



Manufactura, integración, metrología y aceptación de las celdas optomecánicas de la cámara del espectrógrafo ESOPPO para el telescopio de 2.1 metros del Observatorio Astronómico Nacional

Everardo Jorge Barojas Méndez

Tesis:

que presenta para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

Enero 2014

Director de tesis:

Farah Simón Alejandro, Posgrado de Ingeniería

Universidad Nacional Autónoma de México

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Eléctrica - Instrumentación

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gabriel Eduardo Sandoval R.

Secretario: Dr. Qureshi Naser

Vocal: Dr. Farah Simón Alejandro

1^{er}. Suplente: Dr. Gonzalez Gonzalez J. Jesus

2^{d o}. Suplente: Dr. Ruiz Schneider Elfego Guillermo

MÉXICO D.F. INSTITUTO DE ASTRONOMÍA.

TUTOR DE TESIS:

FARAH SIMÓN ALEJANDRO

FIRMA

Dedicado a la memoria de Luis Héctor Barojas Weber

Ningún problema puede soportar el asalto del pensamiento prolongado¹.

Voltaire

No tengo nada que ofrecer además de mi propia confusión.

Jack Kerouac

¹Cabe resaltar que Voltaire no conoció la conjetura de Goldbach ni la hipótesis de Riemann.

Agradecimientos

A mis padres y hermanas, sobran palabras, les debo todo.

A mi tutor, Alex Farah, por su apoyo, educación y excelente ejemplo.

A todas las mujeres fuertes en mi vida... no, mejor, a todas las mujeres fuertes en la historia, pero con especial cariño a estas:

Mis tías, las madres de mis amigos, Gisela, mi madre y mis amigas.

A un arbusto anónimo en la base de la pared de la Coconetla.

Índice general

Índice de Acrónimos	XIX
Resumen	XXI
Abstract	XXIII
1 Introducción	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Resumen de contenido por Capítulo	2
1.3 Prólogo	3
1.4 El sitio astronómico de San Pedro Mártir	5
1.4.1 El telescopio de 2.1 m de San Pedro Mártir	6
1.5 ESOPO	9
2 Estado del arte en manufactura, metrología y aceptación	11
2.1 Introducción	11
2.2 Manufactura	12
2.2.1 Maquinado de precisión	12
2.2.2 Procesos de manufactura	14
2.2.3 Gestión de Manufactura	18
2.3 Metrología	20
2.3.1 Instrumentos de medición tradicionales	21
2.3.2 Máquina de medición por coordenadas	23

2.4	Integración, aceptación y puesta en marcha	25
2.4.1	Integración	25
2.4.2	Aceptación	25
2.4.3	Puesta en marcha	25
2.5	SOPHIE	27
2.5.1	Observaciones	29
2.6	Espectrógrafo de fibra PMAS: diseño, manufactura y desempeño	30
2.6.1	Observaciones	31
2.7	X-Shooter	32
2.7.1	Observaciones	36
2.8	OSIRIS	37
2.8.1	Descripción general del barril de la cámara	37
2.8.2	Integración	38
2.8.3	Mediciones optomecánicas	40
2.8.4	Observaciones	41
3	Elementos de diseño auxiliares	43
3.1	<i>MUAC</i> : Montura Universal de Auto Centrado	43
3.1.1	Definición del problema	44
3.1.2	Soluciones semejantes	44
3.1.3	Diseño e implementación	48
3.1.4	Conclusiones	50
3.1.5	Planos	52
3.2	Unidad de desplazamiento pasiva	56
3.2.1	Concepto	56
3.2.2	Cálculo	59
3.2.3	Análisis por elementos finitos	61
3.2.4	Desarrollo	61
3.2.5	Conclusión	65

4	Desarrollo y Resultados	67
4.1	Manufactura	68
4.1.1	Técnicas Alternativas	72
4.1.2	Código G	75
4.1.3	Conclusión	77
4.2	Metrología	78
4.2.1	Metrología de taller	79
4.2.2	Metrología de precisión	83
4.2.3	Conclusiones de metrología	87
4.3	Integración	88
4.3.1	Interpretación	94
	Bibliografía	97
A	Instrucciones de trabajo de piso	99
A.1	Celdas y suministro de material	99
A.2	Definición de Ruta de Manufactura	99
A.3	Ruta General, preparación de la pieza	101
A.3.1	Primer paso	101
A.3.2	Careado	102
A.3.3	Recorte	103
A.3.4	Sección en torno	103
A.4	Ruta Semi-Específica	106
A.4.1	Celdas	106
A.4.2	Soportes Radiales	110
A.4.3	Separadores	113
A.4.4	Interfaces	115
A.4.5	Celdas de atermalización	116
A.4.6	Otras	117

Índice de tablas

1.1	<i>Especificaciones originales del telescopio de 2.12 m del OAN en San Pedro Mártir[1].</i>	8
3.1	<i>Piezas y tochos más grandes y más pequeñas</i>	49
3.2	Parámetro de compensación focal. Este dato proviene del presupuesto de error y sólo se tiene para el Brazo Azul, sin embargo se proponen dos valores para el Brazo Rojo con el fin de <i>probar</i> el cálculo analítico. . . .	63
3.3	Análisis de UPD aprobado en 2010 para el brazo AZUL.	64
3.4	Cálculo analítico de prueba para el Brazo Rojo, utilizando los valores propuestos y listo para compararse con el dato obtenido de la simulación por elementos finitos una vez que el ΔL se defina en el presupuesto de error. Los valores en negritas e itálicas son los resultados obtenidos por la hoja de cálculo. Se muestran resultados para los dos casos planteados, uno manteniendo las características del material y variando las dimensiones y el otro maniando las dimensiones y variando las características (CTE primordialmente).	64
4.1	Celdas manufacturadas.	68
4.2	Resultados de metrología de taller. Las referencias (A,B,C, etc se pueden ver en la Figura 4.11). Todos los valores en <i>mm.</i>	79
4.3	Continuación de resultados de metrología de taller. Las referencias (D,E,F, etc se pueden ver en la Figura 4.11) Todos los valores en <i>mm.</i>	80
4.4	Tabla de resultados resumida. Todos los valores en <i>mm.</i>	80
4.5	Medidas de ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001 después de anodizar. Todos los valores en <i>mm.</i>	84

4.6	Medidas de ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001 antes de anodizar. Todos los valores en <i>mm</i>	85
4.7	Tabla de resultados resumida. Todos los valores en <i>mm</i>	85
4.8	Consideraciones.	91
4.9	Resultados de caracterización con tornillo único delantero, Tornillo 1.	92
4.10	Resultados de caracterización con tornillo dual izquierdo trasero, Tornillo 2.	92
4.11	Resultados de caracterización con tornillo dual derecho trasero, Tornillo 3.	93
4.12	Resumen de resultados, desplazamiento máximo y resoluciones. Los campos marcados como N/A no tienen componentes en ese rango.	94
A.1	<i>Celdas y material disponible para cada una.</i>	100
A.2	La seis piezas a fabricar en la categoría de celdas.	106
A.3	Las seis piezas a fabricar en la categoría de soportes radiales	110
A.4	La seis piezas a fabricar en la categoría de separadores	113
A.5	La tres piezas a fabricar en la categoría de interfaces	115
A.6	La tres piezas a fabricar en la categoría de celdas de atermalización.	117
A.7	La dos piezas a fabricar que no entran en ninguna de las categorías anteriores.	117

Índice de figuras

1.1	<i>Vista aérea del OAN en la sierra de san pedro mártir. Atrás el edificio del 2.1 m, en medio el 0.84 m y al frente el 1.5 m.</i>	5
1.2	<i>Imagen superior: Estructura principal de ESOPO con sus componentes principales visibles y descritas. Imagen inferior: Estructura principal tapada, tal y como se verá una vez terminada su fabricación.</i>	9
1.3	<i>ESOPO, ESpectrógrafo Óptico de mediana y baja resolución para Oan-spm; Un espectrógrafo para el 2.1 m del OAN en SPM.</i>	10
2.1	<i>Maquinado de precisión en torno para el molde de un lente de contacto. Los moldes para inyección de plástico o lentes de contacto son de las aplicaciones principales del maquinado de precisión, imagen de Fresnel Technologies ®.</i>	13
2.2	<i>Cuadro sinóptico de diferentes procesos de maquinado arreglados por categoría, los más importantes se describen a continuación.</i>	15
2.3	<i>Diferentes tipos de fresas y de cortes, imagen de Valcarb Industrial ®.</i>	16
2.4	<i>La fresadora CNC del taller de mecánica de precisión del IA-UNAM.</i>	17
2.5	<i>Un micrómetro de exteriores. Este tipo de instrumento, como su nombre lo indica, es capaz de medir hasta micrómetros.</i>	22
2.6	<i>Una máquina de medición por coordenadas con una mesa de granito.</i>	23
2.7	<i>El espectrógrafo SOPHIE, instalado en el telescopio 1.93 m del observatorio de Haute-Provence. Un espectrógrafo Schmidt echelle con un dispersor cruzado, el haz es colimado y re-enfocado por un espejo esférico.</i>	28
2.8	<i>Disposición final de espectrógrafo PMAS, con aumento de la entrada de fibra óptica.</i>	31

2.9	<i>El diseño óptico de X-shooter cercano a IR. El foco Cassegrain se marca con una flecha roja en el centro. La hendidura se encuentra en la parte inferior derecha. El haz de luz pasa por dos espejos colimadores (superior derecha) y entra a la caja de dispersion (izquierda) que consiste de tres prismas y una rejilla echelle. La luz pasa por el colimador una vez más, entra a la cámara e incide en el detector (superior izquierda).</i>	33
2.10	<i>La caja de óptica cercana al IR, con su suspensión de tres puntos (triángulos). El espejo colimador principal está del lado derecho, con su parte posterior aligerada. El brazo de equilibrio con aligerado Astron es el diamante de la izquierda, unido al triángulo de la suspensión. La óptica caliente no se muestra.</i>	34
2.11	<i>Con la técnica de aligerado extremo Astron, se crean grandes bolsas maquinando a través de pequeños hoyos. La disminución de peso y el incremento en rigidez son notables. Las costillas adentro de las bolsas aumentan la rigidez.</i>	35
2.12	<i>Vista general de OSIRIS, incluyendo todos los sistemas principales y el barril de la cámara.</i>	38
2.13	<i>Vista general del barril de la cámara de OSIRIS, las letras A, B, C, D y E indican la superficie de referencia. La letra C es la referencia axial.</i>	39
2.14	<i>Ejemplo de soporte radial bajo el esfuerzo de los tornillos que jalan las muelles en tracción.</i>	40
3.1	<i>Diferentes métodos de sujeción aptos para CNC.</i>	45
3.2	<i>Diferentes modelos de prensas Kurt para uso de maquinaria pesada.</i> . .	46
3.3	<i>Una pieza plana detenida por vacío.</i>	46
3.4	<i>Un tocho fijado a la bancada de trabajo por stops y tornillos.</i>	47
3.5	<i>Un chuck de tres mordazas, ideal para piezas circulares.</i>	48
3.6	<i>Un arreglo de cuatro prensas magnéticas sosteniendo una placa de acero lista para maquinarse. Se puede ver otro electromagneto acoplado a una pluma para mover piezas pesadas.</i>	48
3.7	<i>Diseño final del MUAC, se debe garantizar paralelismo entre las superficies y concetricidad entre el diámetros exterior y el centro del vástago.</i>	50

3.8	<i>Un tocho montado sobre el MUAC con el cono de auto centrado y tornillos de fijación visibles.</i>	51
3.9	<i>El MUAC montado en el torno del taller mecánico de precisión en sus últimas etapas de fabricación.</i>	52
3.10	<i>Los dos MUACs terminados con sus respectivos conos de auto centrado. El ejemplar de la derecha está provisto con barrenos y cajones para su montura en la bancada de la fresadora.</i>	53
3.11	<i>Copia del plano del cono de auto-centrado, tal y como se le entrego al taller mecánico de precisión del IA-UNAM.</i>	54
3.12	<i>Copia del plano de la MUAC, tal y como se le entrego al taller mecánico de precisión del IA-UNAM.</i>	55
3.13	<i>Los 24 componentes ópticos de ESOPPO, con la UDP señalada en el Brazo Rojo.</i>	57
3.14	<i>Plano de manufactura óptica de una lente de ESOPPO, extracto del Diseño Óptico de ESOPPO, ESOPPO-OP-A-DO1 versión 2.0</i>	58
3.15	<i>Esquemático de la unidad pasiva de desplazamiento. Se distinguen cuatro piezas, dos azules y dos grises, las piezas del mismo color son del mismo material. La longitud de las piezas de en medio es la misma.</i>	59
3.16	<i>Imagen superior: 1. Elementos finitos auxiliares para simular de modo simplificado el montaje, rigidez y expansiones térmicas equivalentes de la UDP. 2. Mallado de la UDP. Imagen inferior: Resultados del análisis por elementos finitos, se puede ver el desplazamiento efectivo en los resultados del lado izquierdo.</i>	62
4.1	<i>Celda cámara roja S1, ESOPPO-ME-CAMR-V1-030-001.</i>	69
4.2	<i>Celda cámara roja C1 montada sobre el torno para ajusta el diámetro exterior al tamaño justo de la interfaz (ver figura 4.3).</i>	69
4.3	<i>Interfaz barril 1, ESOPPO-ME-ICAMR-V1-010-001, antes y después del acabado superficial y barrenos para su montaje.</i>	70
4.4	<i>Celda cámara roja C2 (abajo) y celda cámara roja C1 (arriba), ESOPPO-ME-CAMR-V1-020-001 y ESOPPO-ME-CAMR-V1-030-001, respectivamente.</i>	71

