

Tabla 6.13. ANOVA para la resolución, con los tres micrómetros a 500 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.00372667	2	0.00186333	0.88934064	0.42262366	3.35413083
Dentro de los grupos	0.05657	27	0.00209519			
Total	0.06029667	29				

Tabla 6.14. ANOVA para X_v , con los tres micrómetros a 750 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.00456	2	0.00228	0.93004986	0.40680862	3.35413083
Dentro de los grupos	0.06619	27	0.00245148			
Total	0.07075	29				

Tabla 6.15. ANOVA para Y_v , con los tres micrómetros a 750 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	3.6192E-05	2	1.8096E-05	1.74606654	0.19358666	3.35413083
Dentro de los grupos	0.00027982	27	1.0364E-05			
Total	0.00031602	29				

Tabla 6.16. ANOVA para dreal, con los tres micrómetros a 750 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	3.057E-06	2	1.5285E-06	0.34381291	0.71212074	3.35413083
Dentro de los grupos	0.00012003	27	4.4457E-06			
Total	0.00012309	29				

Tabla 6.17. ANOVA para la resolución, con los tres micrómetros a 750 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.03520667	2	0.01760333	1.42502923	0.25801847	3.35413083
Dentro de los grupos	0.33353	27	0.01235296			
Total	0.36873667	29				

Tabla 6.18. ANOVA para Xv, con los tres micrómetros a 1000 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.06878	2	0.03439	2.15766603	0.1351111	3.35413083
Dentro de los grupos	0.43034	27	0.01593852			
Total	0.49912	29				

Tabla 6.19. ANOVA para Yv, con los tres micrómetros a 1000 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.06878	2	0.03439	2.15766603	0.1351111	3.35413083
Dentro de los grupos	0.43034	27	0.01593852			
Total	0.49912	29				

Tabla 6.20. ANOVA para dreal, con los tres micrómetros a 1000 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	7.1014E-05	2	3.5507E-05	2.16117261	0.13470327	3.35413083
Dentro de los grupos	0.0004436	27	1.643E-05			
Total	0.00051461	29				

Tabla 6.21. ANOVA para la resolución, con los tres micrómetros a 1000 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.03858667	2	0.01929333	2.02063615	0.15213438	3.35413083
Dentro de los grupos	0.2578	27	0.00954815			
Total	0.29638667	29				

Tabla 6.22. ANOVA para Xv, con los tres micrómetros a 1250 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.05978	2	0.02989	0.60806046	0.5516926	3.35413083
Dentro de los grupos	1.32722	27	0.0491563			
Total	1.387	29				

Tabla 6.23. ANOVA para Yv, con los tres micrómetros a 1250 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.00013845	2	6.9223E-05	2.15542945	0.13537191	3.35413083
Dentro de los grupos	0.00086712	27	3.2116E-05			
Total	0.00100557	29				

Tabla 6.24. ANOVA para dreal, con los tres micrómetros a 1250 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	4.4553E-05	2	2.2276E-05	0.68573697	0.51227738	3.35413083
Dentro de los grupos	0.0008771	27	3.2485E-05			
Total	0.00092165	29				

Tabla 6.25. ANOVA para la resolución, con los tres micrómetros a 1250 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.00084	2	0.00042	0.2480315	0.78423865	3.88529383
Dentro de los grupos	0.02032	12	0.00169333			
Total	0.02116	14				

Tabla 6.26. ANOVA para Xv, con los tres micrómetros a 1500 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.07749333	2	0.03874667	3.25602241	0.07419269	3.88529383
Dentro de los grupos	0.1428	12	0.0119			
Total	0.22029333	14				

Tabla 6.27. ANOVA para Yv, con los tres micrómetros a 1500 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1.9616E-05	2	9.8082E-06	0.4197186	0.66651749	3.88529383
Dentro de los grupos	0.00028042	12	2.3368E-05			
Total	0.00030004	14				

Tabla 6.28. ANOVA para dreal, con los tres micrómetros a 1500 μm .

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	3.6037E-05	2	1.8018E-05	3.24504354	0.0747229	3.88529383
Dentro de los grupos	6.6631E-05	12	5.5526E-06			
Total	0.00010267	14				

Tabla 6.29. ANOVA para la resolución, con los tres micrómetros a 1500 μm .

Avance	Variables	F	Valor crítico para F
Para 250 μm	Xv	0.880	3.354
	Yv	0.268	3.354
	dreal	0.245	3.354
	Resolución	0.032	3.354
Para 500 μm	Xv	0.073	3.354
	Yv	0.033	3.354
	dreal	0.587	3.354
	Resolución	0.043	3.354
Para 750 μm	Xv	0.889	3.354
	Yv	0.930	3.354
	dreal	1.746	3.354
	Resolución	0.344	3.354
Para 1000 μm	Xv	1.425	3.354
	Yv	2.158	3.354
	dreal	2.158	3.354
	Resolución	2.161	3.354
Para 1250 μm	Xv	2.021	3.354
	Yv	0.608	3.354
	dreal	2.155	3.354
	Resolución	0.686	3.354
Para 1500 μm	Xv	0.248	3.885
	Yv	3.256	3.885
	dreal	0.420	3.885
	Resolución	3.245	3.885

Tabla 6.30. Condensado de análisis ANOVA para las pruebas finales I.

Para una mejor apreciación, se ha elaborado una tabla con los análisis ANOVA condensados. Véase Fig. 6.30.

En dicha tabla se puede verificar la prueba de la hipótesis de varianza tal como se efectuó con el análisis de las pruebas preliminares; de tal suerte que al comparar la F con el valor crítico $F_{crítico}$, para todos los valores de F siempre se tiene un $F_{crítico}$ mayor a ellos, por lo que se infiere con plena confiabilidad que no existe variación entre los valores que se están comparando, es decir entre las repeticiones de los tres micrómetros. Por lo tanto, de nueva cuenta, se concluye que el mecanismo garantizará repetitividad.

Análisis ANOVA para las pruebas finales II

Para llevar a efecto el análisis ANOVA para las pruebas finales II, se ha procedido de manera análoga a las pruebas preliminares, donde a partir de la Tabla 6.3 se han ordenado los datos para aplicar la herramienta estadística a las cinco posiciones que hacen alineación y foco adecuados y que tuvieron repeticiones durante las iteraciones que el proceso de este experimento implicó. Resultado de esto fue lo expresado en las siguientes tablas.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Filas	14.6579783	4	3.66449458	178.698519	1.3981E-10	3.25916673
Columnas	0.0689946	3	0.0229982	1.12150371	0.37903874	3.49029482
Error	0.2460789	12	0.02050658			
Total	14.9730518	19				

Tabla 6.31. ANOVA para las pruebas finales II con los micrómetros en 0.63 mm.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Filas	6.93642773	4	1.73410693	286.239707	1.1525E-08	3.83785335
Columnas	0.01001013	2	0.00500507	0.82615944	0.47188188	4.45897011
Error	0.04846587	8	0.00605823			
Total	6.99490373	14				

Tabla 6.32. ANOVA para las pruebas finales II con los micrómetros en 0.64 mm.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Filas	5.6259024	4	1.4064756	369.886678	4.1646E-09	3.83785335
Columnas	0.0287644	2	0.0143822	3.78235085	0.06979057	4.45897011
Error	0.0304196	8	0.00380245			
Total	5.6850864	14				

Tabla 6.33. ANOVA para las pruebas finales II con los micrómetros en 0.65 mm.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Filas	2.1615086	4	0.54037715	66.3352811	0.00065511	6.38823291
Columnas	0.0076729	1	0.0076729	0.94190507	0.38674565	7.70864742
Error	0.0325846	4	0.00814615			
Total	2.2017661	9				

Tabla 6.34. ANOVA para las pruebas finales II con los micrómetros en 0.67 mm.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	2.0624085	3	0.6874695	130.132725	0.00112794	9.27662815
Columnas	0.0129605	1	0.0129605	2.45332366	0.21525668	10.1279645
Error	0.0158485	3	0.00528283			
Total	2.0912175	7				

Tabla 6.35. ANOVA para las pruebas finales II con los micrómetros en 0.72 mm.

Posición de los micrómetros	F	Valor crítico para F
Para 0.63 mm	1.122	3.490
Para 0.64 mm	0.826	4.459
Para 0.65 mm	3.782	4.459
Para 0.67 mm	0.942	7.709
Para 0.72 mm	2.453	10.128

Tabla 6.36. Condensado de análisis ANOVA para las pruebas finales II.

Como se puede observar en el condensado de la Tabla 6.36, en todo momento el estadístico F es menor a su valor crítico $F_{crítico}$, por lo que la hipótesis de que no existe variación significativa es aceptada. Una vez más a través de este análisis queda comprobada la repetitividad del mecanismo.

Para finalizar este apartado, a continuación se muestran los patrones del espectro de Th-Ar que forman parte del resultado final de las pruebas preliminares y finales.



Fig. 6.5. Valores en pixeles logrados en las diferentes zonas con el mecanismo de alineación y enfoque, en las pruebas preliminares (Columna 1: 2 mm; Columna 2: 3 mm y columna 3: 0.25 mm) y en las finales (todas las columnas a 0.67mm).

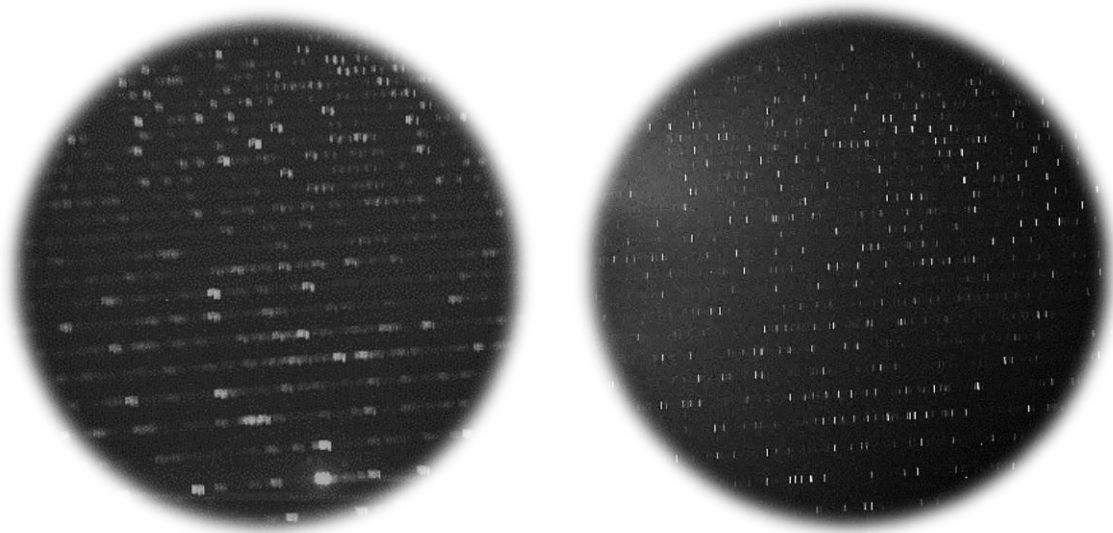


Fig. 6.6. Izquierda, imagen desalineada y desenfocada. Derecha, imagen alineada y enfocada con el mecanismo de alineación y enfoque.

6.2. COSTO

El costo invertido para realizar sin considerar costo por concepto de ingeniería este proyecto se detalla en la Tabla 6.37.

Concepto	Monto (MXP)
Micrómetros o sensores electrónicos	\$ 6,000.00
Aluminio AluMold	\$ 10,000.00
Acero Cold Rolled	\$ 7,000.00
Nylamid	\$ 200.00
Resortes	\$ 100.00
Tornillería	\$ 200.00
Tratamientos anticorrosivos	\$ 1,000.00
Mano de obra por manufactura	\$ 25,000.00
Total sin IVA	\$ 49,500.00

Tabla 6.37. Costo del mecanismo de alineación y enfoque.

7. CONCLUSIONES

7.1. CONCLUSIONES GENERALES

Dados los resultados de las pruebas, se enuncian las siguientes conclusiones:

1. El mecanismo ha sido diseñado y fabricado según las especificaciones del usuario final, es decir, el sector científico astronómico del Instituto de Astronomía de la UNAM. Tales especificaciones han sido satisfechas y aprobadas por el personal de instrumentación científica del mismo instituto.
2. Se ha efectuado el proceso de diseño mecánico, se han realizado prototipos de función crítica y se ha efectuado la manufactura del mecanismo en los tiempos programados dentro de su respectiva tolerancia.
3. El mecanismo ha sido probado directamente en el espectrógrafo Echelle en dos fechas de ingeniería programadas y ha alcanzado la alineación y enfoque óptimos: el ancho de cada línea espectral mostrada en pantalla es de un promedio de 3.0 pixeles siendo el permisible de 3.5.
4. De acuerdo con las pruebas realizadas y mediante el análisis de los resultados arrojados por los experimentos se concluye que el mecanismo tiene una repetitividad aceptable.
5. La resolución angular que brinda el mecanismo es de $0.34^\circ/\text{mm}$, lo cual es un parámetro aceptable para alinear y enfocar las lentes.
6. De acuerdo con las pruebas realizadas y mediante la observación hecha hacia los usuarios, así como mediante sus comentarios y realimentación se puede afirmar que el mecanismo es de fácil ensamble, mantenimiento y uso, características que aunadas a la repetitividad, hacen del mecanismo un producto robusto.
7. Las teorías de diseño en ingeniería ha sido aplicadas y sus principios han sido de suma utilidad para este proyecto al empelarse bajo un criterio juicioso, por lo que se concluye esta tesis reconociendo su importancia

para el desarrollo de productos ingenieriles que contribuyan al desarrollo de la ciencia y la tecnología de nuestro país.

7.2. SUGERENCIAS PARA TRABAJO FUTURO

El mecanismo actualmente se encuentra integrado y funcionando en el telescopio de 2.1 m del Observatorio Astronómico Nacional de la UNAM; no obstante, como todo producto de ingeniería, es susceptible de ser mejorado continuamente con el objetivo de incrementar su eficiencia. Así que bajo esta premisa se enuncias algunas sugerencias que se podrían llevar a cabo como mejora continua al producto.

- Por lo observado con los CCD's Marconi II y Marconi IV, el proveedor de los mismos no garantiza una estandarización de tales dispositivos, por lo que será necesario calibrar para cada diferente modelo que se adquiriera en el futuro. Para llevar a cabo este proceso de alineación y enfoque de manera más sencilla, y por comodidad para el usuario, se pueden adquirir los dispositivos inalámbricos complementarios de los sensores electrónicos que transmiten los datos de la lectura directamente a un archivo electrónico de datos, para lo cual sería necesario desarrollar ese programa-interfaz entre el dispositivo y el usuario. La ventaja de esto radica en que el astrónomo que calibraría el CCD encontrando su posición de alineación y enfoque llevaría el historial y el control de los movimientos realizados a cada una de los micrómetros *ipso facto*. Para llevar a efecto esta acción consúltense los manuales y propiedades del sensor electrónico directamente del fabricante.
- Pese a que no existen problemas de deformación debida a las cargas en las placas móvil y fija, se recomienda de ser necesaria su re-manufactura, disminuir el diámetro donde se aloja el criostato unos 3 mm con el objetivo de engrosar la pared vecina al instrumento Echelle. La ventaja de esto es que aumentaría la rigidez de esos elementos además de facilitar el movimiento relativo XY entre placas.
- Se recomienda seguir las instrucciones del manual siempre que deba instalarse y/o desinstalarse el mecanismo del espectrógrafo siguiendo a plena observancia los cuidados respectivos.

- Se sugiere fabricar la funda para evitar la entrada de luz al CCD con esponja de poliuretano negra y suave con el objetivo de introducir fácilmente la cánula de inyección de dióxido de carbono y evitar el empañamiento.
- Se sugiere, en caso de que se note un juego excesivo en los barrenos roscados de las partes de aluminio, introducir en ellos insertos tipo *helicol*.
- La resolución de los tornillos de alta sensibilidad con perilla exceden a la de los micrómetros, por lo que se recomienda como mejora continua, para incrementar una mayor resolución en éstos, la adquisición de otros micrómetros digitales que brinden una resolución de 0.001 mm.
- Finalmente, a partir del análisis cinemático para enfocar y alinear este mecanismo, se sugiere adecuarlo, optimizarlo o rediseñarlo para que tenga la capacidad para sujetar criostatos con diferente geometría.

REFERENCIAS

- [1] Hecht. (2003). *Óptica*. España: Addison Wesley.
- [2] Galilei Galileo. (1610). *Sidereus Nuncius*. Italia: Sin dato de editorial.
- [3] Malacara, D. (1998). *Óptica Tradicional y Moderna*. México D. F.: Fondo de Cultura Económica, Colección: La ciencia para todos.
- [4] Aveni A.F. (2001). *Skywatchers: A Revised and Updated Version of Skywatchers of Ancient Mexico*. Austin, Texas: University of Texas Press.
- [5] Rodríguez L.F. (2000). *Las Ciencias Exactas en México*. México D.F.: Colección Biblioteca Mexicana, Fondo de Cultura Económica, México: “La astronomía en México: El pasado reciente y los retos de futuro”.
- [6] Peimbert M. y Rodríguez L.F. (2008). *Enciclopedia de las Ciencias en México*. México: Universidad Autónoma Metropolitana, México, en prensa: “Astronomía”.
- [7] Ávila N., Galindo Trejo J., Moreno Corral M.A. y Podeva Ricalde A. (2001). *Breve historia de la astronomía en México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [8] PPişmiş P. y Cruz-González G. (1998). *Reminissenses in the life of Paris Pişmiş: a woman astronomer*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [9] Bartolucci, J. (2000). *La modernización de la ciencia en México. El caso de los astrónomos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [10] Poveda A. (1995). *Retos y perspectivas de la ciencia en México*. México: Academia Mexicana de Ciencias: “Con los pies en la tierra y la cabeza en el cielo: algunas enseñanzas derivadas del desarrollo de la astronomía en México”.
- [11] Sin dato de autor. (2009). *Breve historia del OAN*. Febrero 5, 2013, de Instituto de Astronomía, UNAM Sitio web: <http://www.astrossp.unam.mx/>
- [12] Levine and D. Chakrabarty. (1994). *How to Use The San Pedro Martir REOSC Echelle Spectrograph*. TECHNICAL REPORT MU-94-04. Instituto de Astronomía, UNAM.
- [13] J. Echevarría, Robert Cannon Smith, R. Costero, S. Zharikov and R. Michel. (2008). *High-dispersion absorption-line spectroscopy of AE Aqr*. Mon. Not. R. Astron. Soc. 387, 1563–1574.
- [14] J. Echevarría, Eduardo de la Fuente and Rafael Costero. (2008). *U GEMINORUM: A TEST CASE FOR ORBITAL PARAMETER DETERMINATION*. The Astronomical Journal, 134:262Y273, 2007 July.
- [15] G. Sierra, J. Echevarría y S. Zharikov. (2012). *Informe de las actividades realizadas en el Echelle y propuesta para el 2012*. Noviembre 20, 2012, de Instituto de Astronomía, UNAM Sitio web: <http://www.astroscu.unam.mx/~alan/capi/2012a/solicitudes/mesa-reosc.pdf>
- [16] Sin dato de autor. (2013). *Microscopio óptico*. Enero 3, 2013, de Wikipedia Sitio web: http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_%C3%B3ptico
- [17] Fabricante. (2013). *Enfocadores*. Mayo 5, 2013, de Telescopiomanía Sitio web: <http://www.telescopiomania.com/es/enfocadores-crayford/2626-enfocador-crayford-steeltrack-3-baader-2957110-para-refractor.html#>
- [18] Fabricante. (2010). *Lenses*. Junio 7, 2013, de Tamron-usa Sitio web: http://www.tamron-usa.com/lenses/technology_spanish.asp
- [19] Fabricante. (2011). *Nuevo TAMRON 14-150mm F/3.5-5.8 Di III para cámaras Micro Cuatro Tercios*. Junio 7, 2013, de Tamron Sitio web: <http://fotokblog.es/nuevo-tamron-14-150mm-f3-5-5-8-di-iii-para-camaras-micro-cuatro-tercios/>

- [20] Fabricante. (2014). *Apple está trabajando en el mejoramiento de la cámara del iPhone*. Septiembre 14, 2014, de Mc Servi Sitio web: <http://macservi.blogspot.mx/2014/01/apple-esta-trabajando-en-el.html>
- [21] Alejandro Farah Simón. (2008). *Diseño y fabricación optomecánicos en la instrumentación astronómica : OSIRIS*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Mecánica. Ciudad universitaria, UNAM: Sin dato de editorial.
- [22] Rogelio López y Ricardo Granados. (2014). *Reverse and concurrent engineering applied of a high resolution equipment BERKUT for one meter class telescopes*. SPIE, 9147-144, 11. Agosto 7, 2014, De Journal SPIE 2014 Base de datos.
- [23] Ricardo Granados y Rogelio López. (2014). *Optomecatronic design and integration of a high resolution equipment Berkut to the 1-meter class telescopes*. SPIE, 91473R, 11. Agosto 25, 2014, De Journal SPIE Base de datos.
- [24] Bhaskar Dasgupta and T.S. Mruthyunjaya. (2010). *The Stewart platform manipulator: a review*. USA: Springer.
- [25] René Graf and Rüdiger Dillmann. (2011). *Acceleration Compensation Using a Stewart Platform on a Mobile Robot*. Germany: Torus.
- [26] P. Fajardo and V. Rey-Bakaikoa. (1994). *Control of six degree-of-freedom parallel manipulators for synchrotron radiation applications*. European Synchrotron Radiation Facility, 38043, 220. Junio 28, 2013, De Cedex Base de datos.
- [27] Victor J. González Villela. (2011). *Kinematics and Tip-Over Stability Analysis for a hybrid serial-parallel mobile manipulator*. Departamento de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Paper IMECE2011-64322, SD. Julio 9, 2013, De IMECE2011 Base de datos.
- [28] Fabricante. (2004). *Types of Mechatronics Series*. Julio 11, 2013, de automation-dfw Sitio web: [http://www.automation-dfw.com/pdf_iko/iko05-mechatronic-1556\(2\)E_introduction.pdf](http://www.automation-dfw.com/pdf_iko/iko05-mechatronic-1556(2)E_introduction.pdf)
- [29] A. Horacio Gutiérrez Osorio, U. Estrada López, S. R. S. Vilchis Martínez, A. D. Arellano Carmona, V. Borja Ramírez. (2013). *Desarrollo de un equipo auxiliar para rehabilitación de pacientes con lesiones en las rodillas de bajo costo*. MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, 25 al 27 DE SEPTIEMBRE, 2013 PACHUCA, HIDALGO, MÉXICO, Total páginas. Septiembre 28, 2013, De SOMIM Base de datos.
- [30] Collins. (2000). *Mechanical Design of Machine Elements and Machines*. USA: John Wiley & Son.
- [31] Norton, Robert L. (1995). *Diseño de maquinaria : Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. México: McGraw-Hill.
- [32] Karl T. Ulrich and Steven D. Eppinger. (2012). *Product Design and Development*. New York: McGraw-Hill.
- [33] G. Pahl and W. Beitz; J. Feldhusen and K. -H. Grote. (2007). *Engineering Design, A Systematic Approach*. London: Springer.
- [34] Gordon L. Gregg. (1973). *The Science of Design*. U. K: Cambridge University Press.
- [35] Michael French. (1994). *An annotated list of design principles*. U. K: Lancaster University.
- [36] Michael French. (1994). *Invention and Evolution. Design in Nature and Engineering*. U.K: Cambridge University Press.
- [37] Guillermo José Aguirre Esponda. (2011). *Un enfoque apodíctico del diseño*. México: IA.
- [38] Alejandro Ramírez Reivich and Michael French. (Sin dato de fecha). *Towards a Comparative Study of Pneumatic Quarter-Turn Actuators*. SD, Volumen SD, 10. Julio 15, 2013, De Lancaster University Base de datos.

- [39] Borja, V., Ramírez-Reivich, A.C., López-Parra, M., Treviño, A., Equihua, L.F. (2012). International and multidisciplinary experiences in engineering courses at UNAM, Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE 2012-87224, Houston, Texas, November.
- [40] F. Velázquez-Villegas y S.D. Santillán-Gutiérrez. (2006). *Diseño óptimo evolutivo*. Centro de Diseño y Manufactura, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ing. invest. y tecnol. vol.7 no.3, 51. Septiembre 25, 2013, De CDMIT Base de datos.
- [41] Yoder, Paul. (2000). *Mounting Optics in Optical Instruments*. USA: SPIE.
- [42] Editorial. (2011). *Optomechanical Design and Engineering*. San Diego: SPIE.
- [43] Katie Schwetz and James H. Burgue. (2011). *Optomechanical Design and Analysis*. USA: SPIE.
- [44] Douglass Blanding. (1999). *Exact Constraint Machine Design Using Kinematic Principles*. USA: ASME.
- [45] K. J. Bathe. (1996). *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. USA: Prentice Hall, Inc.
- [46] M. Asghar Batti. (2005). *Fundamental Finite Element Analysis and Applications*. USA: Wiley.
- [47] Celigüeta Lizarza, Juan Tomás. (2011). *Método de los elementos finitos para análisis estructural*. España: TECNUM.
- [48] O. C. Zienkiewicz, FRS y R. L. Taylor. (1994). *El método de los elementos finitos*. España: Mc. Graw Hill.
- [49] Saeed Moaveni. (1999). *Finite Element Analysis Theory and Applications with ANSYS*. USA: Prentice Hall, Inc.
- [50] Ahmad, A. (1999). *Optomechanical Engineering Handbook*. USA: CRC Press LLC.
- [51] Hecht. (2003). *Óptica*. España: Addison Wesley.
- [52] Born y Wolf. (1970). *Principles of optics*. Oxford U.K: Pergamon.
- [53] Southall, James P. C. (James Powell Cocke). (1918). *Mirrors, prisms and lenses, a text-book of geometrical optics*. New York: The MCMILLAN Company.
- [54] Pantazis Mouroulis and John Macdonald. (1997). *Geometrical Optics and Optical Design*. U.K: Oxford University Press.
- [55] Hira N. Ahuja y Michael A. Walsh. (1988). *Ingeniería de costos y administración de proyectos*. México: Alfa-omega.
- [56] Nassir Sapag Chain y Reinaldo Sapag Chain. (1999). *Preparación y evaluación de proyectos*. Madrid: Iberoamericana.
- [57] Hayrettin Kardestuncer (editor jefe). (1987). *Finite Element Handbook*. México: McGraw-Hill.
- [58] Pilkey Walter, D. (1994). *Mechanics of structures: Variational and Computational Methods*. Florida, USA: CRC, Press, Inc.
- [59] Roger Timings. (2004). *Basic Manufacturing*. Oxford, U.K: Newnes.
- [60] Colin H. Simmons and Dennis E. Maguirre. (2004). *Manual of Engineering Drawing to British and International Standard*. Oxford, U.K: Newnes.
- [61] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Peason Education.
- [62] Mikell P. Groover. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, Procesos y Sistemas*. México: Prentice Hall.
- [63] E. Joseph Billo. (2007). *Excel for Scientists and Engineers*. USA: Wiley.
- [64] Murray R. Spiegel y Larry J. Stephens. (2009). *Estadística*. México: Mc. Graw Hill.

- [65] Juan M. Ibarrola. (2010). *Tipos de objetivos para Reflex: Guía teórica y práctica*. Julio 25, 2014, de Canon y Nikon Sitio web: <http://www.decamaras.com/CMS/content/view/861/61-Tipos-de-objetivos-para-Reflex-Guia-teorica-y-practica>
- [66] Don Fleming. (2005). *Depth of Field Table*. Junio 25, 2014, de DOFMaster Sitio web: <http://www.dofmaster.com/dofable.html>
- [67] Don Fleming. (2005). *Depth of Field Calculator*. Junio 29, 2014, de DOFMaster Sitio web: <http://www.dofmaster.com/dofjs.html>
- [68] Editor. (2009). *Lens Multiplication Factor Calculator*. Julio 25, 2014, de DPReview Sitio web: <http://www.digified.net/focallength/>
- [69] Montgomery, Runger and Hubele. (2006). *Engeneering Statistics*. USA: Wiley.
- [70] Douglas C. Montgomery. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley.

ANEXOS

I. HOJAS DE PROCESO DE MANUFACTURA DE LAS PIEZAS DEL MECANISMO

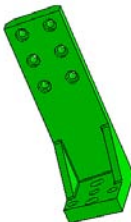
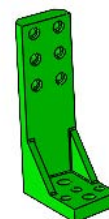
Hoja de proceso		
Denominación:	Columna 2	
Material:	AluMold®	
Dimensiones en bruto:	60 x 93 x 164 mm	
Tiempo estimado:	7 horas	
Página	1 de 1	
Op.	Descripción	Útiles y herramientas
1	Limpieza de material	Alcohol, thinner, agua, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
2	Colocación en cepillo de retorno rápido	Cepillo de retorno rápido, llaves métricas y estándar, buril, líquido lubricante
3	Careado de una cara mayor	
4	Cambio a fresadora	
5	Desbastado fino de cara refrentada	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
6	Desbaste fino de todas las caras	
7	Cambio a banco de trabajo	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos
8	Trazado en caras	
9	Colocación en fresadora	
10	Fresado	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
11	Cambio a banco de trabajo	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos, punto, martillo
12	Marcación de puntos para barrenos pasados de D=9 mm	
13	Marcación de puntos para barrenos roscados de D=1/2 inch	
14	Marcación de puntos para barrenos roscados de D=3/8 inch x 40	
15	Marcación de puntos para barrenos refrentados y pasados M6	
16	Cambio a taladro	Taladro, llave de portabrocas, brocas
17	Taladrado	
18	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
19	Roscado	Juego de machuelos
20	Cambio a banco de trabajo	Herramienta mata-filos
21	Eliminación de filos	
22	Comprobación general de calidad	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro
23	Limpieza	Alcohol, thinner, agua, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
24	Anodizado	Proveedor externo
25	Almacenaje	Espacio libre

Tabla 4.3. Proceso de manufactura de la Columna 2.