4.5	<i>Maquinado de interface.</i>	72
4.6	<i>Relleno de cera.</i>	73
4.7	<i>Relleno de cera.</i>	73
4.8	<i>Relleno de cera.</i>	74
4.9	<i>Pie de Rey utilizado para las mediciones de taller.</i>	78
4.10	<i>Proceso de medición de ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001 con el pie de rey.</i>	81
4.11	<i>Plano de las mediciones realizadas en el taller.</i>	82
4.12	<i>Plano de metrología fina.</i>	86
4.13	<i>Sistema de calibración.</i>	88
4.14	<i>Acercamiento del sistema de calibración.</i>	89
4.15	<i>Análisis por elementos finitos de la interfaz.</i>	90
4.16	<i>Imagen ejemplo de medición de desplazamiento del LASER en el campo, de aquí se obtenían las coordenadas polares del LASER.</i>	91
4.17	<i>Ubicación de los tornillos descritos en las Tablas siguientes.</i>	93
A.1	<i>El tocho sobre la prensa lista para el careado.</i>	101
A.2	<i>El barreno debe estar en la intersección de las diagonales.</i>	102
A.3	<i>Un tocho careado en la CNC.</i>	102
A.4	<i>Esquemático de los barrenos auxiliares.</i>	103
A.5	<i>Esquemático de recorte del tocho.</i>	104
A.6	<i>Muestra del tocho recortado montado sobre el MUAC.</i>	105
A.7	<i>Celda cámara roja C1, todas las celdas son de esta forma básica.</i>	106
A.8	<i>El tocho debe estar montado sobre el MUAC y no sobre la prensa.</i>	107
A.9	<i>Detalle de Celda cámara roja C1</i>	108
A.10	<i>Detalle de escalón y barrenos.</i>	108
A.11	<i>Detalle de cortes inferiores. En la parte inferior se puede ver la superficie interior que se lleva a cabo en el primer corte.</i>	109
A.12	<i>Detalle de maquinado extra único para la Celda cámara roja C1.</i>	109
A.13	<i>SopORTE Radial RD21L. Note la tres superficies planas cada 120 grados.</i>	110
A.14		111

A.15 <i>Se muestra el tocho montado sobre el MUAC con la prensa sólo como referencia.</i>	112
A.16 <i>Soporte Radial RD21L1, la superficie plana se muestra de otro color para resaltarla.</i>	112
A.17 <i>Un ejemplo de separador genérico.</i>	113
A.18 <i>Note la rampa en la parte interior, este acabado se debe hacer en el torno.</i>	114
A.19 <i>Detalle del escalón en el reverso de la pieza.</i>	114
A.20 <i>Interfáz Colimador Rojo.</i>	115
A.21 <i>Detalle de la interfáz del colimador rojo. Se debe carear la parte superior e inferior con mucha precisión.</i>	116
A.22 <i>Detalle de corte interior, notesé el mate en la parte superior e inferior. Estos cortes se deben hacer en la CNC.</i>	116

Índice de Acrónimos

- IA (Instituto de Astronomía): El Instituto de Astronomía UNAM es una de las instituciones en México y la UNAM encargada de la investigación en astronomía y astrofísica, junto con el resguardo, mantenimiento y uso del Observatorio Astronómico Nacional. Sus dos sedes se encuentran en Ciudad Universitaria en la Ciudad de México y en Ensenada, Baja California.
- OAN (Observatorio Astronómico Nacional): El OAN cuenta actualmente con tres telescopios cuyos diámetros son 2.1 m, 1.5m y 0.84 m, los cuales operan en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California, en el noroeste de 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 hasta 1979.
- SPM (San Pedro Mártir): Acrónimo de la Sierra de San Pedro Mártir situada al norte del estado de Baja California, México.
- ESOPO (Espectrógrafo Óptico de Mediana y Baja Resolución): ESOPO será un espectrógrafo de mediana resolución para el Telescopio de 2.1m del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, B. C. Este proyecto será desarrollado totalmente por la UNAM, participando en él ambas sedes del IA (Ciudad Universitaria y Ensenada).
- CAM (*Computer Aided Manufacture*): Qué por sus siglas en inglés significa fabricación asistida por computadora, implica el uso de computadores y tecnología de cómputo para ayudar en la fase directa de manufactura de un producto, es un puente entre el Diseño Asistido por Computadora CAD y el lenguaje de programación de las máquinas herramientas CNC con una intervención mínima del operario.

- CAD (*Computer Aided Design*): Por sus siglas en inglés, significa, diseño asistido por computadora, es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales del diseño en sus respectivas actividades.
- CNC (*Computer Numerically Controlled*): El control numérico computarizado CNC es un sistema de automatización de máquinas herramienta que son operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento, en comparación con el mando manual mediante volantes o palancas.
- PDM (*Product Design Management*): Por sus siglas en inglés, significa: Gestión de Diseño de Productos. Como su nombre lo indica, en compañías enfocadas a productos, la gestión de diseño se aplica principalmente a productos, interactuando de cerca con el diseño del producto, marketing, desarrollo e investigación.
- MES (*Manufacturing Execution System*): Significa Sistemas de Ejecución de Manufactura. Son sistemas computarizados usados en la manufactura. Un sistema MES debe proporcionar la información adecuada en el momento adecuado para ayudar a tomar decisiones en como mejorar las actuales condiciones de planta para mejorar la producción.
- ERP (*Enterprise Resource Planning*): Significa Planificación de Recursos Empresariales. Los sistemas ERP integran gestión de información interna y externa a nivel de toda la organización, incluyendo datos de finanzas y contaduría, manufactura, ventas, servicio y servicio al cliente.
- BIPM (*International Bureau of Weights and Measures*): Que por sus siglas en inglés significa el Buró Internacional de Pesos y Medidas.

Resumen

En este trabajo se presenta el instrumento ESOPO (ESpectrógrafo ÓPtico de mediana y baja resolución) así como su propósito, óptica, mecánica y su impacto social y científico. Se hablará acerca del telescopio base para ESOPO; el 2.1 m en el Observatorio Astronómico Nacional OAN y algo más acerca de la locación del OAN en sí; la sierra de San Pedro Martir. En el cuerpo principal de la tesis, se hará un análisis del diseño y desarrollo del instrumento, el propósito y requerimientos optomecánicos de la cámara y posteriormente se discutirá la estrategia de manufactura de las celdas para la óptica y los métodos adecuados para su fabricación, tanto por control numérico como por métodos convencionales. Posteriormente se discutirá el desarrollo de los programas para la CNC *per se* y los detalles y documentación de la manufactura. La etapa final que se presenta, es la metrología de las piezas y la corroboración de que están dentro de las tolerancias requeridas.. Una vez manufacturadas, se integrarán las piezas y se acoplarán con la óptica y el resto del instrumento. Finalmente, se presenta un análisis de los métodos usados para la manufactura, los resultados obtenidos y las posibles mejoras, calibración y resultados. La contribución al conocimiento está en el cumplimiento de los requerimientos de alto desempeño que permitirán alcanzar los objetivos científicos de este instrumento de vanguardia.

Abstract

This document will introduce the ESOPO instrument, its purpose, optics, mechanical structure and its social and scientific impact. The quality and characteristics of the astronomical site for ESOPO and its host telescope will also be discussed; the 2.1 m in the Mexican national astronomic observatory atop the San Pedro Mártir sierra, in Baja California.

It will cover the analysis of the design and manufacture of the ESOPO instrument, its requirements, specifications and finally the strategy and route designed for its efficient manufacture on a computer numerically controlled CNC machine. The main matter of the thesis will document the development of the proper tools and subsequent generation of adequate G code for the manufacture of the thirty three optic cells which compose the infra red camera, as well as the complicated measuring and final integration that these intricate pieces will require. The contribution to knowledge of this work is the fulfilment of the high level requirements that will allow the scientific objectives of this state of the art instrument to be reached in full.

Capítulo 1

Introducción

El proyecto de tesis nace de la necesidad de fabricar las celdas ópticas del brazo rojo de ESOPO; para ello se habilitó y utilizó el equipo CNC del taller de mecánica de precisión del IA-UNAM y se pusieron en movimiento una serie de engranes para crear un grupo de manufactura exclusivo a ESOPO.

Las celdas, como los elementos de cualquier instrumento de precisión (y los instrumentos astronómicos siempre lo son) tienen tolerancias menores y más estrictas que en otros casos, por lo que como *addendum* al requisito de velocidad de fabricación, viene un requisito igualmente importante de calidad.

En la industria de manufactura, las piezas normalmente se producen en volúmenes altos. Se define el proceso de manufactura *una* vez para producir piezas que se fabrican *muchas* veces, lo cual hace que los costos sean bajos. El caso de la instrumentación astronómica es muy diferente; para ESOPO hay 33 celdas, todas ellas únicas. El proceso de manufactura se debe definir 33 veces para piezas que se fabrican una sola vez y ello conlleva consideraciones muy especiales, tales como:

- Por las limitaciones de tiempo, dada la naturaleza de los instrumentos científicos, el tiempo entre que se propone, se diseña y se comienza a operar debe ser el menor posible. Esto debido a que los objetivos del instrumento pueden volverse obsoletos y los costos de desarrollo se pueden volver prohibitivos.

- Se requiere el uso de herramientas que garanticen las tolerancias y la eficiencia de los procesos. Como ejemplo, se diseñó una Montura Universal de Auto-Centrado, (de aquí en adelante llamada MUAC). Esta montura se implementó tanto en la bancada de la fresadora CNC como en un torno manual y permite mantener el origen o *cero pieza* en cambios de orientación, máquina y material.
- Necesidad de una ruta de manufactura con amplio detalle para tener definidos el mayor número de procesos y herramientas y que el proceso de manufactura se lleve a cabo de un modo fluido y eficiente.
- Debido a las consideraciones anteriores, el proceso de metrología se vuelve muy importante y nace el control interno de calidad; cuyo trabajo es verificar que se pierda lo mínimo en el trayecto de los planos a la manufactura.

En el cuerpo de este documento veremos todo el desarrollo que fue necesario para el correcto maquinado, metrología e integración de las celdas aquí descritas, así como un análisis del resultado obtenido.

1.1 Objetivo

El objetivo final del proyecto de tesis es facilitar la fabricación de las celdas ópticas del brazo rojo para ESOPO. El proceso para obtenerlas está directamente ligado a la manufactura y de ahí derivan el resto de los objetivos del proyecto: estrategia de manufactura, metrología, integración y aceptación de las celdas y el instrumento.

El trabajo, también involucra un análisis e investigación importante sobre el telescopio de 2.1 m del OAN en San Pedro Mártir, Baja California, para entender la importancia del proyecto y visualizar el impacto de ESOPO en la astronomía en México.

1.2 Resumen de contenido por Capítulo

- Capítulo 1:
En el Capítulo 1 se presenta una introducción al proyecto y a los temas relacionados con el proyecto, así como la definición del problema y su justificación.

- Capítulo 2:
Marco teórico. Se presenta la teoría y conocimiento necesaria para la resolución del problema principal. Se habla acerca de métodos y técnicas de producción y manufactura, de código G y maquinas CNC así como de metrología y control de calidad *in situ*. Se definen las técnicas que más adelante se utilizan en resolver el *problema* básico del proyecto. También se habla acerca de trabajos y soluciones similares, de métodos industriales y diferentes acercamientos para obtener un instrumento astronómico.
- Capítulo 3
Se desarrolla y explica el proceso de diseño, manufactura e implementación de la montura universal de auto centrado, MUAC. Se presentan planos y el producto terminado. Se introduce el desarrollo de los cálculos para la unidad pasiva de desplazamiento, desarrollo de concepto, cálculos y propuesta de selección de material.
- Capítulo 4:
Desarrollo, el cuerpo principal del trabajo. En este Capítulo se tratan los productos terminados y cómo se comparan con el diseño original y resultados esperados.
- Conclusiones:
Se presentan las conclusiones del proyecto. Se resumen los resultados obtenidos y su aplicación directa para terminar la fabricación del resto del espectrógrafo, así como posibles mejoras y líneas de investigación.
- Anexo A:
Se desarrolla la ruta de manufactura: El conjunto de instrucciones sobre las cuales se basaron los procesos de manufactura del producto.

1.3 Prólogo

La astronomía es una ciencia cuyo avance está ligado al avance tecnológico de sus instrumentos; las épocas en que se podía hacer ciencia de punta sólo con un catalejo y el ojo humano pasaron hace ya casi 500 años. Hoy en día el catalejo ha evolucionado en el telescopio moderno y el ojo humano ha sido desplazado a favor de instrumentos astronómicos de alta tecnología (*ie*: cámaras infrarrojas, espectrógrafos, fotómetros, etc).

Actualmente, con telescopios que orbitan fuera de la tierra, telescopios con espejos de más de 10 metros de diámetro, y radio telescopios de cientos de metros para ondas milimétricas; los instrumentos acoplados a estos telescopios han llegado a un grado de complejidad tan alto que su importancia es casi comparable a la del telescopio en sí.

Aquí entra la importancia de ESOPO como un instrumento de punta para actualizar el telescopio 2.1 m del OAN (de aquí en adelante abreviado como el *2.1 m*), cuyo espectrógrafo actual, el espectrógrafo Boller y Chivens, es de baja resolución y originalmente estaba destinado a trabajar para un telescopio menor, por lo que no aprovecha al 100 % la capacidad del telescopio.