Hoja de proceso

Denominación: Columna 3
Material: AluMold®
Dimensiones en bruto: 60 x 93 x 164 mm
Tiempo estimado: 7 horas
Página 1 de 1

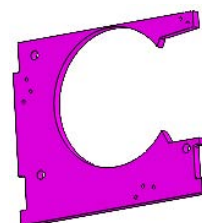


Op.	Descripción	Útiles y herramientas
1	Limpieza de material	Alcohol, thinner, agua, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
2	Colocación en cepillo de retorno rápido	Cepillo de retorno rápido, llaves métricas y estándar, buril, líquido lubricante
3	Careado de una cara mayor	
4	Cambio a fresadora	
5	Desbastado fino de cara refrentada	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
6	Desbaste fino de todas las caras	
7	Cambio a banco de trabajo	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos
8	Trazado en caras	
9	Colocación en fresadora	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
10	Fresado	
11	Cambio a banco de trabajo	
12	Marcación de puntos para barrenos pasados de D=9 mm	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos, punto, martillo
13	Marcación de puntos para barreno roscado fino de 1/2 inch	
14	Marcación de puntos para barreno roscado de D=3/8 inch x 40	
15	Marcación de puntos para barrenos refrentados y pasados M6	
16	Cambio a taladro	Taladro, llave de portabrocas, brocas
17	Taladrado	
18	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
19	Roscado	Juego de machuelos
20	Cambio a banco de trabajo	Herramienta mata-filos
21	Eliminación de filos	
22	Comprobación general de calidad	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro
23	Limpieza	Alcohol, thinner, agua, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
24	Anodizado	Proveedor externo
25	Almacenaje	Espacio libre

Tabla 4.4. Proceso de manufactura de la columna 3.

Hoja de proceso

Denominación: Placa móvil
Material: Acero Colled Rolled
Dimensiones en bruto: 347 x 239 x 19.05 mm
Tiempo estimado: 5 horas
Página 1 de 1



Op.	Descripción	Útiles y herramientas
1	Limpieza de material	Alcohol, thinner, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
2	Colocación en fresadora	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
3	Careado de un borde	
4	Careado de un borde opuesto al anterior	
5	Cambio a centro de maquinado	Porta-herramientas en centro de maquinado: fresas y brocas, mordazas, líquido refrigerante, CAD/CAM
6	Desbastado fino de superficie superior	Centro de maquinado, fresa
7	Desbaste fino para general agujero de R = 111.60 mm	Centro de maquinado, fresa
8	Voltear y rotar superficie	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos
9	Desbaste fino de superficie inferior	Porta-herramientas en centro de maquinado: fresas y brocas, mordazas, líquido refrigerante, CAD/CAM
10	Desbaste fino de los otros dos bordes	Centro de maquinado, fresa
11	Marcación de puntos para barrenos pasados de D=14 mm	Centro de maquinado, broca
12	Taladrado de barrenos pasados de D=14 mm	Centro de maquinado, broca
13	Marcación de puntos para barrenos roscado de M6	Centro de maquinado, broca
14	Taladrado de puntos para barrenos roscado de M6	Centro de maquinado, broca
15	Cambio a taladro	Taladro, llave de portabrocas, brocas
16	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
17	Roscado	Juego de machuelos
18	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
19	Rectificado	Proveedor externo
20	Comprobación general de calidad	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro
21	Limpieza	Aceite, thinner, estopas, pañuelos, franelas, aire comprimido
22	Pavonado	Proveedor externo
23	Almacenaje	Espacio libre

Tabla 4.5. Proceso de manufactura de la placa móvil.

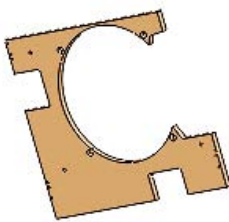
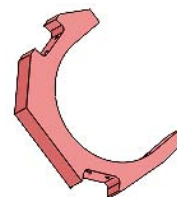
Hoja de proceso		
Denominación: Placa fija Material: Acero Colled Rolled Dimensiones en bruto: 347 x 239 x 12.7 mm Tiempo estimado: 5 horas Página 1 de 1		
Op.	Descripción	Útiles y herramientas
1	Limpieza de material	Alcohol, thinner, agua, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
2	Colocación en fresadora	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
3	Careado de un borde	
4	Careado de un borde opuesto al anterior	
5	Cambio a centro de maquinado	Porta-herramientas en centro de maquinado; fresas y brocas, mordazas, líquido refrigerante, CAD/CAM
6	Desbastado fino de superficie superior	Centro de maquinado, fresa
7	Desbaste fino para general agujero de R = 111.60 mm	Centro de maquinado, fresa
8	Voltear y rotar superficie	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos
9	Desbaste fino de superficie inferior	Porta-herramientas en centro de maquinado; fresas y brocas, mordazas, líquido refrigerante, CAD/CAM
10	Desbaste fino de los otros dos bordes	Centro de maquinado, fresa
11	Marcación de puntos para barrenos de M3	Centro de maquinado, broca
12	Taladrado de barrenos de M3	Centro de maquinado, broca
13	Marcación de puntos para barrenos roscado de M6	Centro de maquinado, broca
14	Taladrado de puntos para barrenos roscado de M6	Centro de maquinado, broca
13	Marcación de puntos para barrenos de M6 refrentados	Centro de maquinado, broca
14	Taladrado de puntos para barrenos de M6 refrentados	Centro de maquinado, broca
15	Cambio a taladro	Taladro, llave de portabrocas, brocas
16	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
17	Roscado	Juego de machuelos
18	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
19	Rectificado	Proveedor externo
20	Comprobación general de calidad	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro
21	Limpieza	Aceite, thinner, estopas, pañuelos, franelas, aire comprimido
22	Pavonado	Proveedor externo
23	Almacenaje	Espacio libre

Tabla 4.6. Proceso de manufactura de la Placa Fija.

Hoja de proceso

Denominación: Abrazadera Al (Abrazadera principal mayor)
Material: AluMold®
Dimensiones en bruto: 230 x 165 x 25.4 mm
Tiempo estimado: 6 horas
Página: 1 de 1



Op.	Descripción	Útiles y herramientas
1	Limpieza de material	Alcohol, thinner, agua, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
2	Colocación en fresadora	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
3	Careado de un borde	
4	Careado de un borde opuesto al anterior	
5	Cambio a centro de maquinado	Porta-herramientas en centro de maquinado: fresas y brocas, mordazas, líquido refrigerante, CAD/CAM
6	Desbastado fino de superficie superior	Centro de maquinado, fresa
7	Desbaste fino para general agujero de R = 83.50 mm	Centro de maquinado, fresa
8	Voltear y rotar superficie	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos
9	Desbaste fino de superficie inferior	Porta-herramientas en centro de maquinado: fresas y brocas, mordazas, líquido refrigerante, CAD/CAM
10	Desbaste fino de bordes	Centro de maquinado, fresa
11	Cambio a taladro	Taladro, llave de portabrocas, brocas
11	Marcación de puntos para barrenos roscado de M6	
13	Marcación de puntos para barrenos de M6 pasados	
14	Taladrado de puntos para barrenos de M6 pasados	
15	Taladrado	
16	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
17	Roscado	Juego de machuelos
18	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
20	Comprobación general de calidad	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro
21	Limpieza	Agua, thinner, estopas, pañuelos, franelas, aire comprimido
22	Anodizado	Proveedor externo
23	Almacenaje	Espacio libre

Tabla 4.7. Proceso de manufactura de la abrazadera principal mayor.

Hoja de proceso

Denominación: Abrazadera B1 (Abrazadera principal menor)

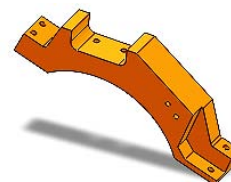
Material: AluMold®

Dimensiones en

bruto: 202.0 x 70.22 x 25.4 mm

Tiempo estimado: 4 horas

Página 1 de 1

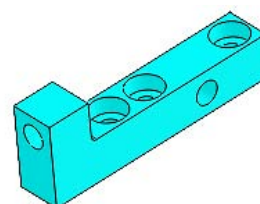


Op.	Descripción	Útiles y herramientas
1	Limpieza de material	Alcohol, thinner, agua, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
2	Colocación en fresadora	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
3	Careado de un borde	
4	Careado de un borde opuesto al anterior	
5	Cambio a centro de maquinado	Porta-herramientas en centro de maquinado: fresas y brocas, mordazas, líquido refrigerante, CAD/CAM
6	Desbastado fino de superficie superior	Centro de maquinado, fresa
7	Desbaste fino para general agujero de R = 83.50 mm	Centro de maquinado, fresa
8	Voltear y rotar superficie	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos
9	Desbaste fino de superficie inferior	Porta-herramientas en centro de maquinado: fresas y brocas, mordazas, líquido refrigerante, CAD/CAM
10	Desbaste fino de bordes	Centro de maquinado, fresa
11	Cambio a taladro	Taladro, llave de portabrocas, brocas
11	Marcación de puntos para barrenos roscado de M6	
13	Marcación de puntos para barrenos de M6 pasados	
14	Taladrado de puntos para barrenos de M6 pasados	
15	Taladrado	
16	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
17	Roscado	Juego de machuelos
18	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
20	Comprobación general de calidad	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro
21	Limpieza	Agua, thinner, estopas, pañuelos, franelas, aire comprimido
22	Anodizado	Proveedor externo
23	Almacenaje	Espacio libre

Tabla 4.8. Proceso de manufactura de la abrazadera principal menor.

Hoja de proceso

Denominación: Tope de placa móvil
Material: Acero Colled Rolled
Dimensiones en bruto: 12.7 x 20 x 45 mm
Tiempo estimado: 1.5 horas
Página 1 de 1

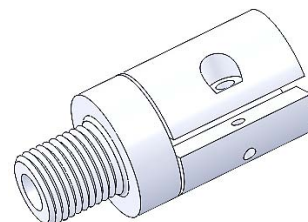


Op.	Descripción	Útiles y herramientas
1	Limpieza de material	Thiner, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
2	Colocación en cepillo de retorno rápido	Cepillo de retorno rápido, llaves métricas y estándar, buril, líquido lubricante
3	Careado de una cara mayor	
4	Cambio a fresadora	
5	Desbastado fino de cara refrentada	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
6	Desbaste fino de todas las caras	
7	Cambio a banco de trabajo	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos
8	Trazado en caras	
9	Colocación en fresadora	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
10	Fresado	
11	Cambio a banco de trabajo	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos, punto, martillo
13	Marcación de puntos para barrenado roscado de M5	
15	Marcación de puntos para barrenos refrentados y pasados M3	
16	Cambio a taladro	Taladro, llave de portabrocas, brocas
17	Taladrado	
18	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
19	Roscado	Juego de machuelos
20	Cambio a banco de trabajo	Herramienta mata-filos
21	Eliminación de filos	
22	Comprobación general de calidad	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro
23	Limpieza	Alceite, thiner, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
24	Anodizado	Proveedor externo
25	Almacenaje	Espacio libre

Tabla 4.9. Proceso de manufactura del tope de placa móvil.

Hoja de proceso

Denominación: Soporte de sensor electrónico
Material: AluMold®
Dimensiones en bruto: D=25.4 x 25 mm
Tiempo estimado: 2 horas
Página 1 de 1



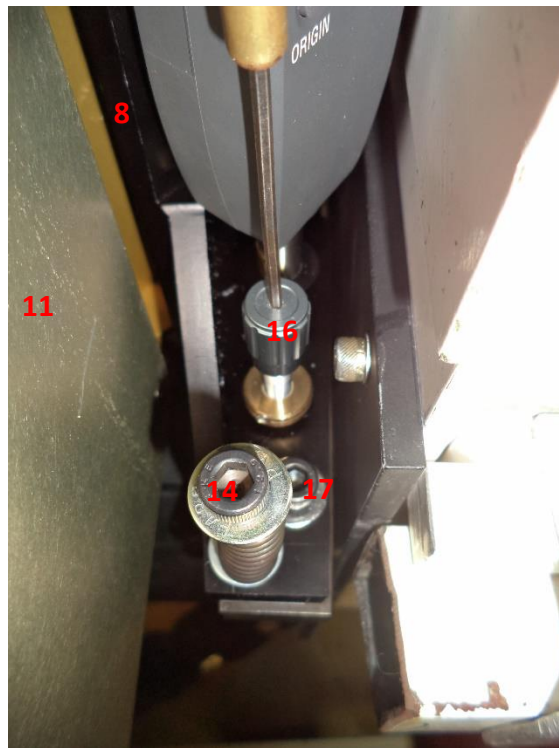
Op.	Descripción	Útiles y herramientas
1	Limpieza de material	Thiner, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
2	Colocación en torno	Cepillo de retorno rápido, llaves métricas y estándar, buril, líquido lubricante
3	Torneado hasta R=10 mm	
4	Torneado en zona correspondiente a la rosca fina de 1/2 pulgadas	
5	Roscado fino de 1/2 pulgadas	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
6	Matar filos	
7	Cambio a banco de trabajo	
8	Marcación de puntos para barreno pasado de R=3	
9	Marcación de puntos para barreno pasado de R=4.76	
10	Marcación de puntos para barreno pasado de R=4.76	
11	Marcación de puntos para barreno roscado de R=4.76	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro, pintura para trazos, punto, martillo
12	Cambio a taladro	
13	Taladrado	Taladro, llave de portabrocas, brocas
14	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
15	Roscado	Juego de machuelos
16	Cambio a banco de trabajo	
17	Eliminación de filos	Herramienta mata-filos
18	Cambio a fresadora	
19	Generación de ranura longitudinal	Fresadora, llaves métricas y estándar, fresas, líquido lubricante
20	Cambio a tornillo de banco	Tornillo de banco
21	Corte transversal	Segueta
22	Comprobación general de calidad	Trazador, nonio, escuadras, goniómetro, reglas, flexómetro
23	Limpieza	Alceite, thiner, estopa, pañuelos, franela, aire comprimido
24	Anodizado	Proveedor externo
25	Almacenaje	Espacio libre

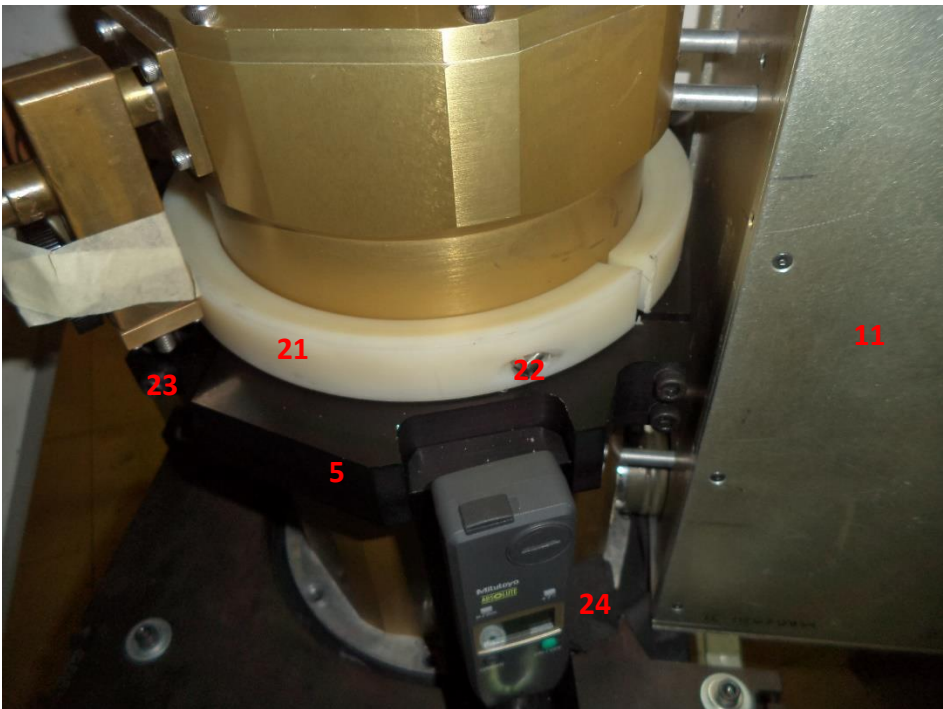
Tabla 4.10. Proceso de manufactura del soporte del sensor electrónico.