El diseño del instrumento, la manufactura de sus subsistemas y óptica (a cargo del IA-UNAM y el INAOE) se encuentran 100 % terminados. La manufactura de la estructura mecánica y celdas optomecánicas necesarias para montar la óptica siempre son los últimos componentes que deben fabricarse, puesto que se deben acoplar a las dimensiones finales de la óptica. Esta tarea es del IA-UNAM y es justamente el tema de este trabajo.

1.4 El sitio astronómico de San Pedro Mártir

Por más de 30 años, el IA-UNAM ha operado y desarrollado el OAN de México en lo alto de la sierra de San Pedro Mártir. El observatorio está en medio de una reserva natural a unos 100 kilómetros de la costa oeste de la península de Baja California, a 2830 metros sobre el nivel del mar y unos 2300 metros sobre el nivel continental promedio.

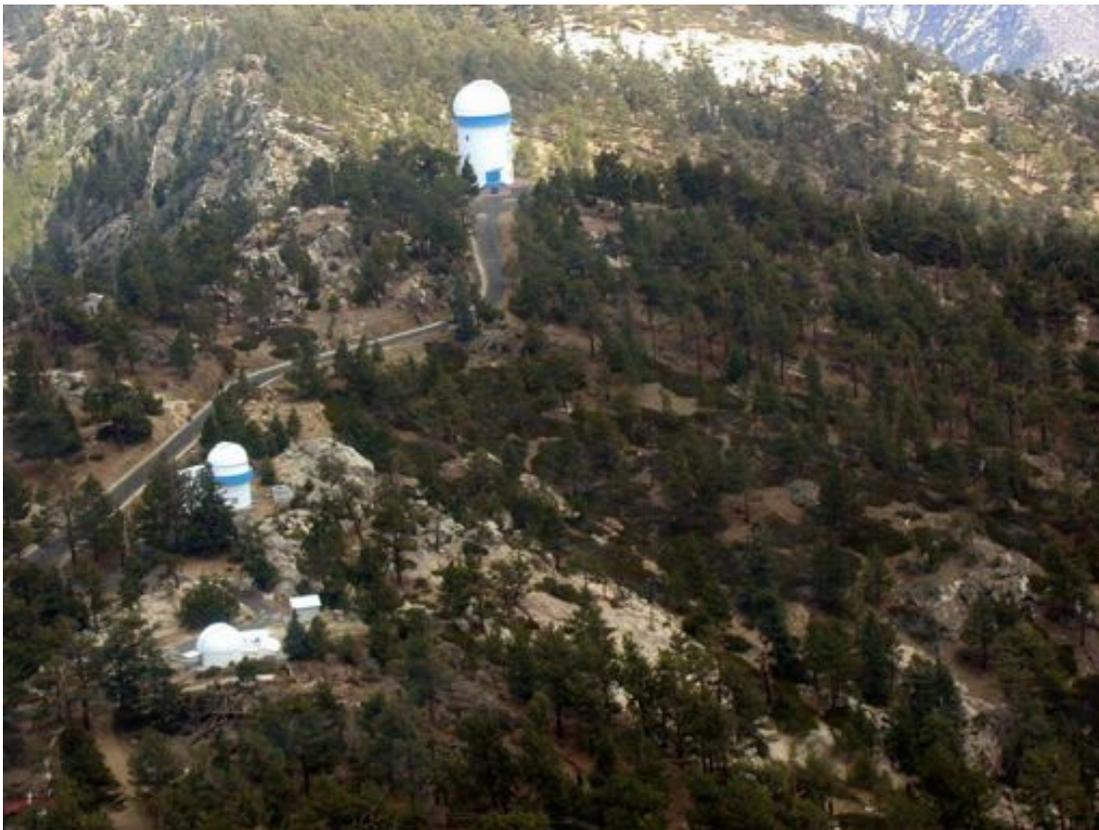


Figura 1.1: *Vista aérea del OAN en la sierra de san pedro mártir. Atrás el edificio del 2.1 m, en medio el 0.84 m y al frente el 1.5 m.*

Hay tres telescopios funcionales Ritchey-Chrétien; de 0.84 m, 1.5 m y 2.1 m, estos telescopios han educado a generaciones de astrónomos mexicanos desde la primera luz del 2.1 m en 1979. Los telescopios se mantienen en excelentes condiciones y con instrumentación adecuada y moderna.

De acuerdo a estadísticas climáticas, de nubosidad, meteorológicas, de extinción óptica atmosférica, opacidad milimétrica, estudios geotécnicos, *seeing*¹, perfiles de turbulencia óptica, perfiles de viento y simulaciones tridimensionales de turbulencia atmosférica, el sitio astronómico de San Sedro Mártir es de condiciones privilegiadas para la astronomía y está entre los tres mejores sitios astronómicos del hemisferio norte [2].

1.4.1 El telescopio de 2.1 m de San Pedro Mártir

Junto con el 2.1 m del observatorio Guillermo Haro del INAOE en Cananea, Sonora, el 2.1 m del OAN es el telescopio más grande y más productivo de México. Se construyó entre 1974 y 1979, tiene espejos secundarios de $f/7.5$, $f/13.5$ y $f/30$.

En su momento, los conceptos básicos para la construcción del 2.1 m fueron [1]:

1. Lograr que el espejo primario, el sistema de soporte y la celda del primario sean lo más ligeros posible.
2. Lograr una longitud focal primaria muy corta.
3. Eliminar contrapesos masivos.
4. Utilizar una construcción económica y simple.

Debido a las limitaciones económicas, el diseño original era de 1.5 m y no fue hasta que el Dr. A. Poveda [1] consiguió un fondo adicional, que se consideró aumentar el tamaño hasta el actual de 2.1 m. En ese momento, la importancia de que el espejo primario fuera lo más ligero posible fue muy aparente, pues de otro modo el costo del proyecto se volvía prohibitivo. Al final, el peso se redujo de 2,800 kg a 2,020 kg, y la razón focal del sistema Ritchey-Chretien se convirtió en la más corta del mundo hasta ese momento.

En el momento de su inauguración en 1979, el telescopio más grande del mundo era el BTA-6 Ruso, con una apertura de 6 m, el 2.1 m era el catorceavo telescopio más grande del mundo y su diseño era tan eficiente que antes de que siquiera estuviera terminado,

¹Proviene de la palabra *see* en inglés, que significa ver. El *seeing* astronómico se refiere a los efectos de difuminación y parpadeo en objetos astronómicos causados por la turbulencia atmosférica y el índice refractivo variable de la atmósfera terrestre.

la universidad de Wyoming comenzó a construir un telescopio basado en el 2.1 m [1]. Hoy en día, a más de treinta años de su puesta en marcha, el 2.1 m no está ni siquiera entre los 100 [3] telescopios más grandes del mundo y lo que lo mantiene competitivo y operacional es una combinación de su excelente localización en la sierra de San Pedro Mártir, la capacidad científico tecnológica del personal que lo opera y sus excelentes instrumentos (*ie*: ESOPO).

Sin embargo y con el fin de ser totalmente claros, aunque ESOPO es un gran instrumento que mejorará el nivel internacional del OAN, no es un sustituto para un telescopio nuevo más grande; que es lo que le hace falta al OAN de SPM para estar a la par con sitios astronómicos de condiciones comparables.

Especificaciones del 2.1 m

Las especificaciones técnicas originales del 2.12 m así como las describe de la Herrán [1] son las siguientes:

Especificaciones originales del 2.12 m	
Diámetros de espejo primario	2.12 m
Distancia focal	4.80 m
Razón focal primaria	f/2.26
Razón focal, foco Cassegrain	f/7.5
	f/13.5
	f/27.0
	f/98.0
Masa del espejo primario	2020.0 kg
Masa del tubo	10300.0 kg
Masa del yoke	10500.0 kg
Masa del north pier	3700.0 kg
Masa del south pier	3300.0 kg
Masa de engranes y contrapesos	3200.0 kg
Masa de cuadro base	3680.0 kg
Masa de auxiliares, cables, etc.	955.0 kg
<i>Total</i>	37655.0 kg
Óptica Ritchey-Chrétien, 95 % de luz en menos de 1.0"	
Diámetro de engranes principales	1.84 m
Diámetro de engranes secundarios	0.30 m
Diámetro de piñón principal	0.092 m
Diámetro de piñón secundario	0.033 m
Reducción total	1:180
Precisión	AGMA clase 15
Razón angular para apuntar	1.0 deg/sec
Razón angular para centrar	0.10 deg/sec
Razón angular variable de guía	0.0041 deg/sec
Exactitud de apuntamiento	+/- 6.00 arcsec
Exactitud de guiado	0.20 arcsec
Consumo eléctrico de guiado	60.0 watts

Tabla 1.1: *Especificaciones originales del telescopio de 2.12 m del OAN en San Pedro Mártir[1].*

1.5 ESOPO

En el 2005 el IA-UNAM determinó proceder al diseño y construcción de un Espectrógrafo Óptico de Mediana Resolución para el telescopio de 2.1 m del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir.

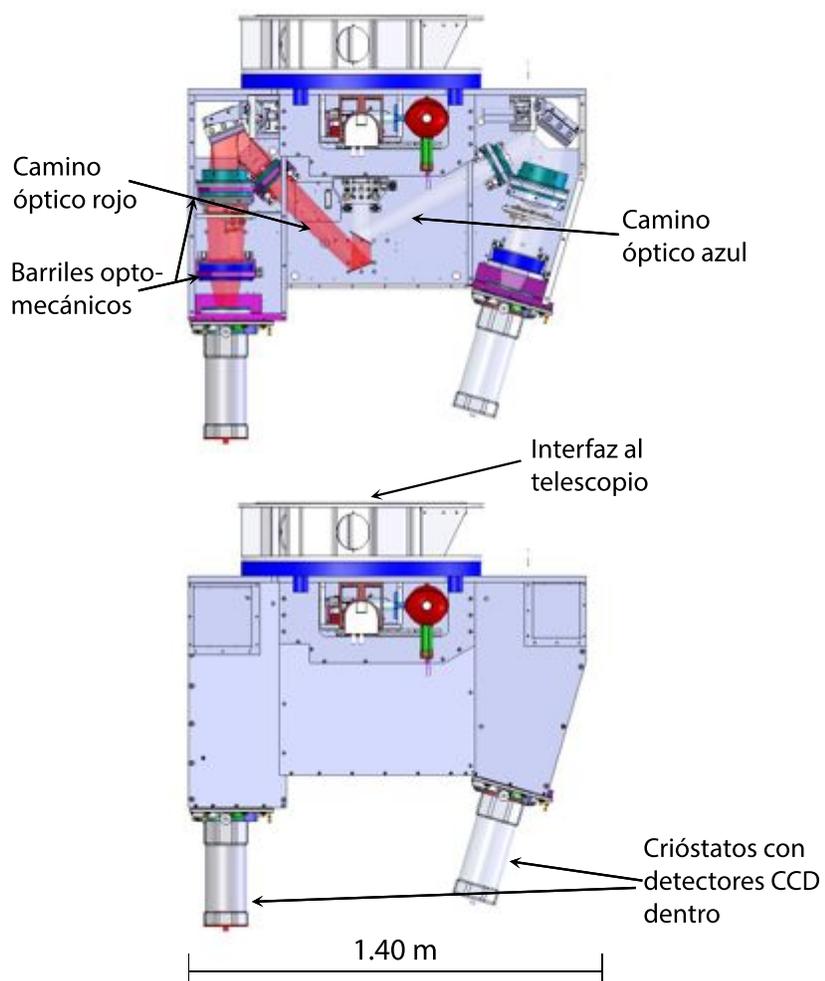


Figura 1.2: *Imagen superior: Estructura principal de ESOPO con sus componentes principales visibles y descritas. Imagen inferior: Estructura principal tapada, tal y como se verá una vez terminada su fabricación.*

El proyecto fue otorgado al grupo ESOPPO, ganador de la licitación interna que se hizo para el desarrollo de dicho proyecto. El espectrógrafo consta de dos brazos (ambos ven en el rango del espectro visible, uno en el extremo rojo y otro en el azul), siguiendo la recomendación de uno de los árbitros externos del concurso.

El proyecto no incluía presupuesto del IA-UNAM, por lo que conseguir el financiamiento fue parte del proyecto. El propósito básico del proyecto es contar con un espectrógrafo moderno y eficiente, 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.



Figura 1.3: *ESOPPO*, *ESpectrógrafo Óptico de mediana y baja resolución para Oan-spm*; *Un espectrógrafo para el 2.1 m del OAN en SPM*.

Es un espectrógrafo de propósito general que debe mejorar la resolución y el cubrimiento espectrales, la cobertura de campo y la eficiencia óptica y de operación del espectrógrafo ByCh que actualmente se usa en ese telescopio. La lista de proyectos realizados y propuestos para el ByCh proporcionan una lista suficientemente amplia de casos científicos aplicables para ESOPPO.

Capítulo 2

Estado del arte en manufactura, metrología y aceptación

2.1 Introducción

Sin duda, la clave del proyecto es la correcta manufactura de las 33 celdas y su óptica correspondiente. En estricta teoría, si las celdas y la óptica están bien manufacturadas la integración sería simple y exitosa; de allí la importancia del tema de esta tesis. Sin embargo, este escenario es utópico y sumamente improbable, por ello el área de integración, calibración y puesta en marcha no es trivial ni sencilla y al contrario, muy importante.

En este Capítulo estudiaremos diferentes técnicas de manufactura, metrología e integración así como una breve introducción a cada una, con un poco de análisis en cuanto a la factibilidad y aplicación a la manufactura de ESOPO.

Algunos de los métodos de manufactura y metrología están limitados por los recursos disponibles o asignados para este proyecto en específico, por lo cual hay que recalcar que la finalidad de este Capítulo, más que escoger los métodos más eficientes, es dar un marco de referencia de lo que existe, lo que es posible y aproximadamente *dónde* nos encontramos dentro de todo este universo.