II. MANUAL

Lea cuidadosamente todo el manual antes de efectuar cualquier operación.

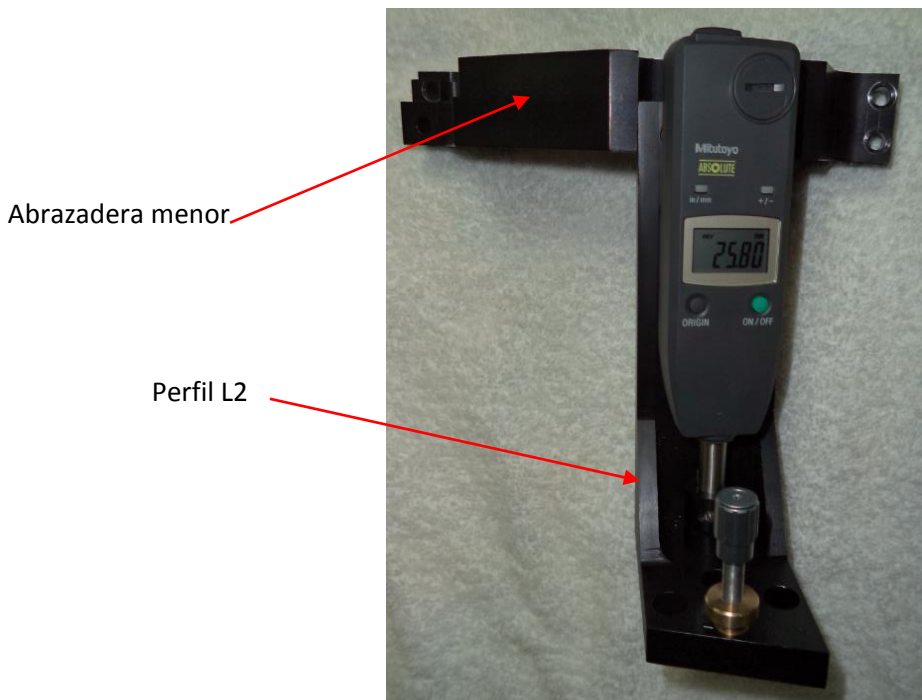
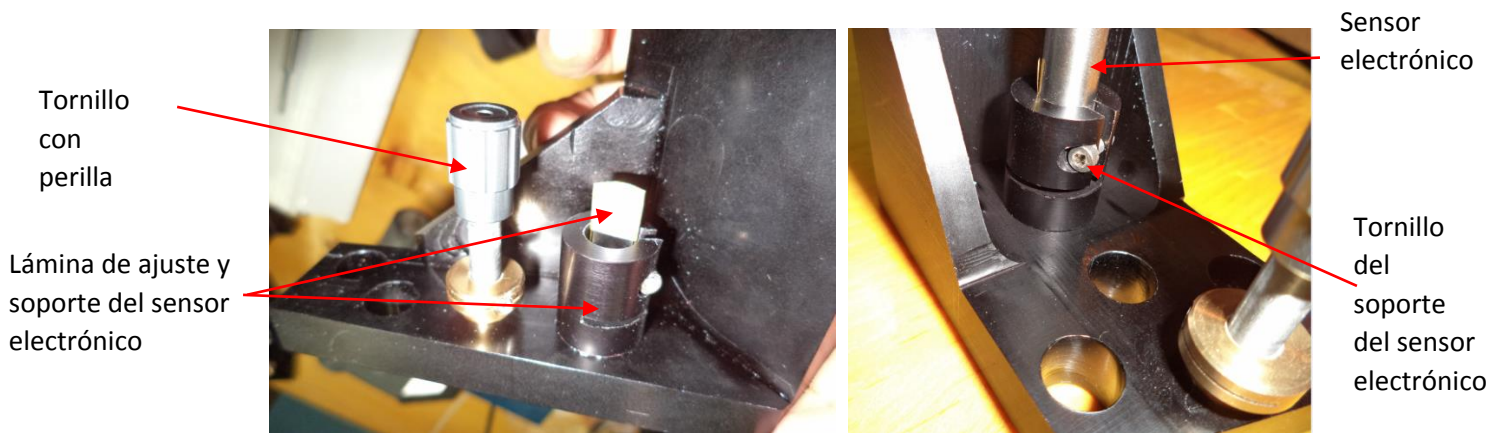
0. Identifíquense los elementos siguientes:



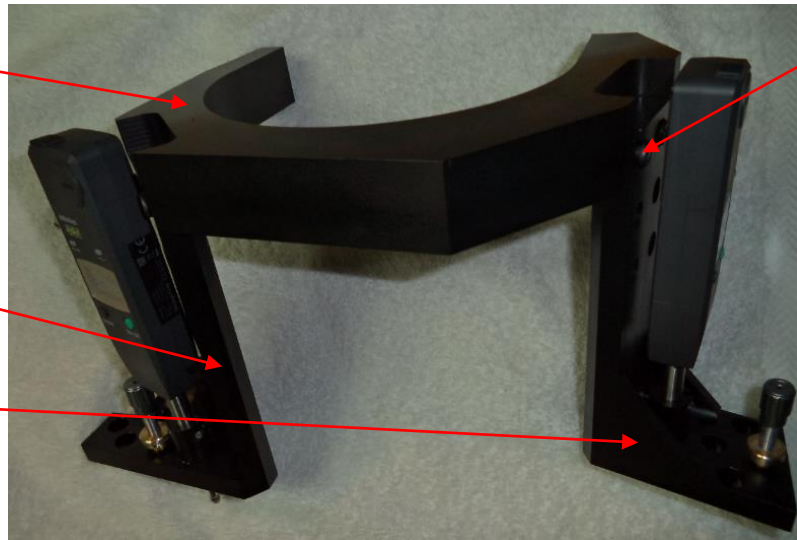


- 1) Echelle.
- 2) Cámara del Echelle.
- 3) Criostato.
- 4) Abrazadera mayor.
- 5) Abrazadera menor.
- 6) Perfil L3.
- 7) Perfil L2.
- 8) Perfil L1.
- 9) Placa superior móvil.
- 10) Placa inferior fija.
- 11) Caja de electrónica del CCD.
- 12) Sensor electrónico.
- 13) Tope para mover la placa superior móvil en X y Y.
- 14) Tornillo con resorte (M6, uno para cada perfil en L, con dos arandelas cada uno).
- 15) Soporte del sensor electrónico.
- 16) Tornillo con perilla (uno para cada perfil en L).
- 17) Tornillo de seguridad (M6, dos para perfiles L2 y L3, uno para L1. Cada uno de ellos con una arandela).
- 18) Tornillo de la placa superior móvil (M6, tres tornillos con dos arandelas cada uno).
- 19) Tornillo prisionero de los topes para mover la placa superior móvil en X y Y (M5, dos para cada tope).
- 20) Cinturón plástico flexible.
- 21) Cinturón plástico rígido.
- 22) Tornillo del cinturón plástico rígido (dos tornillos con cabeza plana con ranura).
- 23) Tornillo de unión de las abrazaderas (M6, tres de ellos de la misma longitud y el tercero un poco más corto).
- 24) Cubierta para evitar el paso de luz (cualquier manta negra).
- 25) Tornillo de unión de las abrazaderas con los perfiles en L (M6, dos tornillos para cada perfil en L, en total seis).

1. Armar los perfiles L1 y L3 con la abrazadera mayor.
2. Armar L2 con la abrazadera menor.
3. Colocar los tornillos con perilla.
4. Colocar los soportes de los sensores electrónicos en cada uno de los perfiles (L1, L2 y L3). Ver número escrito con marcador negro indeleble.
5. Colocar cada sensor electrónico en su soporte mediante las láminas de ajuste y su tornillo.



Abrazadera mayor

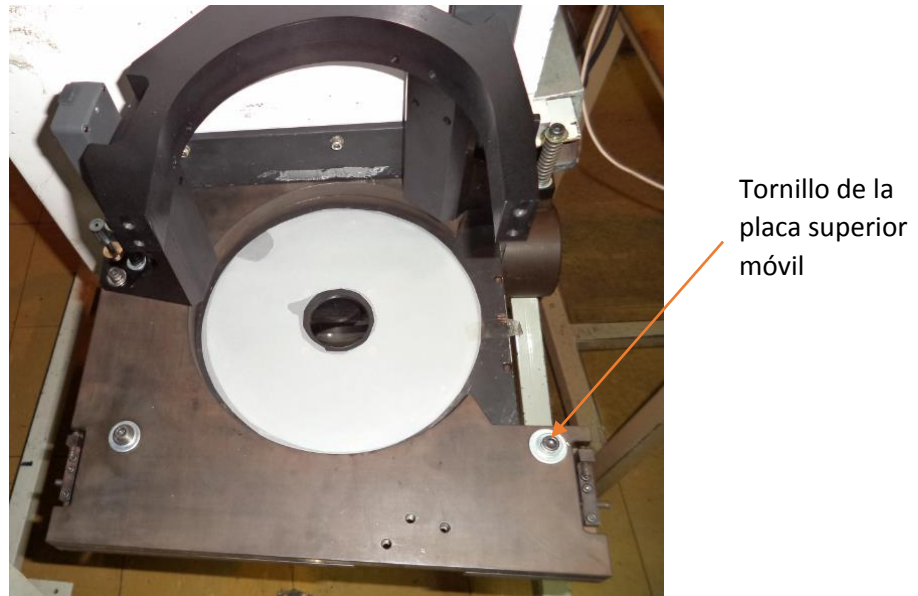


Tornillo de unión entre abrazaderas y perfiles.

Perfil L1

Perfil L3

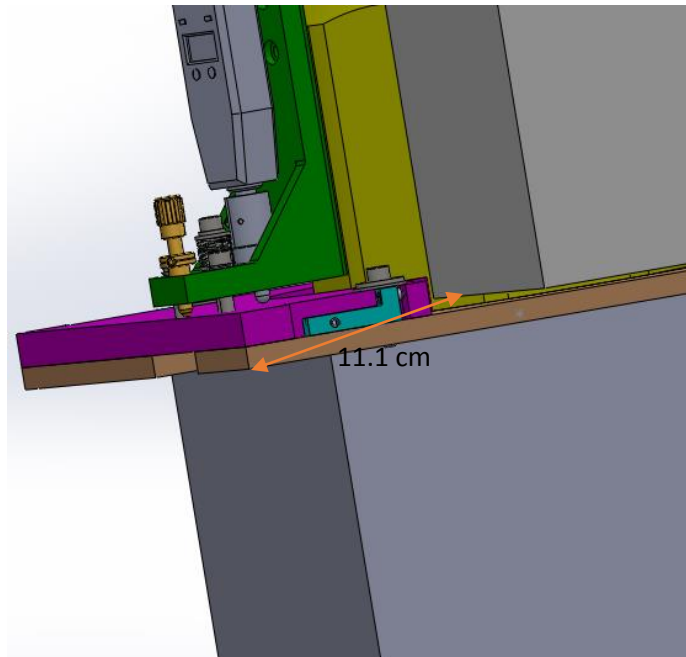
6. Colocar la placa inferior fija (la más delgada) sobre la cámara del Echelle mediante los cuatro tornillos M6.
7. Colocar la placa superior móvil (la de mayor espesor) sobre la placa inferior fija. Esto debe hacerse sin apretar demasiado los tres tornillos M6, hasta después del **proceso de centrado**.
8. Colocar la abrazadera mayor una vez ensamblada sobre la placa móvil efectuando una coincidencia de centros entre los barrenos de los perfiles en L (L1 y L3) y los barrenos de dicha placa y colocando los respectivos tornillos de seguridad M6, y el resorte. Para L3 son dos tornillos de seguridad y para L1 es sólo uno. Cuide de que el vástago de los sensores electrónicos no se lastime y toque perfectamente la superficie de la placa. Cuide también que el tornillo de perilla no sobresalga sobre la superficie inferior de cada perfil. Asegúrese de que la superficie inferior de los perfiles quede apoyada plenamente sobre la placa. En este paso no se deben apretar aún los tornillos de seguridad, sólo hasta que el **proceso de enfoque** esté terminado; incluso, dejarlos muy flojos para evitar que interfieran en el proceso de enfoque. El número de vueltas que debe aplicar al tornillo con resorte debe ser de alrededor de 20, asegurándose que quede más o menos rígido pero con la suficiente elasticidad. Como guía, usted apretará hasta que note que el resorte se empieza ligeramente a “pandear”.
9. Si se está trabajando con el Marconi IV, colocar las dos hojas de papel albanen sobre la cámara del Echelle. Si está trabajando con el Marconi II, omítase este paso.

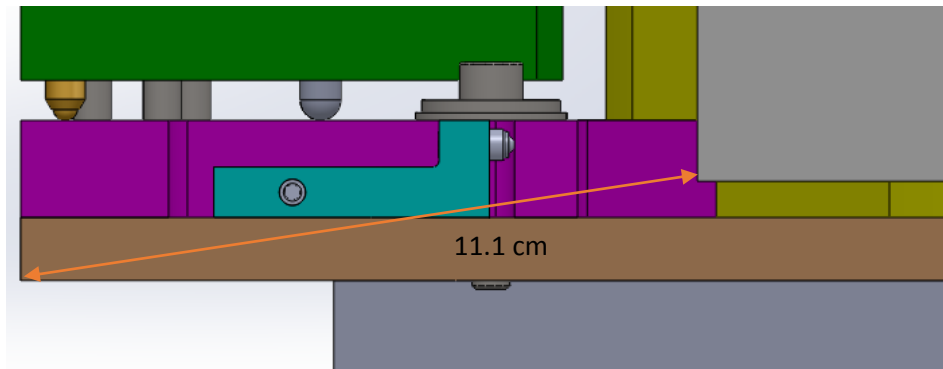


10. Colocar el cinturón plástico flexible en el interior de la abrazadera mayor.
11. Colocar el criostato sobre la cámara del Echelle.
12. Colocar la abrazadera menor una vez ensamblada sobre la placa móvil siguiendo la metodología de la abrazadera mayor (ver paso 7) y cuidando las recomendaciones.
13. Hacer coincidir las abrazaderas y apretarlas ligeramente mediante sus tornillos M6. Aún no apretar definitivamente.