En particular para ESOPO, se asignó el taller mecánico de precisión del IA-UNAM, el cual además de albergar varios tornos, taladros y fresadoras manuales, tiene la máquina actualmente más importante para ESOPO: una fresadora CNC.

2.2 Manufactura

Manufactura (del latín *manus*, mano, y *factura*, hechura) es una fase de la producción de bienes y productos. Consiste en la transformación de diversas materias primas en productos manufacturados, productos elaborados o productos terminados y listos para su distribución y consumo.

2.2.1 Maquinado de precisión

El maquinado de precisión se refiere a la rama de la manufactura [4] a la cual le atañe la fabricación de bienes y productos con formas complicadas y tolerancias bajas; piezas que serán usadas para máquinas o procesos en donde la precisión de las dimensiones son de suma importancia.

En la instrumentación astronómica la precisión es un requisito fundamental ya que un error que sobrepase las tolerancias del instrumento de medición, puede reflejarse como un error muy grande.



Figura 2.1: *Maquinado de precisión en torno para el molde de un lente de contacto. Los moldes para inyección de plástico o lentes de contacto son de las aplicaciones principales del maquinado de precisión, imagen de Fresnel Technologies ®.*

2.2.2 Procesos de manufactura

Los diferentes procesos de manufactura se pueden clasificar con el fin de entender sus diferencias y propósitos un poco mejor. En la Figura 2.2 vemos una lista común de diferentes procesos clasificados dependiendo de su método de acción, que va relacionado a su aplicación.

Por mucho, el método de desbaste es el más común de todos ellos. Tornos, taladros y fresadoras todos son métodos de desbaste, y con ellos se pueden generar casi cualquier pieza. Los métodos tradicionales de abrasión son principalmente para tratar acabados maquinados con métodos de desbaste e incrementar la calidad superficial. Los métodos no tradicionales tienen aplicaciones mucho más particulares. De particular interés para ESOPO es el método de electroerosión, por su aplicación para la manufactura de los soportes radiales en OSIRIS.

Torneado, careado, refrentado: Torno

Se denomina torno (del latín *tornus*, y este del griego, *giro*, vuelta) a un conjunto de máquinas y herramientas que permiten mecanizar piezas con forma geométrica de revolución (*ie*: sólidos de revolución). Estas máquinas-herramienta operan haciendo girar un pedazo de material (sujeto en el cabezal o fijada entre los puntos) mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento regulado [4] de avance contra la superficie de la pieza, cortando la viruta de acuerdo con las condiciones tecnológicas de mecanizado adecuadas.

Fresado, careado, barrenado: Fresa

Una fresadora es una máquina herramienta utilizada para realizar mecanizados por arranque de viruta mediante el movimiento de una herramienta rotativa de varios filos de corte denominada fresa. Mediante el fresado es posible maquinar materiales como madera, acero, fundición de hierro, metales no férricos y materiales sintéticos [4] en superficies planas o curvas, de ranuras, de dentado, roscas, etc.

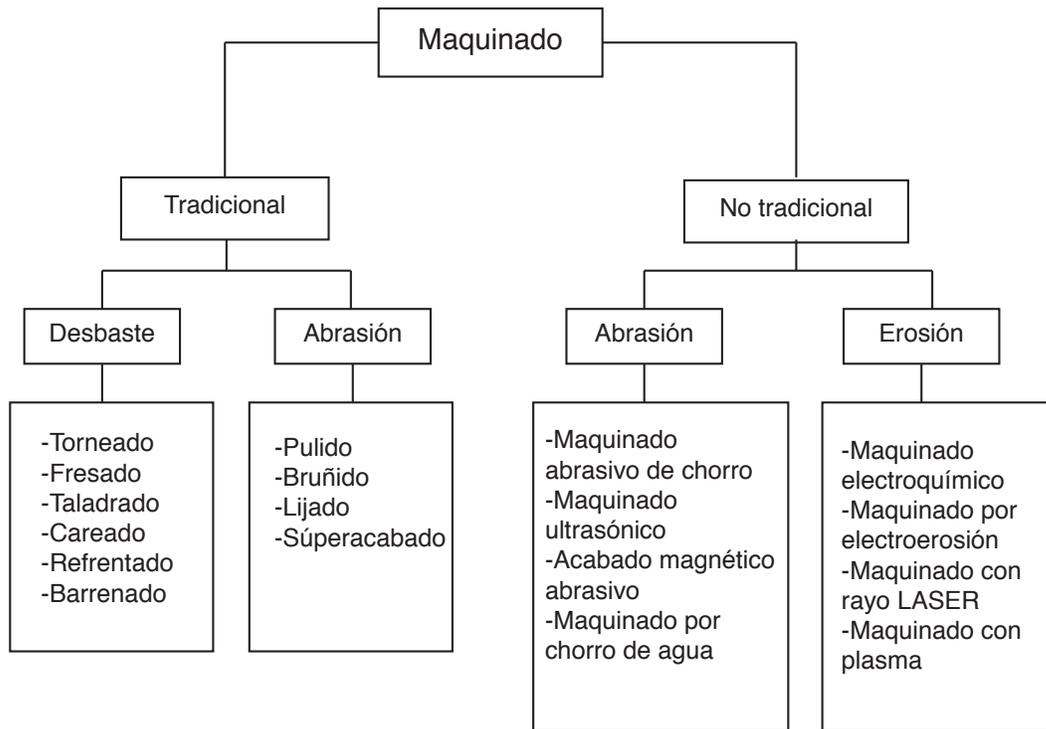


Figura 2.2: Cuadro sinóptico de diferentes procesos de maquinado arreglados por categoría, los más importantes se describen a continuación.

En las fresadoras tradicionales, la pieza se desplaza acercando las zonas a mecanizar a la herramienta, permitiendo obtener formas diversas, desde superficies planas a otras más complejas. La Figura 2.3 muestra un conjunto de cortes posibles con una fresadora.

Electroerosión

La electroerosión es un proceso de manufactura que también es conocido como mecanizado por descarga eléctrica o EDM (que por sus siglas en inglés significa, Electrical Discharge Machining). El proceso de electroerosión consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo. Ambos, pieza

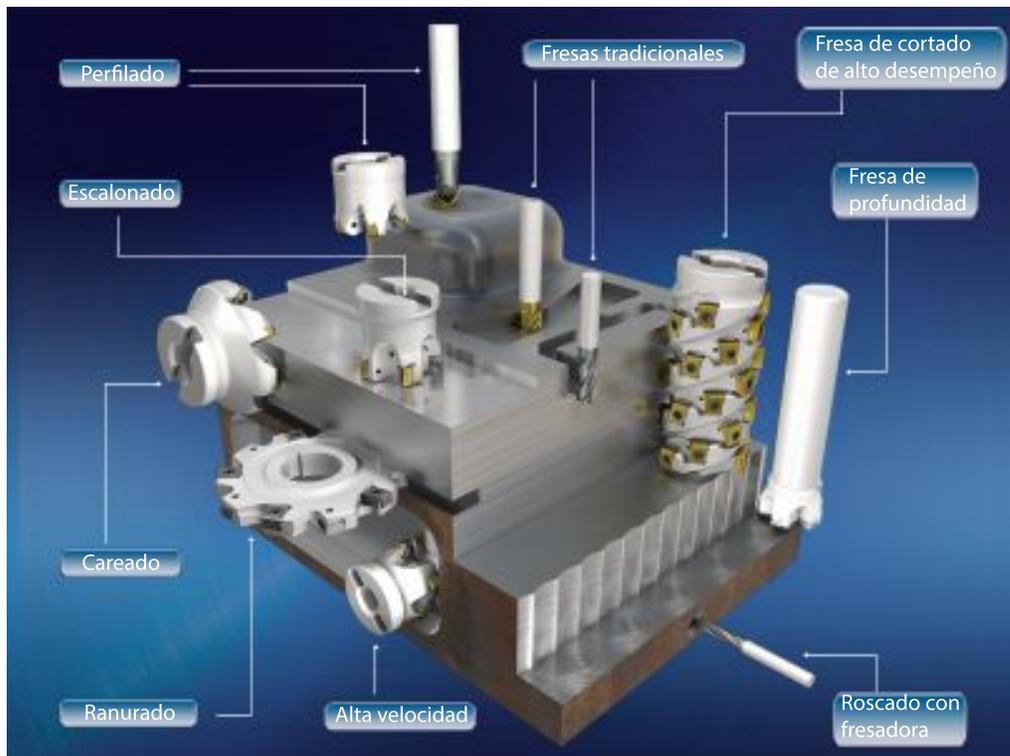


Figura 2.3: *Diferentes tipos de fresas y de cortes, imagen de Valcarb Industrial* ®.

y electrodo, deben ser conductores, para que pueda establecerse el arco eléctrico que provoque el arranque de material. Es un proceso lento y caro, sin embargo también logra altos estándares de precisión.

CNC

El control numérico (CN) [5] es un sistema de automatización de máquinas herramienta que son operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento, en comparación con el mando manual mediante volantes o palancas (como las fresadoras y tornos manuales).

Las primeras máquinas de control numérico se construyeron en los años 1940 y 1950, basadas en las máquinas existentes con motores modificados cuyos mandos se accionaban automáticamente siguiendo las instrucciones dadas en un sistema de tarjeta perforada. Estos servomecanismos iniciales se desarrollaron rápidamente con equipos analógicos y

digitales. El abaratamiento de los microprocesadores ha generalizado la electrónica digital en las máquinas herramienta, lo que dio lugar a la denominación control numérico por computadora, control numérico por computador o control numérico computarizado (CNC) [5]. Estos sistemas han revolucionado la industria debido a la simplificación de la programación de las máquinas CNC y el subsecuente ahorro en horas hombre y aumento de precisión intrínseco que las máquinas operadas por computadora implican.



Figura 2.4: La fresadora CNC del taller de mecánica de precisión del IA-UNAM.

2.2.3 Gestión de Manufactura

Lograr la máxima eficiencia en el proceso de manufactura es imposible sin gestionar los procesos involucrados de manera adecuada. Aunque esta área puede ser muy simple y por mucho tiempo haya sido ignorada, el hecho es que en el caso de la manufactura el orden de los factores *sí* altera el producto. Por ello, hay que definir el orden más eficiente en el que los procesos se llevan a cabo, minimizar la pérdida de material, tener un inventario que garantice el suficiente y adecuado suministro de material para la producción y demás detalles necesarios para llevar una operación controlado y eficiente.

Gestión de procesos de manufactura

Desde los años ochentas, la necesidad por la automatización ha empujado a los maquinadores a invertir billones de dólares en sistemas CAD para ayudar con el diseño de sus productos y sistemas CAM con máquinas CNC [4] para ayudar con la manufactura de dichos productos. La evolución de esto fueron sistemas sofisticados de PDM¹, que agiliza la ejecución de la manufactura, la cadena de abastecimiento y la gestión re recursos empresariales. Hoy en día, estas herramientas son estándares de la industria y la industria de la manufactura invierte en otros lugares para disminuir costos, tiempo de entrega y aumentar la calidad de manufactura.

La gestión de procesos de manufactura o MPM² responde por el área de manufactura que históricamente ha estado más olvidada en los procesos industriales: la planeación y creación del proceso de manufactura *per se*. Mientras que al CAD y PDM le atañe *qué* manufacturar y al MES³ y ERP⁴ le atañe *dónde y cuándo* al MPM le atañe *cómo*. En su máxima expresión, el MPM es una estrategia a nivel organización que permite a multiples usuarios planear el proceso de manufactura y comunicar esta información a todos los involucrados en el proceso.

El MPM permite una integración y compilación de todas las herramientas y procesos que ayudan a la exploración de líneas de producción alternativas; lo cual genera una

¹por sus siglas en inglés: Product Design Management

²por sus siglas en inglés: Manufacturing Product Management

³por sus siglas en inglés: Manufacturing Execution System

⁴por sus siglas en inglés: Enterprise Resource Planning

línea de producción más eficiente, más rápida, y flexible (capaz de llevar a cabo cambios súbitos en el diseño y manufactura).

Planificación

La Planificación es una herramienta importante para la ingeniería y la manufactura, al especificar *cuando* hacer *que*, con que personal y equipo, puede haber un gran impacto en la productividad, costo y tiempo de un proceso.

Actualmente existe software de planificación de producción que puede reconocer patrones por computadora y puede lograr una eficiencia que los métodos manuales no pueden superar. En procesos complejos que involucran cantidades importantes de tiempo y dinero, se puede usar software de planificación en proyecciones a futuro y en el pasado para distribuir recursos humanos y maquinaria del modo más eficiente.

Manufactura asistida por computadora

Con ayuda de métodos CAM se puede tener un nivel de control mejorado para los procesos de maquinado y corte, estimados de tiempo y material y las simulaciones ayudan a generar un estimado del tiempo, costo y material que un producto o proceso implica.

Las herramientas CNC ayudan a una estandarización en tiempos, acabados y remueven la variable humana de naturaleza incierta que un operario humano implica.

Instrucciones de trabajo de piso

Son instrucciones de alto nivel para los operadores, determinan los pasos a seguir hasta tener el producto terminado, consisten en definir; las herramientas a usar, las piezas a manufacturar, la calidad de los acabados y precisión de los maquinados. A este conjunto instrucciones también se le conoce como *Ruta de manufactura*.