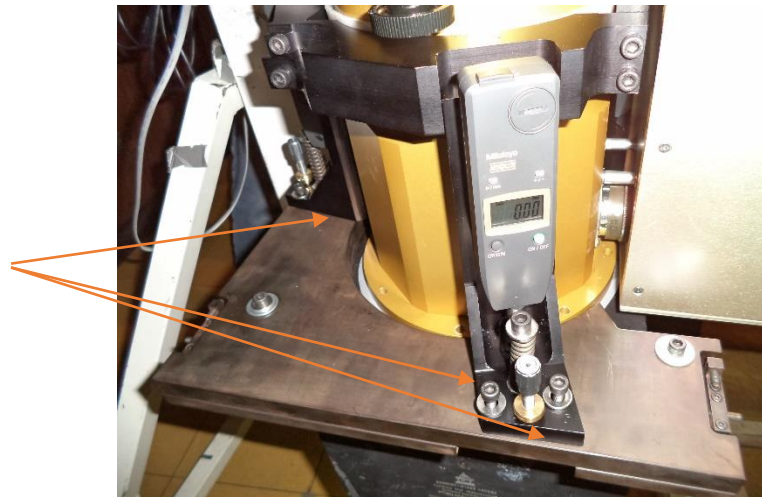


14. Oriente manualmente esta botella girándola y midiendo el borde de su caja electrónica 11.1 cm a partir de la esquina inferior de la placa inferior fija.
15. Apretar definitivamente las abrazaderas cuidando hacer torques suaves y alternos entre los lados de las abrazaderas para que exista un adecuado alineamiento entre ambas.
16. Para asegurarse de que están bien ensamblados los elementos hasta ahora, verificar las líneas diagonales marcadas sobre la placa superior móvil, las cuáles deben coincidir con los bordes inferiores de los perfiles L2 y L3.



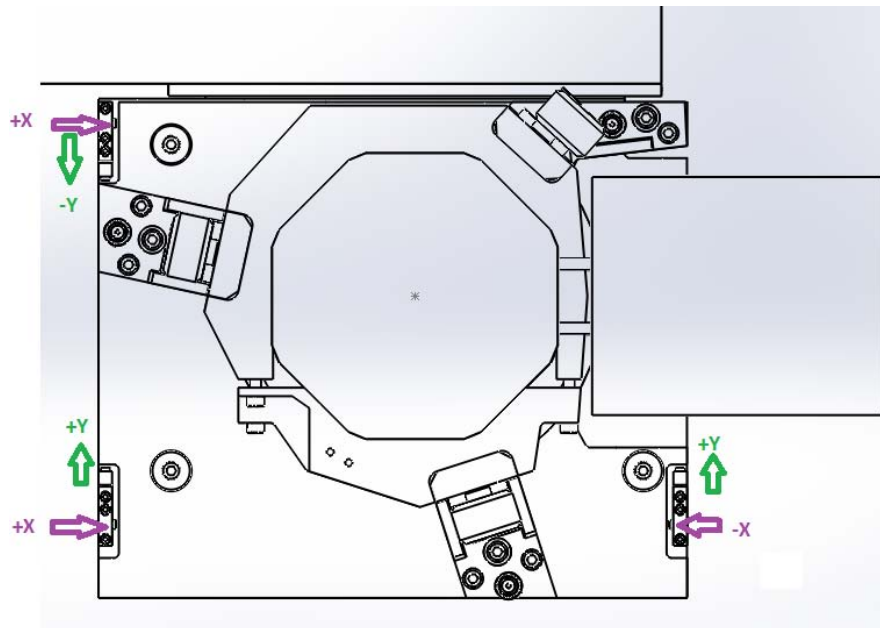


Marcas sobre la placa móvil

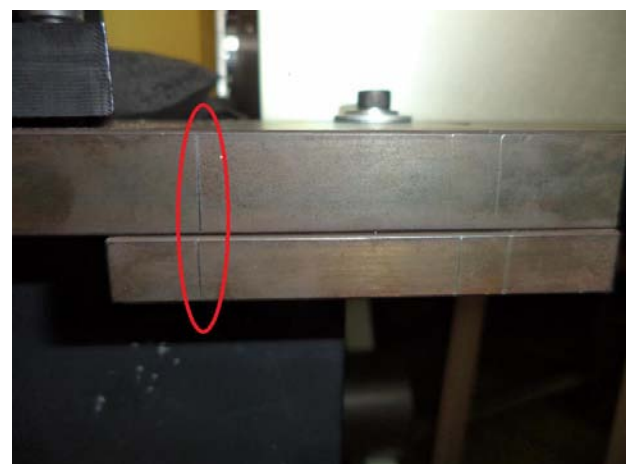
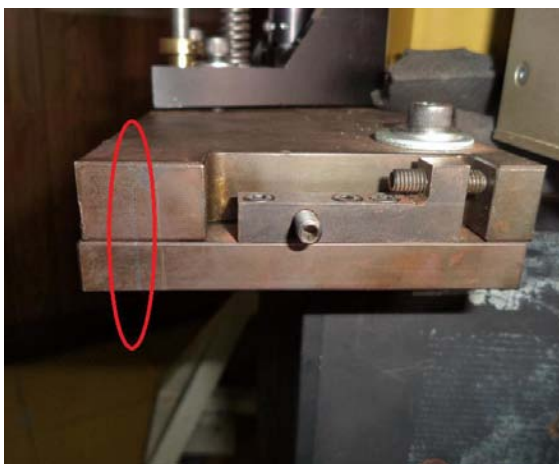


PROCESO DE CENTRADO

Para centrar, se tienen los tres topes fijos en la placa inferior fija, que a su vez cada uno de ellos posee dos prisioneros. Para moverse en el eje X, asegúrese que la placa superior móvil esté en contacto con los dos prisioneros que apuntan hacia +Y, pues servirán de guía; mientras que el prisionero que apunta hacia -Y, debe estar ligeramente suelto para permitir el deslizamiento de la placa. Con esto, si se quiere avanzar hacia +X, muévase los dos prisioneros que apuntan hacia +X dejando separando el tornillo que apunta hacia -X de la placa superior móvil; si se quiere mover hacia -X mueva el prisionero que apunta hacia -X, dejando los tornillos que apuntan hacia +X separados de la placa superior móvil. Para moverse en el eje Y, haga lo análogo cuidadosamente.



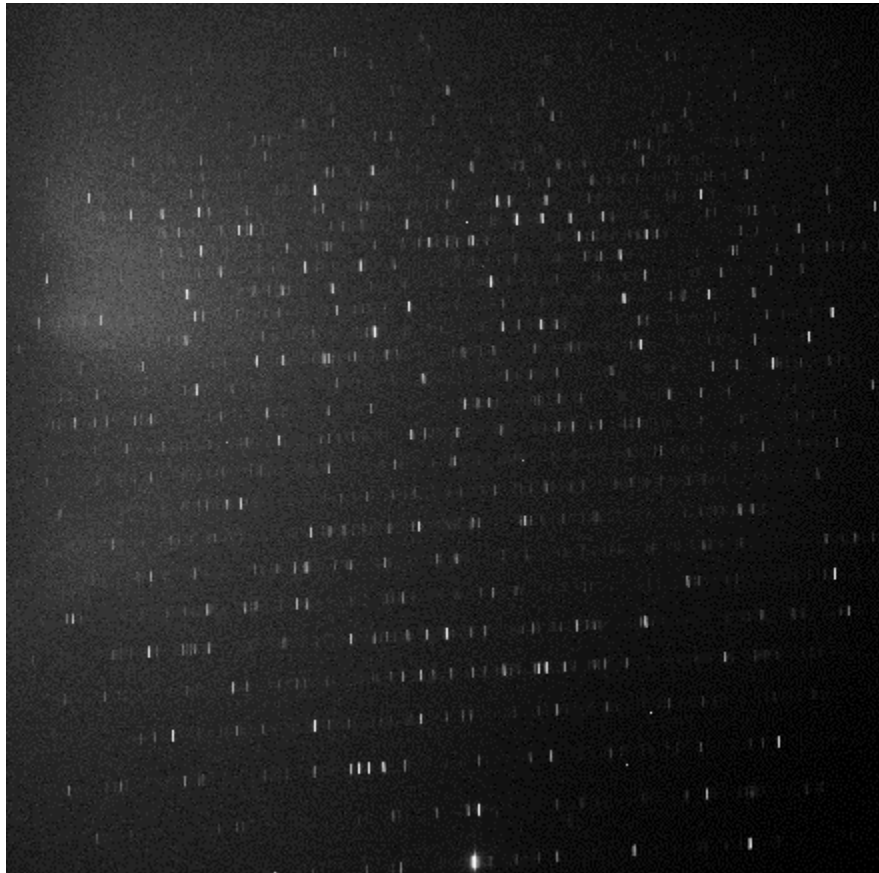
17. Con base en la explicación, haga coincidir las líneas de la placa superior móvil con las de la placa inferior fija que están marcadas en las caras laterales de dichas placas.
18. Apriete ligeramente todos los prisioneros contra para evitar el movimiento relativo entre las placas.
19. Ahora sí, apretar definitivamente los tres tornillos (con sus arandelas) de la placa superior móvil que quedaron pendientes en el paso 6.





PROCESO DE ENFOQUE

20. Para cada sensor electrónico, presionar el botón ON/OFF para encenderlo.
21. Presionar el botón ORIGIN para ponerlo en cero.
22. Presionar el botón in/mm y ponerlo en la opción de mm.
23. Para verificar si el desplazamiento detectado por el sensor electrónico es positivo, girar un poco en sentido horario el tornillo con perilla cuya punta de bola es tangencial a la superficie superior de la placa superior móvil para visualizar en la carátula del sensor si los números que despliega son positivos; de ser negativos, presionar el botón +/- para cambiarlo.
24. Girar nuevamente el tornillo con perilla en sentido anti-horario para dejar el sensor electrónico en cero y lograr que la superficie inferior de ese perfil asiente nuevamente sobre la placa superior móvil de manera plena.
25. Para lograr el foco, mover suave y lentamente los tres tornillos con perilla de manera uniforme hasta que en todos los sensores electrónicos se tenga una lectura de 0.67 mm, si trabaja con el Marconi IV; o de 1.89 mm si trabaja con el Marconi II. Cabe decir que para mover el tornillo de perilla del perfil L1, por el poco espacio, para ser operado, deberá emplearse la herramienta mostrada en la figura siguiente. En la computadora usted podrá visualizar un patrón de espectro análogo al que se muestra en la figura siguiente.



26. De no lograrse ese foco, podrá mover ligeramente los tornillos con perilla ya sea un forma uniforme (efecto pistón) o haciendo *tip-tilt* en un rango de ± 0.03 mm, hasta lograr un patrón lo más parecido al mencionado.

PROCESO DE ASEGURAMIENTO DEL MECANISMO

27. Ahora sí, apretar definitivamente los tornillos de seguridad M6 que se quedaron pendientes en el paso 7. Asegúrese de apretarlos lo suficiente para garantizar la inmovilidad total de los perfiles y de todo el sistema.
28. Poner el cinturón plástico rígido justo sobre las superficies superiores de las abrazaderas mediante los dos tornillos con cabeza acanalada usando un desarmador plano. Esto con el fin de aseguramiento extra del criostato.



Para el desensamble del sistema, siga los pasos en sentido inverso.

III. PROPIEDADES DEL MATERIAL

ALUMOLD®

Composición Química (Análisis Típico, %)

Zn	Mg	Cu
6	2,4	1,6

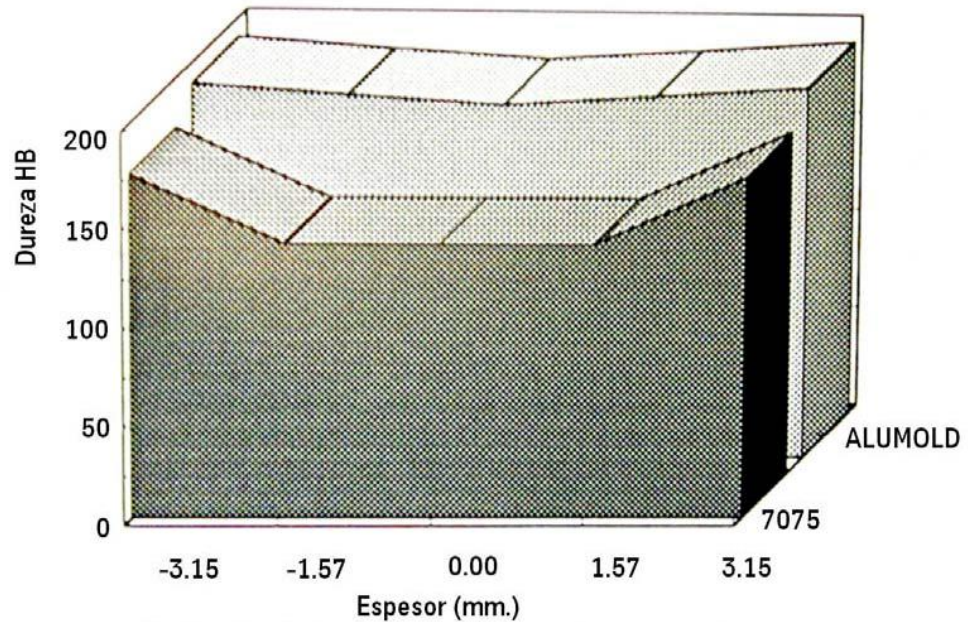
Propiedades mecánicas

Espesor (mm)	Valores mínimos			Valores típicos			
	UTS MPa	YS MPa	EI (%)	UTS MPa	YS MPa	EI %	Dureza HB
25 < esp. ≤ 76	560	510	5	590	540	10	190
76 < esp. ≤ 127	550	500	4	580	530	6	185
127 < esp. ≤ 152	540	490	2,5	570	520	4	185
152 < esp. ≤ 203	525	480	1	555	510	2	180
203 < esp. ≤ 254	505	460	1	535	490	1,5	180
254 < esp. ≤ 305	470	435	0,5	510	470	1,5	175

Propiedades físicas

Módulo de elasticidad MPa	72000
Densidad Kg/dm ³	2,8
Difusividad Térmica m ² /seg.	63·10 ⁶
Coefficiente expansión térmica (20-100°C) μm/m·K	23,7
Conductividad térmica W/(m·K) 20°C	153
Calor específico J/ Kg·K	860
Coefficiente de Poisson's	0,33
Rango de fusión °C	475 - 630

Distribución de dureza en plancha de Alumold comparada con un aluminio ASTM 7075



Distribución de dureza de una plancha de 160 mm. de espesor, típica para ALUMOLD y aluminio ASTM 7075

FUENTE: www.thyssenkrupp.cl/producto-especifico.html/producto-esp.index/58

ACERO COLD ROLLED 1018

1. Descripción: este acero de bajo - medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria.

2. Normas involucradas: ASTM A 108

3. Propiedades mecánicas: Dureza 126 HB (71 HRb)

Esfuerzo de fluencia 370 MPa (53700 PSI)

Esfuerzo máximo 440 MPa (63800 PSI)

Elongación máxima 15% (en 50 mm)

Reducción de área 40%

Módulo de elasticidad 205 GPa (29700 KSI)

Maquinabilidad 76% (AISI 1212 = 100%)

4. Propiedades físicas: Densidad 7.87 g/cm³ (0.284 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 0.15 – 0.20 % C

0.60 – 0.90 % Mn

0.04 % P máx

0.05 % S máx

6. Usos: se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina

FUENTE: <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201018.pdf>

IV. ARTÍCULO INTERNACIONAL SPIE

Artículo para el congreso Astronomical Telescopes + Instrumentation de la International Society for Optics and Photonics. 22-27 junio 2014. Montreal, Canadá.

Design and integration of a mechanism for focusing and alignment of the Echelle spectrograph for the telescope of 2.1 meters of the National Astronomic Observatory

Gutiérrez O. A. Horacio*^a, Farah S. Alejandro*^b, Echevarría R. Juan M., Sierra D. Gerardo.

^aDivisión de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Cto. Int. S/N, Cd. Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, México D.F.; ^bInstituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Cto. Exterior S/N, Cd. Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, México D. F.; ^cObservatorio Astronómico Nacional, Instituto de Astronomía, UNAM, Km. 103 Carretera Ensenada Tijuana, Ensenada, B.C., México.

ABSTRACT

This paper is focused on an engineering project applied to astronomy for scientific purposes. The project consisted elementally on the design, fabrication and characterization of an interface or mechanism to align and focus the lens of the Echelle spectrograph and its CCD camera. This instrument is part of the 2.1 m telescope of the Observatorio Astronómico Nacional located at the Sierra de San Pedro Martir, B. C., Mexico (OAN-SPM).

The mechanism described in this article is composed functionally of the next pieces: two half-clamps, three profiles type "L" (that function as support columns), a fixed plate, a reference sliding plate, and three digital sensors for measuring the relative position between the camera interface of the spectrograph and the plane of its dewar. The cryostat system has a lens that must be focused and aligned with the spectrograph. The cryostat and the mechanism have to be attached and it has to allow rotational movements around the three axes with linear adjustments along them.

Similarly there is a brief description of the adjacent elements to understand the mechanism and functionality design criteria used in order to ensure the proper functionality of the mechanism that has been tested and integrated in the telescope. Such results are also described as well as the technical specifications, the manufacturing process and the manufacturing drawings.

A brief description of the scientific instrument and some finite element simulations are also included in this work. Finally, some recommendations and future work that may be carried out as a continuous improvement mechanism are presented.

Keywords: alignment bench, focusing unit, spectrograph

1. INTRODUCTION

This project, is part of a bigger project called ESOP (Medium Resolution Optical Spectrograph) for scientific purposes for the Observatorio Astronómico Nacional of the UNAM located at the Sierra de San Pedro Martir, B. C., Mexico. The basic purpose of the project is to have a modern and efficient spectrograph for the 2.1 m telescope, which allows to carry out a wide variety of astronomical projects requiring broad spectral coverage in the optical range, a spectral resolution $500 < R \leq 5000$. Such project include observations of stellar and extended objects, ranging from external galaxies to stars in the Galaxy^{13,14}.

Currently, this project will use the Echelle spectrograph (Figure 1), which have similar cryostat and problems of alignment. So, it is intended to align and focus the lens of this spectrograph with the lens of its cryostat to test the new mechanical system. For this purpose, we developed a special design to perform these functions, easy to manufacture, easy to assemble and with a time effective during calibration. The project is currently at the stage of integration; however, the primary pieces that carry out critical functions have already been made and tested too with satisfactory results to the end user.

*^a gutierrezosorio.unam@yahoo.com, *^b farah@astro.unam.mx

Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V, edited by
Suzanne K. Ramsay, Ian S. McLean, Hideki Takami, Proc. of SPIE Vol. 9147,
91474Y · © 2014 SPIE · CCC code: 0277-786X/14/\$18 · doi: 10.1117/12.2057039

Proc. of SPIE Vol. 9147 91474Y-1

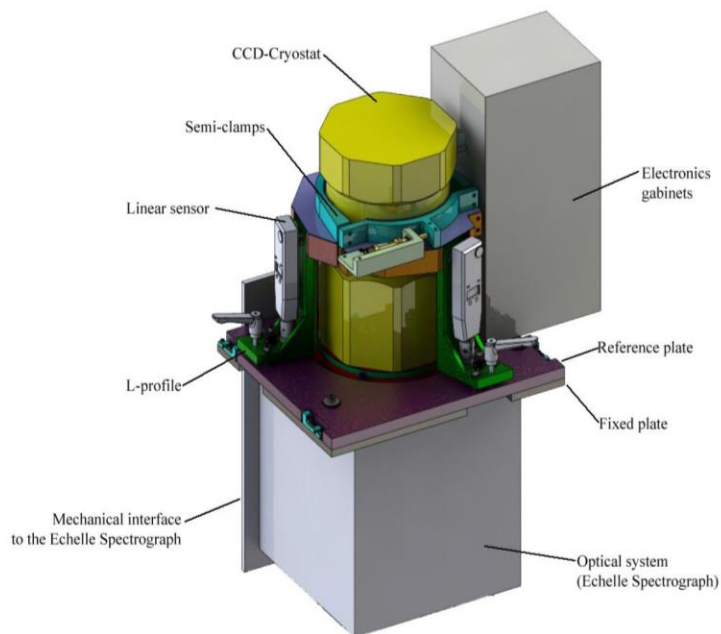


Figure 1. Mechanism for focusing and alignment –Echelle Spectrograph - CCD.

2. GENERAL DESCRIPTION OF THE *ECHELLE* SPECTROGRAPH

The Echelle Spectrograph was manufactured in 1970 by the company REOSC. It gives a resolution R contained between 18000 and 5000 \AA^{-1} . The layout of the main optical elements of the spectrograph is shown in Figure 2. The main characteristics of this instrument are mentioned in the Table 1.

Table 1. Technical specifications of Echelle Spectrograph¹.

ECHELLE SPECTROGRAPH...	
Resolution R	From 18000 to 5000 \AA^{-1} .
Main grating	254 x 128 mm; 79 lines.
Blaze angle	$63^{\circ}43'$.
Incidence angle	71° .
Dispersion angle of the beam	$\pm 2^{\circ}63'$.
Dispersion	4 \AA/mm to 16 \AA/mm .
Cross-disperser	900 lines/mm.
CCD grating	300 lines/mm.
Capability to fit with the REOSC/UMass setup	Between 8 (near Halph) and 16 (near $4,000 \text{ \AA}$) orders.
Capability to fit with the UCL/Mil setup	Between 12 and 30 orders.
Type of lamps mounted permanently	Argon, Cesium and Rubidium.
Type of lamp that can be mounted in the open hole	Thorium-Argon, Neon and Helium-Argon (with its own voltage supply).

Table 1. Technical specifications of Echelle Spectrograph¹. Continuation.

...ECHELLE SPECTROGRAPH	
Range of the adjustable slit	Minimum slit width = 30 μ m. Maximum slit width = 900 μ m.
Diameter of the slit viewer's field	18mm.
Slit length	30mm.
Quantity of masks	10.

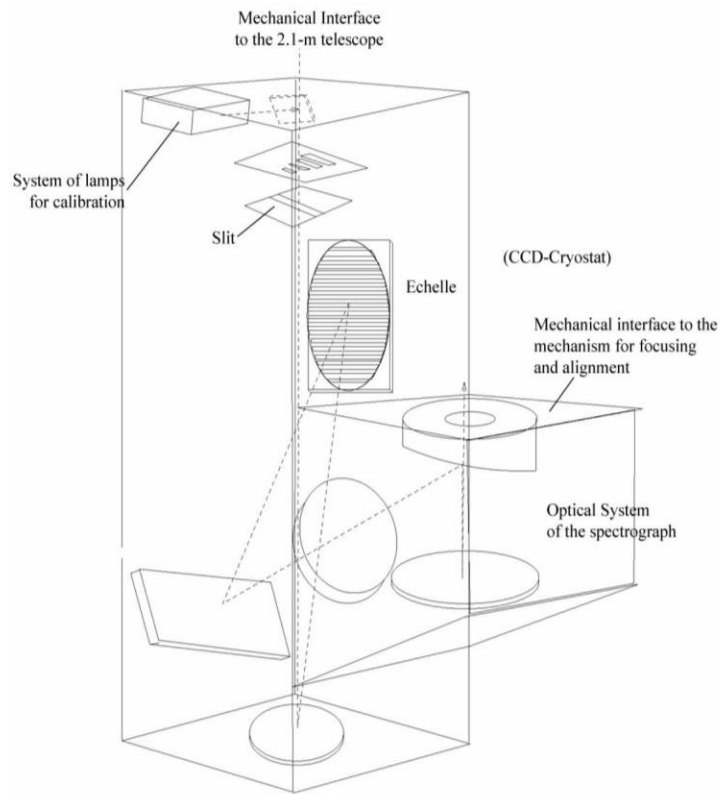


Figure 2. Lay Out of Echelle Spectrograph¹.

The Echelle Spectrograph works with an efficient CCD camera which is used to view the slit replacing this way the eyepiece. This kind of detector should allow the observer acquire and guide objects. Nowadays, the camera reaches tenth magnitude objects and it can image at least as faint as twelfth magnitude. The further the blue, more spaced the orders become, thus limiting the length of the slit that you can effectively use without overlapping the orders. The cross disperser and the CCD magnify the image of the length of the slit until the derived optimum slit width¹.

3. SPECIFICATIONS AND REQUIREMENTS

From the Lay Out of the spectrograph can be verified that between the camera lens itself and the lens of the window of CCD must have proper alignment and focusing so that the data reflected in the computer screen are reliable for astronomical analysis. It is considered that there is an optimum focusing and a proper alignment when a displayed spectrum on the computer is observed in a pattern of lines whose dimensions do not exceed 3.5 pixels. Besides, it should not be double. All this applies to the five areas: Blue-Blue; Blue-Red, Red-Blue, Red-Red and the Centre.

Added to this, the mechanism must satisfy the engineering established requirements. Its specifications incorporate deformation restrictions due primarily to the stresses and the thermal differences. As can be seen, the mechanism should be a fairly complex system that is governed under the principles of mechanical design and, given the geometric conditions by the lay out of the elements, it will work out as an interface also governed under the principles of re-engineering^{2,3,4}. The requirements of the mechanism are described in Table 2.

Table 2. Technical requirements of the mechanism.

REQUIREMENTS OF THE MECHANISM	
Movable part to align and focus	CCD cryostat.
Linear movements	Along X, Y: ± 2 mm; along Z: 3 mm.
Rotational movements	Tilt respect X, Y: 2° ; around Z: $\pm 4^\circ$.
Lens to be aligned and focused	Camera lens and CCD lens.
Allowable light passing through the space between the lenses.	No.
Allowable fogging of lenses	No.
Type of gas to be applied for Avoiding fogging	CO ₂ .
Allowable dimensional variation due to temperature and stress.	0.05 mm.
Overall load to be supported	400 N.
Approximated distribution of the load	80% belongs to the CCD and the rest to its electronic system.
Quantity of pixels per line in the image to be considered as focused	3.5 pixel.
Areas to be focused	All: Blue-Blue; Blue-Red, Red-Blue, Red-Red and the Centre.
Required weight	As light as possible.

4. GENERAL DESCRIPTION OF THE MECHANISM FOR ALIGNMENT AND FOCUSING

For this project multiple conceptual designs were compared to choose the best options for each mechanical element of the system to be manufactured. This was performed by the comparative analysis according to the selection criteria that were included in the decision matrix^{4, 6}. The model described below was selected at the end of the conceptual design stage.

4.1 Mechanism for alignment and focusing

The concept is shown in Figure 3, it is a modular design, which allows easy assembly and disassembly⁵ and the mechanical system consists of the following elements:

- I. Two semi-clamps whose function is to hold the CCD and electronics.
- II. Three profiles type "L" whose function is to work out as columns. In their upper zone are held to the semi-clamps while in their lower zone there are the elements of the rotary drive system or tip-tilt system.

- III. A movable sliding plate which performs a Cartesian linear motion along X and Y. The motion is possible thanks a reference plate attached at the instrument.
- IV. A fixed plate for supporting the whole mechanical system, which is screwed directly onto the upper surface of the camera of the spectrograph (reference plate).
- V. Rotary drive system, which includes a linear motion sensor with digital display, two helical washer springs placed in series, two fixing screws, a screw with adjustment lever (with knob) and a shaft holder that fixes the sensor to the profile "L". Each profile has one of this systems. These elements are part of the Cartesian system of movement along Z and rotation about X, Y.
- VI. A black neoprene sleeve connected between the fixed plate and the CCD by means of an elastic band and a screwed ring to prevent the passage of light into the space between the lenses.
- VII. A pneumatic valve on the platen of the CCD to allow the supply of CO₂ into the space between the lenses to prevent fogging.
- VIII. Two springs, a screw with control knob, a fixed support and two sliding clamps allow the CCD to perform the rotational motion around the Z axis. These parts are attached to the semi-clamps upper side.
- IX. A belt made to work as an interface between the CCD and the clamps. Its purpose is to prevent damage to the cryostat.

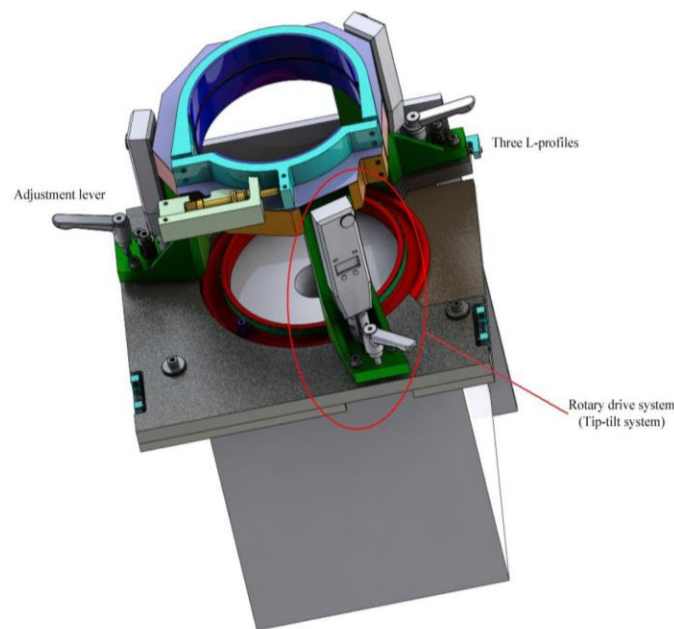


Figure 3. Elements of the mechanism for focusing and alignment.