Estimación de tiempo y costo

Para obtener un estimado de tiempo y costo confiable: se debe considerar el costo basado en la actividad realizada, utilizar las herramientas de simulación así como la experiencia para generar un estimado del tiempo y crear un organigrama del proceso completo. A todo se le debe de dar un margen de seguridad apropiado.

Control de calidad

Una vez maquinada la pieza, debe comprobarse que las medidas sean las adecuadas. Esto no es un proceso fácil. La calidad del maquinado y el cumplimiento con las especificaciones se debe garantizar, de otro modo el proceso no tiene credibilidad.

Comunicación con otros sistemas

Si el producto debe pasar por otros procesos, se debe considerar como eficientar la transición entre los procesos con el fin de perder la menor cantidad de tiempo, recursos humanos y costo.

2.3 Metrología

La metrología es la ciencia de la medición e incluye todos los aspectos prácticos y teóricos. La palabra viene del griego *metron*, “medir” + *logos*, “discurso, oración, cita, estudio, cálculo, razón”. En la antigua Grecia, el término significaba *teoría de proporciones* [6].

La metrología está definida por el BIPM⁵ como “la ciencia de la medición, que abarca la determinación tanto teórica como experimental a cualquier nivel de incertidumbre en cualquier campo de la ciencia y tecnología”.

⁵por sus siglas en inglés: International Bureau of Weights and Measures

La metrología es un campo muy amplio y se divide en tres actividades básicas [7]:

- Definición de unidades de medición internacionalmente aceptadas.
- Realización en práctica de estas unidades de medición.
- Aplicación de cadenas de rastreo y encadenamiento de mediciones prácticas a estándares de referencia.

y tres subcampos básicos, que utilizan las tres actividades descritas anteriormente:

- Metrología científica o fundamental:
Le concierne el establecimiento de sistemas de cantidad, sistemas de unidades, unidades de medición, el desarrollo de nuevos métodos de medición, realización de estándares de medición.
- Metrología aplicada, técnica o industrial:
Le concierne la aplicación de la metrología científica a la manufactura y otro procesos, así como su uso en la sociedad, garantizando los instrumentos de medición, y su calibración y su control de calidad.
- Metrología legal:
A la metrología legal le conciernen actividades que resultan de requisitos reglamentarios y afectan a la medición, unidades de medición, instrumentos de medición y métodos de medición. Estos requisitos reglamentarios pueden venir de la necesidad de proteger la salud, seguridad pública, el medio ambiente, etc.

2.3.1 Instrumentos de medición tradicionales

En física, química e ingeniería, un instrumento de medición es un aparato que se usa para comparar magnitudes físicas mediante un proceso de medición [4]. Como unidades de medida se utilizan objetos y sucesos previamente establecidos como estándares o patrones y de la medición resulta un número que es la relación entre el objeto de estudio y la unidad de referencia. Los instrumentos de medición son el medio por el que se hace esta conversión. En palabras más simples: medir es comparar.

Los instrumentos más usados para medir piezas manufacturadas son básicamente medidores de longitud.



Figura 2.5: Un micrómetro de exteriores. Este tipo de instrumento, como su nombre lo indica, es capaz de medir hasta micrómetros.

- Vernier

El Vernier, es un instrumento utilizado para medir dimensiones de objetos relativamente pequeños, desde centímetros hasta fracciones de milímetros ($1/10$ de milímetro, $1/20$ de milímetro, $1/50$ de milímetro). En la escala de las pulgadas tiene divisiones equivalentes a $1/16$ de pulgada y de $1/128$ de pulgada.

- Reloj comparador

Un reloj comparador o comparador de cuadrante es un instrumento de medición de dimensiones que se utiliza para comparar cotas mediante la medición indirecta del desplazamiento de una punta de contacto esférica cuando el aparato está fijo en un soporte.

- Micrómetro

El micrómetro, calibre Palmer o simplemente palmer es un instrumento de medición cuyo nombre deriva etimológicamente de las palabras griegas (*micros*, pequeño) y (*metron*, medición); su funcionamiento se basa en un tornillo micrométrico que sirve para valorar el tamaño de un objeto con gran precisión, en un rango del orden de centésimas o de milésimas de milímetro, 0.01 mm ó 0.001 mm respectivamente.

2.3.2 Máquina de medición por coordenadas

Hay piezas con geometría muy complicada o con tolerancias tan pequeñas que los instrumentos tradicionales para medir longitudes no son suficientes. En estos casos, la solución suele ser alguna máquina controlada por computadora.

Una Máquina de Medición por Coordenadas, máquina de medición tridimensional o CMM (del inglés Coordinate-measuring machine) es un instrumento de medición directa que utilizan un puntero o *palpador* físico con el que el operador puede ir tocando el objeto y enviando coordenadas a un fichero de dibujo. El puntero puede ir unido al sistema de registro de coordenadas mediante un brazo o codificador, o puede ser localizado y *trazado* por un sistema óptico (también hay sistemas que utilizan video aunque los más comunes y eficientes son los rastreadores basados en láser llamados *laser-trackers*).



Figura 2.6: Una máquina de medición por coordenadas con una mesa de granito.

Para piezas con geometría compleja, estas son las máquinas más indicadas, ya que se puede medir casi cualquier cosa, desde profundidad, excentricidad, paralelismo y dimensiones. Los resultados se obtienen como coordenadas, lo cual también facilita su uso para fines científicos, ya que se puede utilizar en conjunto con un sistema CAD o incluso comprar con el código máquina de una herramienta CNC [5].

2.4 Integración, aceptación y puesta en marcha

2.4.1 Integración

La integración es la última parte del proceso de manufactura. Se define como el proceso de juntar todos los componentes o sub-sistemas en un sólo sistema, y cerciorarse de tanto el sistema, como los sub-sistemas funcionen correctamente. En palabras coloquiales, se trata del ensamblaje y puesta en marcha del sistema.

Integrar es un proceso difícil y requiere de diversos conocimientos (es multi-disciplinario por naturaleza). En sistemas mecánicos no es raro que el integrador tenga que modificar algunas piezas para lograr el ensamble correcto, si se trata de un sistema electro-mecánico o computacional, es probable que haya que modificar tanto en software como hardware para lograr una integración correcta. El perfil multi-disciplinario necesario para integrar sistemas grandes (*ie*: un espectrógrafo, un satélite, etc) no es fácil de encontrar ni de generar.

2.4.2 Aceptación

La aceptación consiste en la entrega y recepción final del producto, ya sea en el laboratorio o por el cliente final en el observatorio. En ambos casos, involucra probar el sistema y sub-sistemas para corroborar que funciona correctamente y dentro de las especificaciones establecidas.

El costo de operación del 2.1 metros de SPM es de alrededor de MEX\$ 30,000 por noche, por lo que perder varias noches con pruebas en el instrumento no es conveniente. De allí que primero se realice la aceptación en un laboratorio.

2.4.3 Puesta en marcha

Una vez ensamblado el sistema (a nivel software y/o hardware) y con todos los sub-sistemas plenamente funcionando, comienza el proceso de la puesta en marcha. Este consiste en calibrar, configurar y arrancar el sistema hasta alcanzar las condiciones de trabajo.

En algunos casos excepcionales (como en el Gran Telescopio Milimétrico), este proceso puede durar años y ser más tardado que el diseño y la manufactura. En muchos otros casos, este es el proceso que define la funcionalidad final del proyecto. La funcionalidad del sistema depende tanto de la eficiencia de su integración, como de la velocidad con que se integra.

Trabajos similares

Como parte del trabajo de una tesis es indispensable enmarcarla en un campo de referencia de trabajos similares. De esta manera se pueden lograr mejores y novedosas aportaciones. Es importante recordar cuando se hace un trabajo tan extenso como es el de una tesis, que el punto de vista del autor suele ser el más parcial (o dicho de otro modo, el peor) por ello, ver otros trabajos y soluciones es un trabajo importante.

Hay mucho que aprender de los trabajos anteriores en cualquier disciplina, como lo dice Bernard de Chartres, un filósofo francés del siglo XII: *...nosotros somos como enanos parados en los hombros de gigantes, y por ello somos capaces de ver más y más lejos que ellos. No por la capacidad de nuestra visión o el tamaño de nuestros cuerpos, sino porque nos carga y nos eleva la magnitud de los gigantes.* Evidentemente, nosotros no somos más que enanos, y todos los científicos anteriores que han hecho de la ciencia lo que es hoy, son los gigantes.

2.5 SOPHIE

SOPHIE es un espectrógrafo echelle alimentado por fibra óptica [8] que opera desde Octubre del 2006 en el telescopio de 1.93 m del observatorio de *Haute Provence*. Beneficiados con la experiencia de HARPS (*High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher*: buscador de planetas por velocidad radial de alta precisión)⁶, SOPHIE se diseñó para obtener velocidades radiales precisas (3 m/s a lo largo de varios meses) con un rendimiento óptico diez veces más alto que el de ELODIE [8] (el espectrógrafo echelle al que SOPHIE reemplazó). Estas grandes capacidades han sido muy importantes para la astrosismología y la exoplanetología.

⁶HARPS está montado en el 3.6 m de la European Space O

Es un espectrógrafo Schmidt echelle de doble paso acoplado por fibra óptica de alta eficiencia. Todo el diseño óptico está orientado a beneficiar la estabilidad del *spectra* a largo plazo y el rendimiento de la siguiente manera: La luz que sale del acoplamiento óptico se colima por un espejo esférico y después de que se re-dirige con un espejo plano, llega a la cámara Schmidt en donde la dispersion principal se lleva a cabo por la rejilla echelle y la dispersion cruzada por un prisma en doble paso (ver Figura :2.7). El haz dispersado y colimado se refleja en otro espejo plano para luego enfocarse con un espejo esférico para finalmente formar una imagen en el CCD [8].

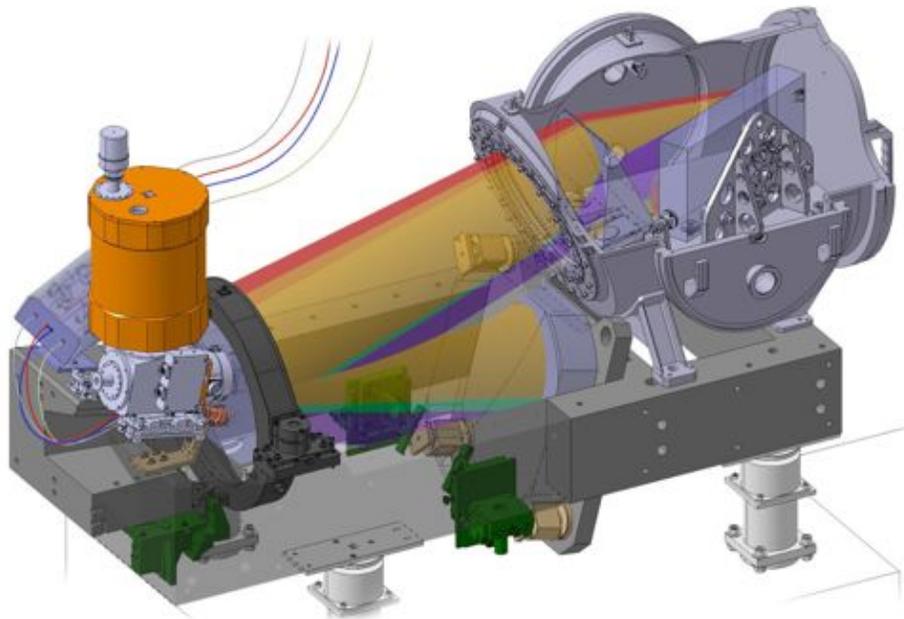


Figura 2.7: *El espectrógrafo SOPHIE, instalado en el telescopio 1.93 m del observatorio de Haute-Provence. Un espectrógrafo Schmidt echelle con un dispersor cruzado, el haz es colimado y re-enfocado por un espejo esférico.*

El espectrógrafo está instalado en el cuarto *Coudé* en el edificio del telescopio de 1.93 m, minimizando la longitud de la fibra óptica de 25 m a 17 m a comparación de ELODIE. Todo el instrumento está montado sobre amortiguadores que a su vez son soportados por la estructura del pilar del telescopio para evitar vibraciones. El único elemento

que se mueve, un obturador con un mecanismo electro-magnético de apertura rápida (10 ms) [8], ha sido amortiguado cuidadosamente para evitar cualquier transmisión de vibraciones sobre la mesa de granito.

La termalización es un punto clave para el nivel de exactitud deseado, una estrategia de tres pasos se uso:

- El espectrógrafo está instalado en una caja térmicamente controlada y aislada de $2.1 \times 0.85 \times 1.2 \text{ m}^3$ con una estabilidad térmica diaria mejor a $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$, esto dentro un cuarto con temperatura controlado en dos etapas de $3 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ a 21°C .
- Hasta 20 sensores de temperatura están distribuidos en el instrumento para medir variaciones y uno de ellos se usa para la regulación fina.
- Todos los elementos potencialmente perturbadores (el CCD con su criostato, el obturador mecánico y el foto-multiplicador) están fuera de la caja. El llenado diario de N^2 para enfriar el CCD a $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ se hace desde fuera del cuarto con temperatura controlada para evitar otras perturbaciones.

El espectrógrafo SOPHIE cumple con todos los objetivos y especificaciones que se fijaron al principio del programa. En rendimiento óptico de SOPHIE es mejor que el de ELODIE [8] por 2.5 magnitudes y la estabilidad intrínseca se mejoró por un factor de entre 10 y 20. La precisión de la velocidad radial que se obtiene en estrellas estables es de 3-4 m/s a lo largo de varios meses, la limitante es el efecto de guiado y centrado en la entrada de fibra del telescopio en el plano focal. Se está trabajando en diseñar un nuevo adaptador de fibra Cassegrain que incluya un sistema de guiado de alta precisión con la meta de llegar a precisiones de 1 m/s [8].