4.2 Operating Principle

Due the configuration of the optical elements to be aligned, it is convenient to move the CCD cryostat to focus and align the lenses. To do so, it is clamped by the two main semi-clamps which are connected to the three L-profiles. Each of these has on its bottom zone a linear motion sensor, which is coupled by a screwed shaft holder. The ball tip of the sensor is in tangential contact with the upper surface of the fixed reference plate. The three sensors allow us to know the differences of height experienced by the CCD each time that the screw with adjustment lever is moved. To assure the tip-tilt movement of the cryostat is needed the use of a preloading components formed by springs and bolts.

The preload must have enough slack to avoid any kind of interference or malfunctioning. The springs and the preload screw pushes the L-profile to the reference plate, while the screw with adjustment lever, which has a ball point that is tangent to the reference plate, pulls or push the L-profile respect this plate.

Each time that adjustment screw is actuated in a clockwise or a counterclockwise direction, the CCD-Cryostat goes up or down certain height that is displayed by the sensor. If the CCD-Cryostat requires linear movement along the Z axis (as piston), you have to move the three screws with adjustment lever of the three L-profiles to reach the same height. While if the CCD-Cryostat requires an inclination, then a simply movement of one specific adjustment screw will do this tilt possible thanks to the restriction of the two other adjustment screws.

Rotations around X and Y are achieved by combining the movements described, this way is possible to find the alignment and the focus of the lens of the CCD of the camera of Echelle spectrograph. Once the optics of the instrument and its CCD-Cryostat are aligned and focused, it is necessary restrict the movement between the Ls-profile and the reference plate. To accomplish this restriction the two fixing screws of the L-profile need to be screwed to the reference plate.

To make the rotation of the CCD-Cryostat along the optical axis, is necessary untighten the main semi-clamps and actuate the screws contained on the sliding clamps. It will produce a relative rotation between the main semi-clamps and the sliding clamps causing the possibility to calibrate the CCD camera along this axis. Once done, the semi-clamps must to be tightened again. To compensate the lack of concentricity between the lenses of the CCD and of the spectrograph, generated by the series of movements made to the CCD-Cryostat during the alignment and focus stage, it is necessary to make some small movements along X and Y axes. This calibration is possible by adjusting the screws with ball tip which are located in the mechanical stops on the reference plate.

One last step is to set the system fully fixed, to do this is necessary to tighten the fixing screws between the instrument interface and the reference plate; the holes corresponding to these screws in the reference plate have an enough clearance to allow the relative movement. Finally the instrument is ready to be integrated to the telescope.

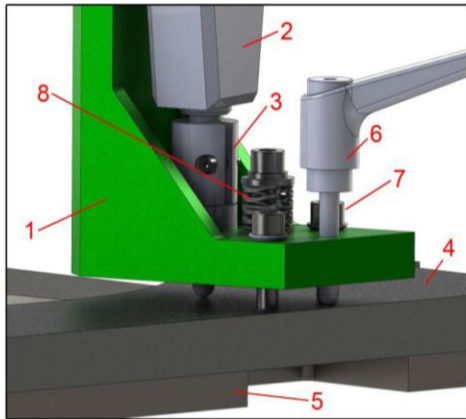


Figure 4. Detail of the elements to make the "tilt".

The numbered components shown in Figure 5 are:

1. L-Profile.
2. Electronic Sensor of Linear Movement.
3. Shaft Holder.
4. Reference Plate.
5. Fixed Plate.
6. Screw with Adjustment Lever.
7. Screw that Pushes the "L-Profiles" to the Reference Plate.
8. Screw-Washer Springs System that Pushes the "L" to the Reference Plate.

4.3 Mathematical model of the position

The kinematic equation that describes the position of the plane generated by the three points of tangential contact between, the upper surface of the reference plate with the spherical tips of the linear motion sensors, that are installed in the three Ls-profile depends elementally on the pitch P of the screw with adjustment lever. It means that the number of turns of each of these screws (N_A , N_B and N_C) will define the position of the CCD-Cryostat.

If a point of reference is located in a point $A = (a_{ix}, a_{iy}, a_{iz})$, of whichever of the tangential points generated by the tips of the sensors, and defining a line (parallel to the X axis) from A point and passing through point $B = (b_{ix}, b_{iy}, b_{iz})$,

corresponding to a second sensor, is possible to build the Cartesian system XYZ. The remaining point $C = (c_{ix}, c_{iy}, c_{iz})$ will be the tangential point corresponding to the tip of the third sensor. The equation of the plane that is generated by moving the CCD is then:

$$f(N, P) = 0$$

$$n_{ix}(x - a_{ix}) + n_{iy}(y - a_{iy}) + n_{iz}(x - a'_{iz}) = 0 \quad (1)$$

With:

$$n_{ix} = (b_{iy} - a_{iy})(c'_{iz} - a'_{iz}) - (c_{iy} - a_{iy})(b'_{iz} - a'_{iz}) \quad (2)$$

$$n_{iy} = (c_{ix} - a_{ix})(b'_{iz} - a'_{iz}) - (b_{ix} - a_{ix})(c'_{iz} - a'_{iz}) \quad (3)$$

$$n_{iz} = (b_{ix} - a_{ix})(c_{iy} - a_{iy}) - (c_{ix} - a_{ix})(b_{iy} - a_{iy}) \quad (4)$$

Where:

$$a'_{iz} = a_{iz} + N_A P \quad (4)$$

$$b'_{iz} = b_{iz} + N_B P \quad (5)$$

$$c'_{iz} = c_{iz} + N_C P \quad (6)$$

Meanwhile, the angle generated between the plane (1) with the base plane when it still has not been moved any of the Ls-profile is determined by the vector $N_{ii} = (n_{ix}, n_{iy}, n_{iz})$ and the vector $M_i = (0, 0, a'_{iz})$ by the following equation:

$$\Theta_i = \text{ArcCos} \left[\frac{N_{ii} \cdot M_i}{\|N_{ii}\| \|M_i\|} \right] \quad (7)$$

The centroid Q_i (of the triangle on the generated plane by (1)) is determined by the next equation:

$$Q_i = \left(\frac{a_{ix} + b_{ix} + c_{ix}}{3}, \frac{a_{iy} + b_{iy} + c_{iy}}{3}, \frac{a'_{iz} + b'_{iz} + a'_{iz}}{3} \right) \quad (8)$$

And the centroid Q_0 when the CCD-Cryostat has not been moved is computed by:

$$Q_0 = \left(\frac{a_{0x} + b_{0x} + c_{0x}}{3}, \frac{a_{0y} + b_{0y} + c_{0y}}{3}, \frac{a_{0z} + b_{0z} + c_{0z}}{3} \right) \quad (9)$$

This way, the displacement d_i that the center of the lens of the CCD presents from the base position (when $i = 0$) to the final position once moved (when $i > 0$) is given by:

$$d_i = |\overrightarrow{Q_0 Q_i}| \quad (10)$$

Note that i represents the stage number in which an individual or a simultaneous movements of the Ls-profile during the alignment process and focusing is made. Then $i \in \{ \mathbf{E} > 0 \}$.

4.4 Material

The mechanical system has parts of different materials to reach the technical requirements of stress-strain due to loads and temperature changes. Derived from a thermo-mechanical analysis, a type of aluminum commercially known as AluMold[®] 500 was selected to manufacture all the clamps and the L-profile. On the other side, for the plates the material selected is Cold Rolled 1018 Steel. The stops for the relative motion between the two plates as well as the support for rotational motion are also of this kind of steel. The sleeve to keep out the light to the space between the lenses is of neoprene. The ball tips of the screws with adjustment lever have a Teflon[®] coating to avoid penetration on the upper surface of the mobile plate by the difference of hardness. This phenomenon is also avoided in the same way for the main clamps and the CCD-Cryostat during the rotation about Z axis.

5. MECHANICAL CALCULATIONS

Below some of the mechanical calculations that guarantee the mechanical design of the mechanisms are shown in an overall way. These simulations were performed for the most drastic cases. The techniques that has been employed

include analytical calculations, simulations by Finite Element Method and established design criteria^{7,8,9}. Calculations for each of the elements of this system were conducted. However, in this article only the calculations that correspond to the three L-profile that are the critical mechanical elements are shown. It is considered that the total load acting on them is 400 N; 80% due the CCD-Cryostat weight and the rest by its electronics.

5.1 L1, L2 and L3 profiles

In Figure 5 are shown the force reactions acting on L1-profile. The maximum stresses are produced in the subsection zones as expected. This stresses distribution and the values obtained guarantee that the elastic limit of the AluMold[®] 500 is not achieved; hence, it is feasible to implement this part without problems.

L2-profile has an intricate geometry and is exposed to high load given the configuration of the mechanical system. However, the maximum stress is within the prescribed limits. It can also be seen that the maximum displacements does not affect the performance of the mechanism; so it can be manufactured reliably.

For the third L-profile, it can be inferred that the mechanical element will bear the loads acting on it without concerns of stresses neither displacements. Table 3 summarizes the maximum stresses and strains in the L-Profiles.

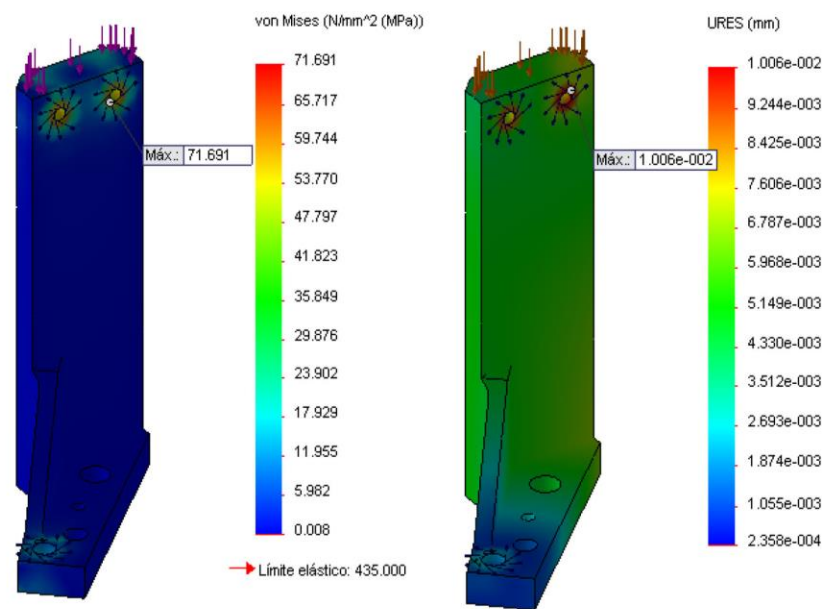


Figure 5. Stresses and strains in L2-Profile.

Table 3. Maximum stresses and strains on the L-Profiles.

MAXIMUM STRESSES	
L1-Profile	112.78 MPa.
L2-Profile	71.691 MPa.
L3-Profile	111.50 MPa.
MAXIMUM DISPLACEMENTS	
L1-Profile	7.787×10^{-3} mm.
L2-Profile	1.006×10^{-2} mm.
L3-Profile	7.797×10^{-3} mm.

6. MANUFACTURING

The mechanical design of each of the components forming the mechanism was performed parametrically according to the CAD models. It implies that every change required, for purposes of continuous improvement, were reflected directly in the rest of the model and in the manufacturing drawings¹⁵. The general tolerances for manufacturing used were ± 0.01 mm and the process of manufacturing selected was milling by CNC. Currently, the manufacturing of the key parts to do the movement of “tip-tilt” has been completed: three L-profile, two main semi-clamps, three holder shafts for holding the sensors and the two plates; the remaining elements are in the manufacturing process.

7. TESTS

With the manufactured parts and the mechanical fasteners, the system has been tested directly on the 2.1 m telescope at the OAN-SPM. The purpose of these tests were to assess the feasibility and efficiency to align and focus the lens before installing the permanently the mechanism. The experiment has been iterative and the results showed optimal functionality for the function that is wanted to make.

Once installed the mechanism on the Echelle spectrograph and performed the calibration process, it was possible to focus and align the lens with the CCD camera of the spectrograph. This is notorious in Figure 6 that shows images, before and after focusing and aligning the CCD-Cryostat, of exposures according to a pre-set pattern of a Thorium -Argon lamp. It is considered that if the width of each line (see Figure 6) is less than or equal to 3.5 pixels, then we will have an optimal alignment and focusing¹. Compare at the same figure the focused and aligned spectrum versus the without focusing and with misalignment one.

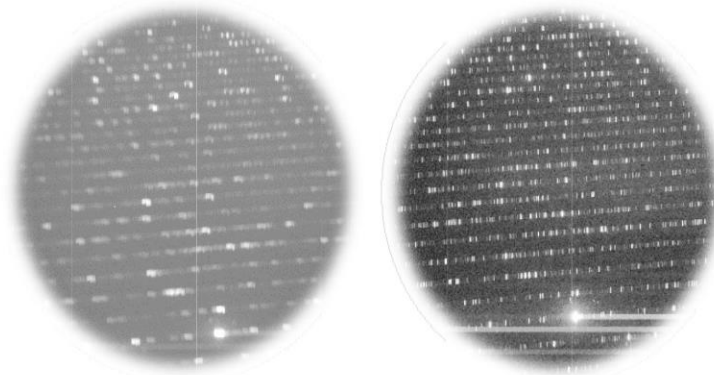


Figure 6. Left, misaligned and blurred image. Right, aligned and focused image.

We can say that with reference to the center of the right image of Figure 6, and calling the northwest, northeast, southwest and southeast directions as blue- blue, blue-red, red-blue and red-red lines, respectively, the results obtained for each of the lines in the four directions and in the center are within the allowable limit, see Figure 7.

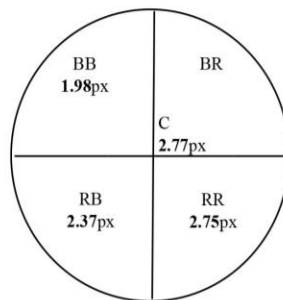


Figure 7. Results obtained for the five areas.



Figure 8. Mechanism integrated in the 2.1 m telescope.

8. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The mechanism has been integrated and tested, and has fulfilled the purpose for which it was designed. The coupling parts, the energy storage parts and the sensors were selected from commercial catalogs and complied our requirements. The tests were conducted repeatedly and it was possible to get satisfactory results each time. It can be concluded therefore that the mechanism ensures repeatability and efficiency. This mechanism is going to be subject to a continuous improvement. It is recommended for the final integration to carry out new iterations and analysis of positioning and inclination to get a displacements and rotations array to facilitate the calibration in the future.