2.5.1 Observaciones

Mecánicamente, SOPHIE es fundamentalmente diferente a ESOPO por que no está directamente montado sobre el telescopio, lo cual hace que las especificaciones mecánicas sean más holgadas. Por ello, el acoplamiento óptico de SOPHIE es a través de fibra óptica, en contraste con el acoplamiento directo de ESOPO, que tiene menos pérdidas.

Los requerimientos térmicos de ESOPO son mucho menores, ya que no está completamente embebido en un crióstato ni requiere de estabilidad térmica estricta. Aunque no hay detalles específicos sobre su manufactura, es evidente que en algunas cosas (*eg*: requerimientos térmicos) SOPHIE es más complejo que ESOPO, sin embargo, en lo que a óptica se refiere, ESOPO es más elaborado (*eg*: Tiene dos brazos con dos cámaras). El utilizar fibras requiere de un menor número de componentes ópticos. Es importante recalcar que el propósito científico de SOPHIE también es diferente al de ESOPO y de ahí nacen sus principales diferencias.

2.6 Espectrógrafo de fibra PMAS: diseño, manufactura y desempeño

El espectrofotómetro de multi-apertura de Potsdam (PMAS, por sus siglas en inglés *Potsdam multi-aperture spectrophotometre*) es un espectrógrafo (IJV visual integral) [9] de campo diseñado para trabajar con diferentes telescopios. Está basado en un espectrógrafo de fibra dedicado con un nuevo sistema cámara-colimador totalmente dióptico. El sistema óptico se optimizó específicamente (en términos de estabilidad y eficiencia) para una entrada óptica de fibra.

La manufactura de la óptica del colimador y la cámara se sub-contrató a Carl Zeiss Jena GmbH en Alemania [9], incluyendo la localización y compra de los materiales, manufactura y pruebas de las lentes así como la manufactura de los soportes de los lentes. Sólo el pulido asférico de dos lentes se hizo en Oberkochen.

El proceso de fabricación se hizo paso a paso con computaciones de diseño óptico intermitentes en puntos críticos. Los soportes presentaron un particular reto porque requerían tolerancias estrechas y el esfuerzo mecánico ocasionado por la gravedad y los requerimientos térmicos presentaron algunos problemas. Dado que el espectrógrafo se mueve con el seguimiento del telescopio, la disposición de la estructura debe ser más rígida que si estuviera estático. La alineación de los lentes se hizo con un método desarrollado por Zeiss que garantiza que el eje óptico este óptimamente alineado con el perímetro exterior de la celda[9].

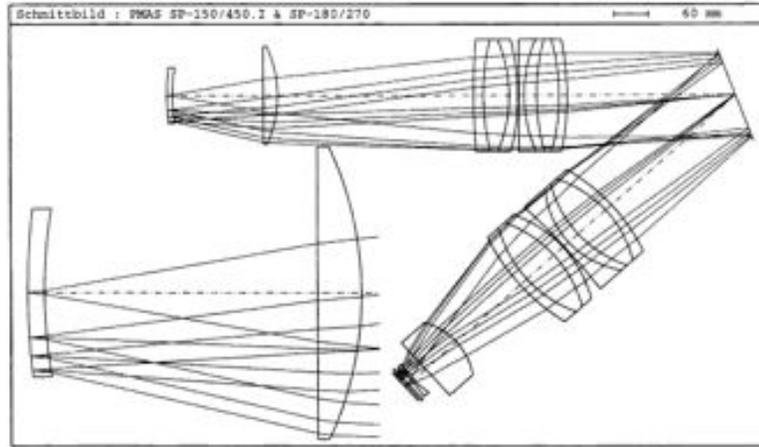


Figura 2.8: Disposición final de espectrógrafo PMAS, con aumento de la entrada de fibra óptica.

Las metas de diseño para la óptica del espectrógrafo se cumplen. El siguiente paso en el desarrollo consiste en la integración del subsistema de fibra del espectrógrafo, incluyendo el sistema del detector y por ultimo, las pruebas del sistema completo.

2.6.1 Observaciones

La diferencia principal entre ESOPO y PMAS es que el segundo está diseñado para funcionar con cualquier telescopio (con montura de fibra óptica). Lo cual crea un instrumento mucho más versátil, pero limitado en cuanto a su desempeño, es decir; un espectrógrafo dedicado siempre tendrá especificaciones de mayor nivel. Sin embargo, el hecho de poder utilizarlo en cualquier telescopio lo hace un proyecto muy interesante y atractivo.

En lo referente a la mecánica y manufactura, es semejante a la de cualquier otro instrumento que se mueva junto con el seguimiento del telescopio, con las restricciones optomecánicas que ello conlleva. Sin embargo, nada del trabajo se hizo *en casa* por lo que es difícil obtener detalles sobre las técnicas de manufactura.

El sistema utilizado para la alineación final de las lentes internas de PMAS es la aplicación más directa hacia ESOPPO, sin embargo el acoplamiento al telescopio es muy diferente cuando se trata de un instrumento con entrada óptica de fibra.

2.7 X-Shooter

X-shooter, el primer instrumento de segunda generación del VLT (inglés para *Very Large Telescope*[10], en español: telescopio muy grande), es un nuevo espectrógrafo echelle de alta eficiencia. X-shooter opera en el foco Cassegrain y cubre un rango espectral excepcionalmente alto (de 300 a 2500 nm) en una misma exposición, con una potencia de resolución espectral R 5000. El instrumento consiste de una estructura central y tres espectrógrafos echelle de prismas dispersados cruzados optimizados para longitudes de onda Azul-UV, visible y cercano a IR. El diseño del brazo cercano a IR del instrumento X-shooter utiliza métodos de diseño y técnicas de manufactura muy avanzadas. Un sistema integrado de diseño se hizo a temperaturas de operación criogénicas y se trato de lograr una integración casi sin alineamiento.

El método de reducción drástica de peso Astron se uso para lograr alta rigidez con una masa baja. El Aluminio crudo de los espejos se post-pule a calidad de espejo óptico, conservando con precisión su forma en condiciones criogénicas. Soportes ópticos criogénicos compensan por diferencias de expansión térmicas de diferentes materiales, mientras garantizan un contacto térmico alto. En este extracto se muestra algo del diseño y las avanzadas técnicas usadas para la construcción de X-shooter.

Diseño a temperaturas de operación criogénicas

En un diseño monolítico, todos los componentes, incluyendo la estructura mecánica y los espejos ópticos, se hacen del mismo material [10] (Al.6061-T6). La manufactura, ensamble y alineado de la opto-mecánica se hacen a temperatura ambiente. Debido al coeficiente de expansión térmica del aluminio, toda la estructura se encoge por 3.4 mm [10] cuando el instrumento se enfría a la temperatura de operación criogénica. Dado que *todo* el instrumento está hecho del mismo material [10], todo los soportes, estructuras y hasta el radio de los espejos se encoge el mismo porcentaje. El resultado neto es que el cambio de temperatura no tiene efectos ópticos.

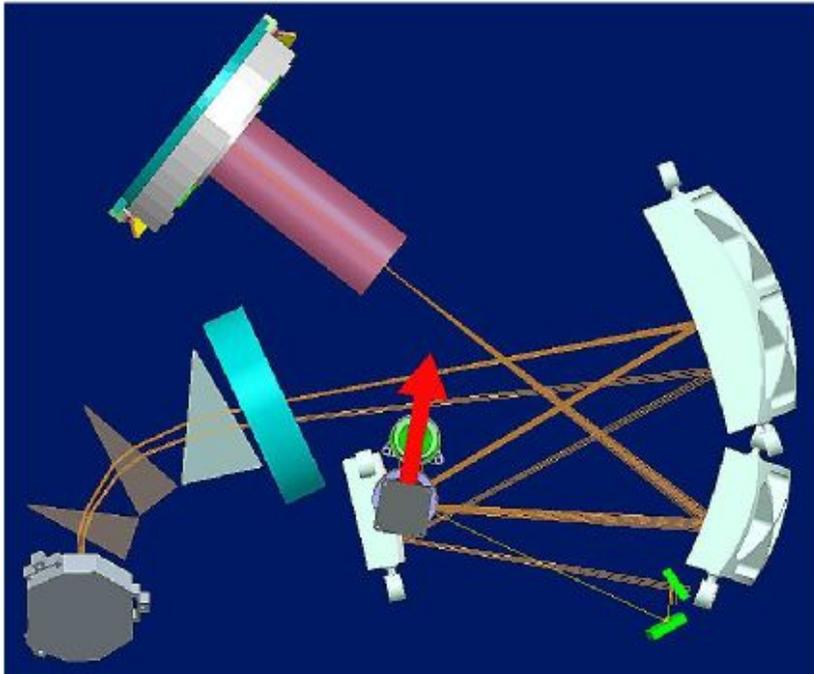


Figura 2.9: *El diseño óptico de X-shooter cercano a IR. El foco Cassegrain se marca con una flecha roja en el centro. La hendidura se encuentra en la parte inferior derecha. El haz de luz pasa por dos espejos colimadores (superior derecha) y entra a la caja de dispersion (izquierda) que consiste de tres prismas y una rejilla echelle. La luz pasa por el colimador una vez más, entra a la cámara e incide en el detector (superior izquierda).*

Cuando no todos los materiales son iguales, la filosofía de diseño monolítica no funciona y para las rejillas, esto sucede, aunque el material usado sea el mismo. Siempre se encogerá o expandirá el elemento óptico en relación a sus puntos de apoyo y cuando esto pase, los puntos de apoyo deben tener algún tipo de resorte o damper que garantice el correcto posicionamiento cuando se enfríe o caliente el sistema. En estos casos se debe trabajar con un diseño frío y uno caliente, el diseño frío es para la operación a temperaturas criogénicas y el caliente para manufactura, integración y alineación a temperatura ambiente, esto es vital dado que alinear, manufacturar e integrar en un ambiente criogénico es virtualmente imposible[10]. Este dato está directamente relacionado a la integración de ESOPO.

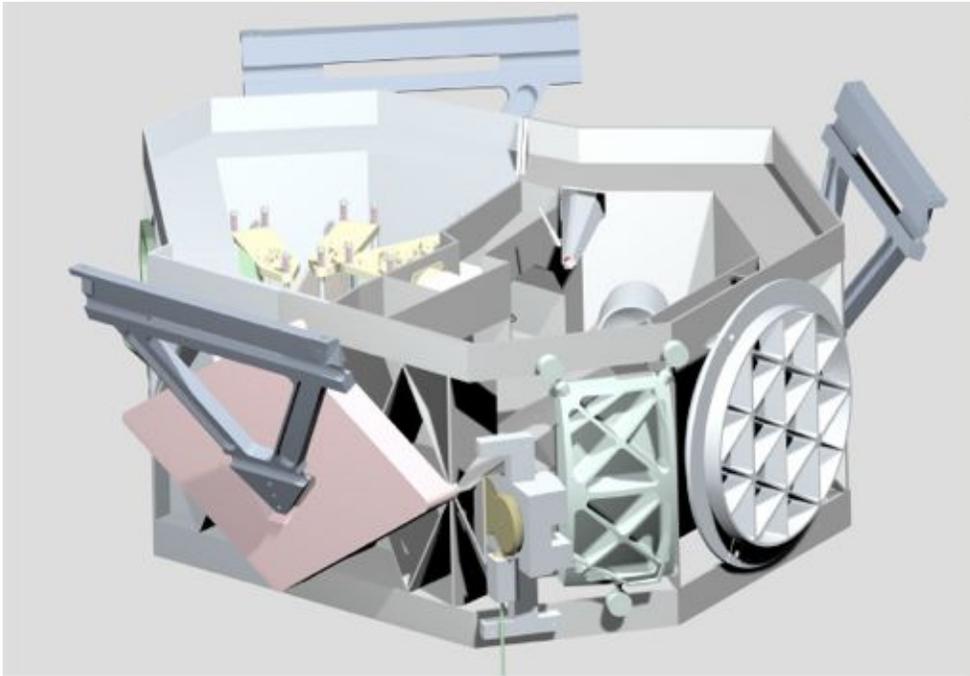


Figura 2.10: La caja de óptica cercana al IR, con su suspensión de tres puntos (triángulos). El espejo colimador principal está del lado derecho, con su parte posterior aligerada. El brazo de equilibrio con aligerado Astron es el diamante de la izquierda, unido al triángulo de la suspensión. La óptica caliente no se muestra.

Astron, aligerado extremo

Debido a requerimientos ópticos estrictos, la deformación elástica (local y global) permitida en la caja fría es muy pequeña, lo cual necesita un diseño muy rígido con poco peso[10]. Se usa una montura de suspensión isoestática de tres puntos para minimizar las deformaciones por fuerzas externas, sin embargo esto no es favorable para las deformación de la caja debido a su propio peso. Un sistema de cuatro puntos es dos veces mejor en este sentido. Para aprovechar los beneficios de los dos sistemas, se le agrega un cuarto elemento para tener una montura de tres puntos externa y una de cuatro puntos adentro de la caja fría. A este elemento se la llama *brazo de equilibrio*[10] y es extremadamente rígido con una masa despreciable.

Ello se logra con la técnica Astron de aligerado extremo, que resulta en mucha rigidez al mantener las superficies anteriores y posteriores del material. Estas formas estructura-

les se hicieron con maquinas de producción comerciales. Comparada con otras técnicas populares de aligerado, esta nueva técnica permite aligerar hasta por un 90 %, con mejoras en rigidez al doblado y torsión de más del 50 %. [10]

Un alto nivel de aligerado requiere de un control completo de cinco grados de libertad en una fresadora, en donde se *sacan* amplios volúmenes internos (o bolsas), maquinando a través de pequeños hoyos de entrada. El siguiente paso es sacar otras bolsas por otros lados de tal forma que se forme un estructura eficiente que cumpla con los requisitos del diseño tales como tamaño, peso, rigidez y fuerza. La posibilidad de crear paredes más delgadas (0.3 mm) que con otros métodos hace que sea aún más eficiente. Costillas exteriores extras se pueden dejar para mejorar la rigidez como se ve en la Figura 2.11.

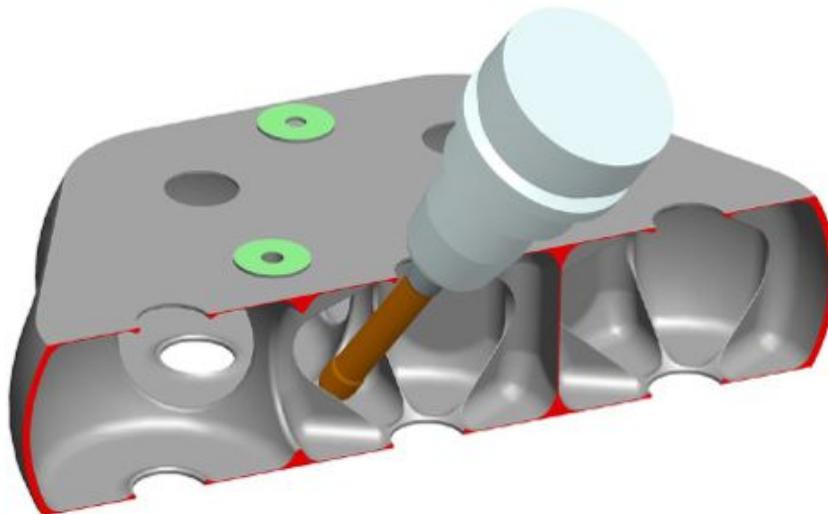


Figura 2.11: *Con la técnica de aligerado extremo Astron, se crean grandes bolsas maquinando a través de pequeños hoyos. La disminución de peso y el incremento en rigidez son notables. Las costillas adentro de las bolsas aumentan la rigidez.*

Post-pulido de espejos de aluminio

El espejo más grande utilizado en el espectrógrafo X-shooter cercano a IR es de 300 mm de diámetro, como todos los espejos en la caja fría está aligerado con técnicas tradicionales (espalda abierta) para reducir su masa.

Además un tratamiento térmico elaborado se usa para minimizar la deformación global con el tiempo de todos los espejos y las rejillas, no así para la estructura mecánica. En condiciones normales, se agrega una capa de nickel de alrededor de 30 micras al espejo de aluminio y posteriormente se pule, lo cual produce un efecto bimetálico[10] debido a la diferencia de los coeficientes de expansión térmica. Otra opción es el torneado de diamante en aluminio crudo, pero esto causa un efecto de rejilla en la superficie y se pierde algo de luz. Para X-shooter se desarrolló una técnica de torneado con diamante y post-pulido a calidad óptica, lo cual genera muy pocas deformaciones en condiciones criogénicas sin el efecto de rejilla.

2.7.1 Observaciones

X-shooter logra cumplir de manera muy efectiva y novedosa con muchos requerimientos típicos de la instrumentación astronómica que a primera vista parecen contradictorios. Un caso excepcional es el de la técnica Astron⁷, que trabaja al límite de maquinas CNC de 5 ejes y logra una reducción en peso comparable a utilizar algún material compuesto (*eg*: fibra de carbono) sin los problemas por diferenciales de coeficiente de expansión térmica, durabilidad, confiabilidad o exactitud.

Por otro lado, la filosofía de diseño monolítica es algo de lo que podemos aprender mucho. En ESOPO hay algunos anillos de interfaz cuya única función es la de compensar por los diferentes coeficientes de expansión térmica. Aunque un diseño así es potencialmente mucho más caro, el costo ahorrado en tiempo de entrega, instalación y calibración puede compensar.

Otra técnica interesante, es la de manejar un diseño *caliente* y uno *frío*, para poder diseñar, manufacturar, integrar y calibrar a temperatura ambiente y saber exactamente como reaccionará a la temperatura de operación. Esto no aplica tan directamente a ESOPO pues al no estar hecho para IR o cercano a IR, trabaja a temperatura ambiente.

⁷Desde su implementación, el método Astron ya está en tramites de patente.

Las turbulencias que ocasionan los gradientes térmicos son tan negativas [11] para el diseño y operación de un espectrógrafo, que por eso se llegan a extremos como este, o el compensador térmico pasivo de ESOPO (ver Capítulo 5), sólo para evitarlos.

2.8 OSIRIS

Los instrumentos ópticos para instrumentación científica frecuentemente incluyen lentes con requerimientos mecánicos críticos, problemas con posición y rotación están íntimamente ligados a la eficiencia del instrumento [12]. En este trabajo se describo el diseño optomecánico, manufactura, ensamble e integración del barril de la cámara del espectrógrafo OSIRIS para el gran telescopio canarias. El barril fue desarrollado por el IA-UNAM en colaboración con el Instituto de Astrofísica de Canarias, en España. El barril de la cámara, incluye un juego de 8 lentes con sus respectivos soportes y celdas, así como dos compensadores, la unidad de enfoque y la unidad de desplazamiento pasiva, que utiliza el tercer doblete como un compensador térmica para mantener la longitud focal de la cámara y su calidad de imagen aún con cambios en la temperatura ambiente. Los componentes de la cámara, cálculos analíticos, simulaciones por el método de elementos finitos y presupuesto de error se describen en el trabajo. El proceso iterativo de las etapas optomecánicas para el desarrollo de la cámara también se resumen y verifican. Finalmente se proveen notas acerca de la fabricación, metrología, ensamble e integración y guías para futuros desarrollos en optomecánica. (*Es importante notar, que operativamente, OSIRIS es el antecesor de ESOPO.*)

2.8.1 Descripción general del barril de la cámara

En el ensamble completo del barril se puede ver en la Figura 2.13. Es un diseño modular que permite ensamblar y desensamblar fácilmente. Cada sub-juego de lentes está contenido en su celda individual. Para lograr alta eficiencia a la hora del armado, cada lente puede ser acezado sin desensamblar la cámara entera. El barril de la cámara está ensamblado con tornillos y tuercas y la respetabilidad del proceso de desensamble se logra gracias a las superficies de referencia.

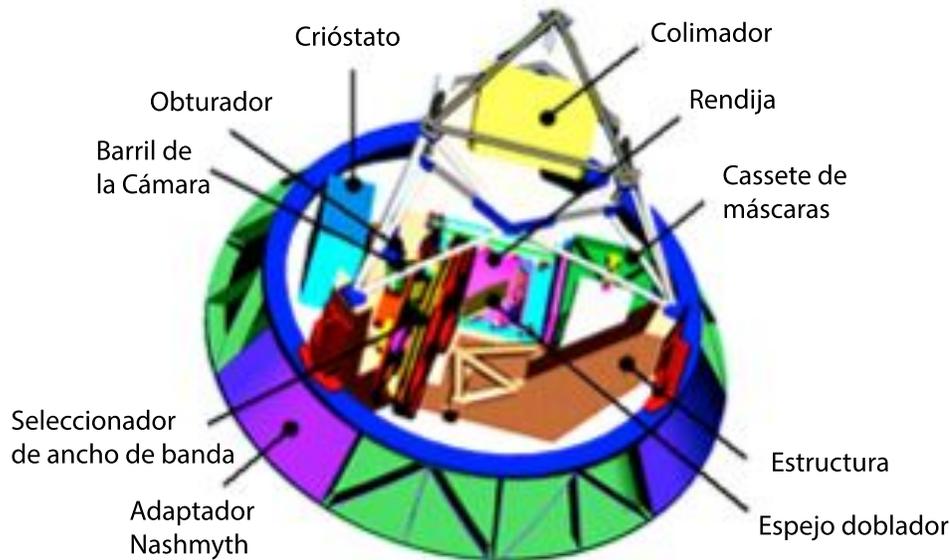


Figura 2.12: Vista general de OSIRIS, incluyendo todos los sistemas principales y el barril de la cámara.

El concepto de los soportes radiales, mostrados en la Figura 2.14, consiste en un juego de muelles en un arreglo circular con tres superficies planas (en contacto directo con la lente) que centran iso-estáticamente la lente con respecto al eje mecánico de la celda. Adicionalmente hay tres superficies curvas en la celda, de un componente que se manufactura de una sola pieza. Este componente no requiere calibración adicional. La posición de la lente es referenciada a tres filos mecánicos a manera de tope. Para absorber esfuerzos térmicos y precargar el sistema se adjunta un O-ring la superficie de la lente. Todos los mecanismos van atornillados a un torque específico bien controlado, los esfuerzos residuales se analizan por el método de los elementos finitos.

2.8.2 Integración

Durante la etapa de diseño optomecánico, varias temperaturas deben considerarse, específicamente las temperaturas de diseño, ensamble y manufactura, estas temperaturas

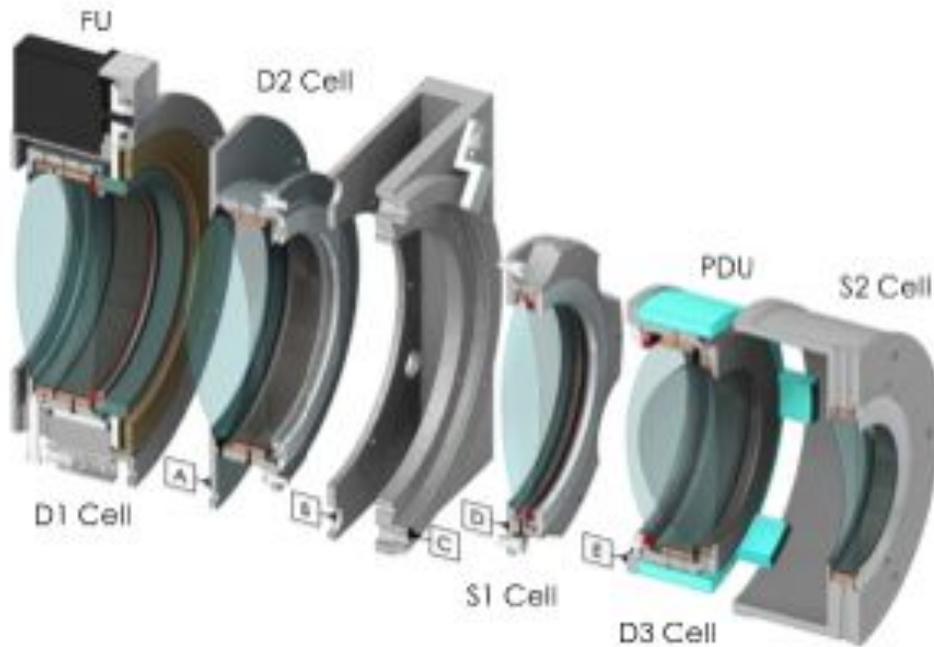


Figura 2.13: Vista general del barril de la cámara de OSIRIS, las letras A, B, C, D y E indican la superficie de referencia. La letra C es la referencia axial.

se establecieron con un acuerdo entre las diferentes instituciones que participan en el proyecto, ya que es importante que cumpliera con las condiciones tanto del área de manufactura, como del lugar de ensamble y de observación.

Los soportes radiales se manufacturan con electroerosión controlada numéricamente (CNC), de este modo, los esfuerzos que actúan en el material debido a las herramientas son mínimos y la deformación elástica en el maquinado se evita. Estas consideraciones son muy importantes para el presupuesto de error. Cabe resaltar que el costo de este procedimiento es más alto que el de un maquinado convencional. Sin embargo, la tolerancia entre los soportes radiales y la cámara era de $10\ \mu\text{m}$ y fue necesario implementar el proceso para todos los soportes radiales.

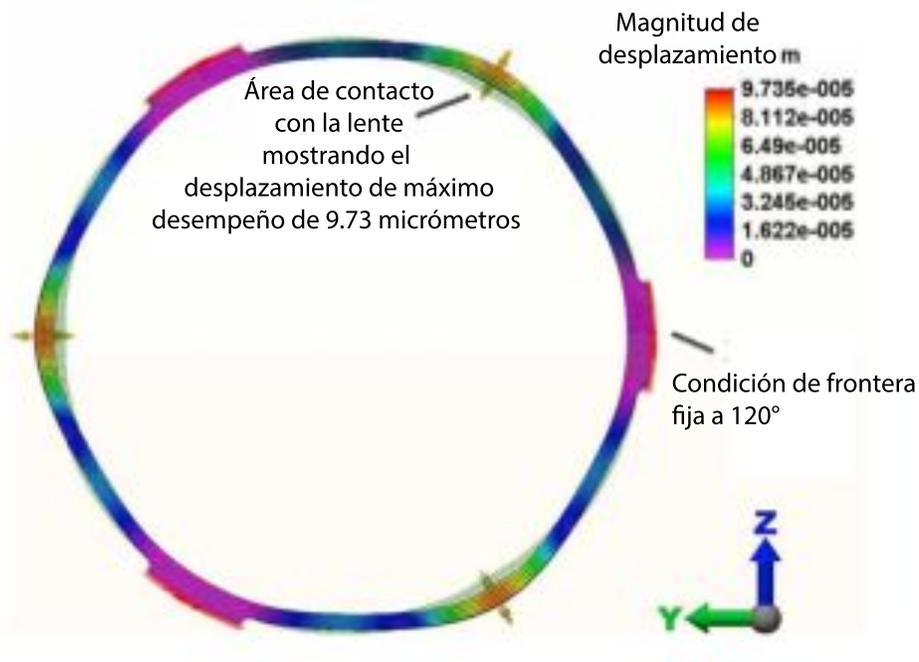


Figura 2.14: Ejemplo de soporte radial bajo el esfuerzo de los tornillos que jalan las muelles en tracción.