9. ACKNOWLEDGEMENTS

This project was made with the help of the following persons of the Facultad de Ingeniería and the Instituto de Astronomía, both of the UNAM, whom we thank sincerely for their recommendations: Alejandro C. Ramírez Reivich, Leonel Gutiérrez, Rafael Costero, Benjamín García, José Luis Ochoa Abundis, Vicente Borja Ramírez, Francisco Cuenca, Jaime Ruiz Díaz, Ricardo Granados, Rogelio López, Benito Serraldo, Joaquín Chávez, Silvio Tinoco, Rodolfo Martínez Vilchis, Martín Hernández Dotor, Uriel Estrada López, R. Isaac Gutiérrez. O. and M. Salvador Gutiérrez O. Finally, we are grateful especially to the project DGAPA, PAPIIT IN111713.

REFERENCES

- [1] S. Levine and D. Chakrabarty. How to Use The San Pedro Martir REOSC Echelle Spectrograph. TECHNICAL REPORT MU-94-04. Instituto de Astronomía, UNAM.
- [2] A. Horacio Gutiérrez Osorio, U. Estrada López, S. R. S. Vilchis Martínez, A. D. Arellano Carmona, V. Borja Ramírez. Desarrollo de un equipo auxiliar para rehabilitación de pacientes con lesiones en las rodillas de bajo costo. MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM 25 al 27 DE SEPTIEMBRE, 2013 PACHUCA, HIDALGO, MÉXICO.
- [3] Yoder, Paul, Mounting Optics in Optical Instruments, SPIE, EUA 2000.
- [4] K. T. Ulrich, S. D. Eppinger, Product Design and Development Fourth Edition, McGraw-Hill, E. U. A., 2008.
- [5] Collins, Mechanical Design of Machine Elements and Machines, John Wiley & Son, 2000.
- [6] Shigley and Mischke, Mechanical Engineering Design, 5a, McGraw-Hill, E.U.A., 1989
- [7] Hayrettin Kardestuncer, Finite Element Handbook, McGraw-Hill, México 1987.
- [8] Optomechanical Design and Engineering 2001, San Diego 2001, SPIE Vol. 4444.
- [9] Pilkey Walter, D., Mechanics of structures: Variational and Computational Methods, CRC, Press, Inc., Florida, E.U.A., 1994.
- [10] P. G. Ciarlet (1991): "Basic error estimates for elliptic problems" in Handbook of Numerical Analysis (Vol II) J.L. Lions y P. G. Ciarlet (ed.), North-Holland, Amsterdam, 1991, p. 17-351.
- [11] M. Born y E. Wolf, Principles of Optics, Cambridge University Press, 1997.
- [12] G. Brooker, Modern Classical Optics, Oxford University Press, 2003.
- [13] J. Echevarría, I. Robert Cannon Smith, R. Costero, S. Zharikov and R. Michel. High-dispersion absorption-line spectroscopy of AE Aqr. Mon. Not. R. Astron. Soc. 387, 1563–1574 (2008).
- [14] J. Echevarría, Eduardo de la Fuente and Rafael Costero, U GEMINORUM: A TEST CASE FOR ORBITAL PARAMETER DETERMINATION. The Astronomical Journal, 134:262Y273, 2007 July
- [15] Alejandro Farah; Carlos Tejada; Jesús; Francisco J. Cobos; Beatriz Sánchez; Javier Fuentes; Elfego Ruiz. OSIRIS camera barrel optomechanical design. Proc. SPIE 5492, Ground-based Instrumentation for Astronomy, (30 September 2004); doi: 10.1117/12.550658.

IV. PÓSTER CONGRESO INTERNACIONAL SPIE

22-27 de Junio de 2014. Montreal, Quebec, Canadá.



DESIGN AND INTEGRATION OF A MECHANISM FOR FOCUSING AND ALIGNMENT OF THE ECHELLE SPECTROGRAPH FOR THE TELESCOPE OF 2.1 METERS OF THE NATIONAL ASTRONOMIC OBSERVATORY

Gutiérrez O. A. Horacio^{*a,b}, Farah S. Alejandro^{*b}, Echevarría R. Juan M.^b, Sierra D. Gerardo.^c

^aDivisión de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Cto. Int. S/N, Cd. Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, México D.F.; ^bInstituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Cto. Exterior S/N, Cd. Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, México D. F.; ^cObservatorio Astronómico Nacional, Instituto de Astronomía, UNAM, Km. 103 Carretera Ensenada Tijuana, Ensenada, B.C., México.

*a,b gutierrezosorio.unam@yahoo.com, gutierrezosorio@yahoo.com; *b farah@astro.unam.mx, jer@astro.unam.mx; *c gerardo@astro.unam.mx

ABSTRACT

This project, is part of a bigger project called ESOPO (Medium Resolution Optical Spectrograph) for scientific purposes for the Observatorio Astronómico Nacional of the UNAM located at the Sierra de San Pedro Martir, B. C., Mexico. The basic purpose of the project is to have a modern and efficient spectrograph for the 2.1 m telescope, which allows to carry out a wide variety of astronomical projects requiring broad spectral coverage in the optical range, a spectral resolution $500 < R \leq 5000$. Such project include observations of stellar and extended objects, ranging from external galaxies to stars in the Galaxy^{1,2}. The mechanism described in this article is composed functionally of the next pieces: two half-clamps, three profiles type "L" (that function as support columns), a fixed plate, a reference sliding plate, and three digital sensors for measuring the relative position between the camera interface of the spectrograph and the plane of its dewar. The cryostat system has a lens that must be focused and aligned with the spectrograph. The cryostat and the mechanism have to be attached and it has to allow rotational movements around the three axes with linear adjustments along them.

GOAL. The goal of this project is to design, manufacture and integrate a mechanical interface for focusing and alignment the lens of a CCD Cryostat and the lens of the Echelle Spectrograph's camera. This instrument belongs to the Telescope of 2.1 m. of the National Astronomic Observatory located in Mexico.

GENERAL DESCRIPTION OF THE MECHANISM FOR ALIGNMENT AND

FOCUSING. For this project multiple conceptual designs were compared to choose the best options for each mechanical element of the system to be manufactured. This was performed by the comparative analysis according to the selection criteria that were included in the decision matrix^{3,4}. The model described below was selected at the end of the conceptual design stage.

The concept is a modular design, which allows easy assembly and disassembly⁵ and the mechanical system consists of the elements shown in Figures 1 and 2.

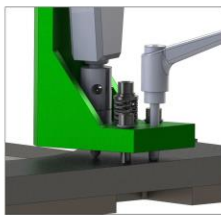


Figure 1. Detail of elements for "tip-tilt".

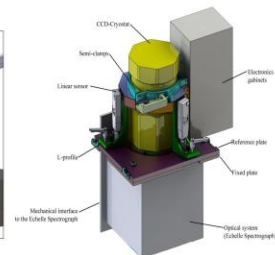


Figure 2. Elements of the mechanism for focusing and alignment

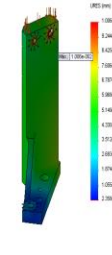


Figure 3. Mechanical analysis using FEM

The mechanical computations guarantee the mechanical design of the mechanisms. The simulations were performed for the most drastic cases (Figure 3). The techniques that has been employed include analytical calculations, simulations by Finite Element Method and established design criteria^{6,7,8}. Calculations for each of the elements of this system were conducted. It is considered that the total load acting on them is 400 N; 80% due the CCD-Cryostat weight and the rest by its electronics.

TESTS. The system has been tested directly on the 2.1 m telescope at the OAN-SPM. The purpose of these tests were to assess the feasibility and efficiency to align and focus the lens before installing the permanently the mechanism. Figure 5 shows images, before and after focusing and aligning the CCD-Cryostat, of exposures according to a pre-set pattern of a Thorium -Argon lamp. It is considered that if the width of each line is less than or equal to 3.5 pixels. The maximum obtained was 2.77 pixels at the center and the minimum 1.98 pixels, then we will have an optimal alignment and focusing⁹. Compare at the same figure the focused and aligned spectrum versus the without focusing and with misalignment one.



Figure 4. Integration

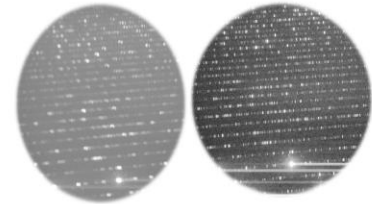


Figure 5. Left, misaligned and blurred image. Right, aligned and focused image.

CONCLUSIONS. The mechanism has been integrated and tested, and has fulfilled the purpose for which it was designed. The tests were conducted repeatedly and it was possible to get satisfactory results each time. It can be concluded therefore that the mechanism ensures repeatability and efficiency. This mechanism is going to be subject to a continuous improvement. It is recommended for the final integration to carry out new iterations and analysis of positioning and inclination to get a displacements and rotations array to facilitate the calibration in the future.

REFERENCES.

1. J. Echevarría, 1. Robert Connon Smith, R. Costero, S. Zharikov and R. Michel. High-dispersion absorption-line spectroscopy of AE Aqr. Mon. Not. R. Astron. Soc. 387, 1563-1574 (2008).
2. J. Echevarría, Eduardo de la Fuente and Rafael Costero, U GEMINORUM: A TEST CASE FOR ORBITAL PARAMETER DETERMINATION. The Astronomical Journal, 134:262Y273, 2007 July.
3. K. T. Ulrich, S. D. Eppinger, Product Design and Development Fourth Edition, McGraw-Hill, E. U. A., 2008.
4. Shigley and Mischke, Mechanical Engineering Design, 5a, McGraw-Hill, E.U.A., 1989.
5. Collins, Mechanical Design of Machine Elements and Machines, John Wiley & Son, 2000.
6. Hayrettin Kardesuncer, Finite Element Handbook, McGraw-Hill, México 1987.
7. Optomechanical Design and Engineering 2001, San Diego 2001, SPIE Vol. 4444.
8. Pflüger Walter, D., Mechanics of structures: Variational and Computational Methods, CRC, Press, Inc., Florida, E.U.A., 1994.
9. S. Levine and D. Chakrabarty, How to Use The San Pedro Martir REOSC Echelle Spectrograph. TECHNICAL REPORT MU-94-04, Instituto de Astronomía, UNAM.

V. PÓSTER CONGRESO NACIONAL DE ASTRONOMÍA

Ciudad de México. Octubre 2013.

Congreso Nacional de Astronomía

UNAM 2013



DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y MANUFACTURA DE UN MECANISMO DE ALINEACIÓN PARA LALENTE DEL ESPECTRÓGRAFO DE UN TELESCOPIO

Gutiérrez Osorio A. Horacio*(1, 2), Farah Alejandro(2),
Echevarría Román Juan Manuel(2).

1 División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
* gutierrezosorio@yahoo.com

2 Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Resumen

Esta es una investigación preliminar respecto un proyecto, que a su vez forma parte de un megaproyecto llamado ESOPO con fines científicos para el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, B.C. de la UNAM y consiste en el diseño, caracterización y manufactura de un mecanismo de alineación de la lente del espectrógrafo Echelle para el telescopio de 2.1 m. En este cartel se describe la propuesta de diseño para tal mecanismo o interfaz.



Objetivo

Diseñar, caracterizar y manufacturar un mecanismo de alineación que fungirá como interfaz universal para la alineación de la lente de un espectrógrafo.

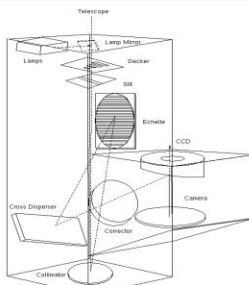


Fig. 1. Lay Out óptico

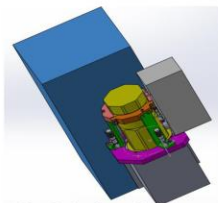


Fig. 2. La interfaz propuesta

Metodología

Se procedió a efectuar un análisis documental sobre mecanismos para posicionamiento y alineación de objetos para actuar en tres grados de libertad, los cuales son elementalmente: rotación alrededor del eje X, rotación alrededor del eje Y y rotación alrededor del eje Z. El requerimiento para lograr el enfoque es entonces diseñar y manufacturar una interfaz que sostenga el CCD y lo mueva precisamente alrededor de los ejes X e Y efectuando un "tilt" de ajuste para enfocar mecánicamente la lente del espectrógrafo y obtener la imagen adecuada. El giro alrededor del eje Z deberá ser posible para enfocar también con respecto al mismo.

Para llegar a la propuesta aquí presentada se siguió una metodología de ingeniería consistente en la primera etapa (en la cual se encuentra el proyecto) en la realización de múltiples posibles soluciones al problema, filtrándose en un embudo de ideas acorde con criterios de ingeniería establecidos y pasando así por n sub-etapas. Resultado del filtrado analítico de las propuestas o hipótesis existentes, fue la cuidadosa selección de un mecanismo de alta precisión que cumpliera el requerimiento de movimiento en los grados de libertad aptos para este efecto. De la comparativa de los múltiples mecanismos existentes, se ha elegido esta propuesta como concepto a continuar desarrollando para cumplir con el objetivo requerido por la comunidad científica del Instituto de Astronomía.

En la Fig. 1, se encuentra esquema que muestra el *lay out* óptico del instrumento Echelle. El diseño propuesto del mecanismo irá montado sobre la cámara y será la interfaz entre ésta y el CCD; por lo que permitirá ajustar el paralelismo entre el plano de la cámara y plano del CCD mediante micrómetros de alta sensibilidad. Véase Fig. 2.

Básicamente, la interfaz es un mecanismo que consiste en: una base acoplada a la cámara del espectrógrafo, una abrazadera formada por dos piezas, tres perfiles que fungirán como columnas, tres micrómetros de ajuste y un sistema de tornillos y resortes que serán el método de unión entre los elementos mecánicos y el sistema de sujeción de las columnas con la base. Como puede apreciarse, la interfaz soporta el CCD y permite que éste efectúe un cabeceo controlado hasta lograr la alineación requerida entre éste y el espectrógrafo.

Para el análisis de esfuerzo de empleará el Método de los Elementos Finitos y se efectuará la consecuente caracterización para la manufactura.

Resultados

Es de suma importancia la repetitividad del enfoque de la interfaz para garantizar una alineación adecuada de precisión. Por ende se están efectuando pruebas de ello mediante un prototipo de función crítica cuyos principios mecánicos son los mismos que se emplearán para este diseño. Al momento se ha observado que sí es posible lograr los objetivos mediante este concepto, toda vez que el prototipo arroja valores o rangos de repetitividad que están dentro de la tolerancia establecida.

Conclusiones

La propuesta de diseño seleccionada en esta primera fase con el fin de proporcionar la alineación y enfoque necesarios a las lentes de los espectrógrafos del telescopio parece buena. Sin embargo, habrá que observar algunas otras restricciones y requerimientos propios para el diseño ingenieril del mecanismo, tales como el sistema de control de movimiento, la selección del material, la selección de lubricante de los elementos, el cual debe ser el adecuado para evitar vibraciones y garantizar la precisión requerida así como la fijación óptima. Sin embargo, esto es una acercamiento, a manera de hipótesis, para poder resolver el problema.