2.8.3 Mediciones optomecánicas

En el barril de la cámara, el filo mecánico es la referencia más fácil y más adecuada para obtener una posición axial de las lentes. Estos fillos nos permiten posicionar los vértices de los lentes con tolerancias menores a $2 \mu m$ en relación a su propia celda.

El presupuesto de error de la unidad de enfoque incluía el filo mecánico medido desde su referencia y su desempeño mecánico a lo largo de toda la ruta óptica. Una vez que el mecanismo estuvo armado, se sometió a varias pruebas, de precisión respetabilidad y paralelismo, en un cuarto con temperatura y humedad controlada.

Los resultados de dichas pruebas mostraron que el presupuesto de error para descentrado se satisfizo y que de modo muy interesante la acumulación de errores minimizó el error final. Las pruebas finales del instrumento se hicieron con OSIRIS montado en el Gran Telescopio Canarias de modo exitoso.

2.8.4 Observaciones

En mucho sentidos, ESOPO es heredero de OSIRIS, el equipo del IA-UNAM que trabajó en OSIRIS es prácticamente el mismo que trabaja en ESOPO, esto naturalmente excluye al equipo español. ESOPO es un instrumento mucho más pequeño, pero la influencia se puede ver claramente en el diseño modular de las celdas, las diferentes temperaturas de diseño, ensamble y operación y los soportes radiales.

Las experiencias de manufactura y metrología de OSIRIS se han aplicado muy directamente a ESOPO, sin embargo una de las diferencias clave entre es que la manufactura de ESOPO se hizo *in situ*. Lo cual permite un control de calidad un poco afinado y directo, pues se tiene contacto directo con el fabricante. Por otro lado, usando técnicas innovadoras de manufactura se ha logrado hacer los soportes radiales en la fresadora CNC en lugar de la máquina de electroerosión. Esta combinación de hechos bajan los tiempos de espera y los costos de producción significativamente, lo cual permite tener al instrumento trabajando en un tiempo menor.

Capítulo 3

Elementos de diseño auxiliares

En este Capítulo se presentan tres elementos auxiliares al desarrollo final del producto, ninguno es parte *per se* de ESOPPO, sin embargo todos son auxiliares al diseño y manufactura del instrumento.

Los elementos auxiliares son los siguientes:

- MUAC: Esta montura se diseño y manufacturo con el fin de incrementar la eficiencia en las transiciones del maquinado.
- UDP: La unidad de desplazamiento pasiva es el único elemento auxiliar que se encuentra dentro ESOPPO, es una unidad de enfoque que funciona con cambios en los coeficientes de expansión térmica.

3.1 *MUAC*: Montura Universal de Auto Centrado

Debido al gran número de celdas, su gran variedad de diseños y la limitante de tiempo que existía al momento de comenzar el proyecto, se observo la necesidad de facilitar la calibración del cero maquina en la CNC e incrementar la eficiencia de las transiciones entre la CNC y el torno. De allí nació la primera necesidad de una montura universal con capacidad de auto centrado; se le bautizó como la *MUAC*: Montura Universal de Auto Centrado.

3.1.1 Definición del problema

El número de piezas diferentes a maquinarse, los varios maquinados y las referencias de maquinado requeridas para cada una, la necesidad de usar más de una maquina herramienta y la necesidad adicional de calibrar y definir el cero pieza para todas las celdas; todo esto aunado al tiempo limitado para la producción, crean la necesidad de una *solución* que ayude a aumentar la eficiencia en estos procesos así como en cada una de sus respectivas transiciones.

De modo más concreto:

- Son 33 piezas con diferentes características y especificaciones; la cadena de manufactura debe estar enfocada a poder cambiar de material, herramientas y de pieza rápidamente.
- Los procesos de maquinado se hacen en una fresadora CNC y en un torno manual; se debe buscar un método para eficientar la transición del torno a la fresadora y perder el mínimo tiempo en montar y calibrar (definir el cero pieza).
- Las tolerancias propuestas deberán ser verificadas durante los procesos de manufactura y una vez terminada. Por esta razón, es conveniente proponer elementos y compensadores que garanticen durante el proceso de fabricación e integración las mismas.

3.1.2 Soluciones semejantes

Hay varias maneras de sostener el material una vez que se encuentra en la bancada de trabajo de la fresadora, las cuales tienen diferentes cualidades y por ende diferentes usos. El denominador común es que para poder maquinar la pieza bajo especificaciones, esta no debe moverse, lo cual es vital para el maquinado considerando las tolerancias. Dependiendo de la naturaleza del proceso, habrá métodos más eficientes para sostener piezas muy largas, muy delgadas o muy pequeñas. Como se muestra en la Figura ?? con breves descripciones e imágenes a continuación:

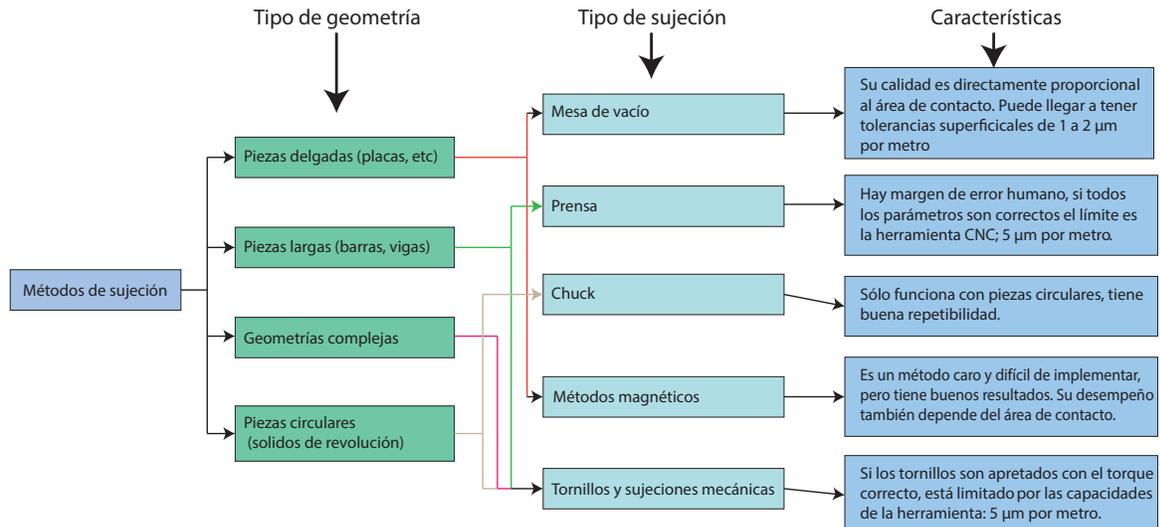


Figura 3.1: *Diferentes métodos de sujeción aptos para CNC.*

Prensa

La prensa (ver Figura 3.2) es especialmente útil cuando se fabrican piezas diferentes con un grosor aceptable. Hay piezas que no son aptas para montarse sobre una prensa: Por ejemplo, una pieza delgada con acabados de alta precisión se puede deformar al montarse en la prensa. No tiene buena repetibilidad con métodos convencionales.

Mesa de vacío

La sujeción por vacío (ver Figura 3.3) es excelente para detener piezas planas en maquinados ligeros y grabados. En algún momento fueron sistemas excesivamente caros, actualmente no y por ende son más comunes. El montado de la pieza es muy rápido, sin embargo no tiene buena repetibilidad. Ni es lo suficientemente robusta para detener piezas con volúmenes grandes, sólo funciona con placas.



Figura 3.2: *Diferentes modelos de prensas Kurt para uso de maquinaria pesada.*



Figura 3.3: *Una pieza plana detenida por vacío.*

Tornillos, sostenes y sujeciones

Se utilizan para fijar piezas grandes (ver Figura 3.4), la misma prensa o cualquier otra cosa a la bancada de trabajo. Es importante tener varias prensas de fijación, tornillos,

rondanas y tuercas. Casi cualquier cosa se puede detener con este método, el inconveniente es que la repetitibilidad no es buena, el montaje es lento y el torque de apriete de los tornillos de sujeción es muy delicado y puede traer cambios grandes.



Figura 3.4: *Un tocho fijado a la bancada de trabajo por stops y tornillos.*

Chucks

Es capaz de sostener piezas circulares sin perder el centro geométrico, es por eso que el chuck es el método de sujeción más común para máquinas de revolución: *ie*: el torno. Su capacidad de auto-centrar cualquier pieza circular hace que también sea un método de sujeción útil en fresadoras. Su repetitibilidad es excelente.

Métodos magnéticos

Los métodos de sujeción magnéticos son cada vez más comunes (para materiales ferromagnéticos) y ofrecen muchas ventajas si se aplican correctamente. Especialmente adecuado para piezas con altos estándares de precisión (hay un área de contacto mayor a otros métodos), que son susceptibles a deformación por una prensa o un chuck. Ofrece una alta velocidad de montaje.

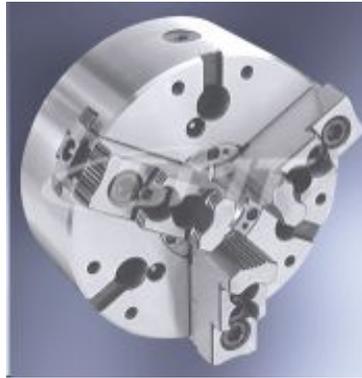


Figura 3.5: *Un chuck de tres mordazas, ideal para piezas circulares.*



Figura 3.6: *Un arreglo de cuatro prensas magnéticas sosteniendo una placa de acero lista para maquinarse. Se puede ver otro electromagneto acoplado a una pluma para mover piezas pesadas.*

3.1.3 Diseño e implementación

La primera idea (fruto de la experiencia de los operadores del taller mecánico de precisión) fue llevar el chuck del torno y montarlo sobre la bancada de la CNC como un porta material, sin embargo esto tenía algunas desventajas: el chuck es muy pesado, no se podría usar el torno mientras se utiliza la CNC y el chuck no tiene provisiones para montarse a la bancada de la CNC.

La evolución lógica de la idea fue fabricar algo parecido a una extensión para el chuck, una especie de mandril, que facilitara llevar las piezas de la CNC al torno sin problemas de calibración y ajuste.

En esta etapa, se pudieron definir las primeras especificaciones:

1. Un método suficientemente confiable y robusto para montar y maquinar todas las celdas sin desgaste.
2. Capacidad y facilidad de montaje tanto en el torno, como en la fresadora CNC.
3. Función de auto-centrado de la pieza, es decir, garantizar que todas las piezas queden centradas con respecto al centro geométrico de la propia MUAC.

La forma final se asemeja a un mandril acoplado a una base y consiste en un vástago de $19mm$. El diseño se hizo con ayuda de un software CAD y con la facilidad y posibilidad de poder usar el MUAC con cualquiera de las 33 celdas a fabricar, en el torno o en la fresadora. Este último requisito requirió de varios compromisos, ya que el diámetro total no podía exceder el máximo tamaño aceptado por el chuck del torno ni ser tan pequeño que fuera inestable en la fresadora.

Para esto se consideraron las piezas y los tochos más grandes y más pequeños y se hizo un compromiso grande para poder acoplarse a todas. Para obtener esta información se hizo una base de datos en Excel en donde se podían ordenar de manera ascendente y descendente los tamaños de los tochos y piezas, una tabla resumida se muestra a continuación:

Tabla 3.1: *Piezas y tochos más grandes y más pequeñas*

Piezas (tamaño de envoltente)

Pieza más grande	ESOPO-ME-ICAMR-V1-020-001	$10.63x8.819x2.677''$
Pieza más pequeña	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-003	$3.36x3.36x0.138''$

Tochos (tamaño de materia prima)

Tocho más grande	ESOPO-ME-ICAMR-V1-010-001	$11.5x10x5''$
Tocho más pequeño	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-002	$5x5x1''$

Con estos datos se obtuvieron las especificaciones del tamaño final del MUAC así como de los accesorios necesarios para sujetar el MUAC tanto a la bancada de la fresadora como al tocho. El diseño final (ver Figura 3.7) se complementó con un cono de auto centrado (ver Figura 3.8) que trabaja en conjunto con el vástago, además se dejaron varios cajones con barrenos para tornillos $M8$, necesarios para montar el MUAC tanto al tocho como a la bancada.

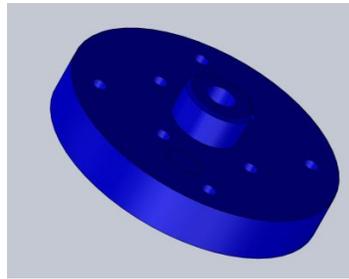


Figura 3.7: *Diseño final del MUAC, se debe garantizar paralelismo entre las superficies y concentricidad entre el diámetros exterior y el centro del vástago.*

El material escogido para el producto final fue acero AISI 1018, el cual permite al MUAC ser bastante resistente, fuerte y estable. El maquinado requirió de alta precisión debido a los acabados.

3.1.4 Conclusiones

La manufactura y desarrollo del MUAC fue realizada adecuadamente y las tolerancias geométricas y dimensionales de los componentes cumplieron las especificaciones propuestas en los planos mostrados en las figuras 3.11 y 3.12. Después de las primeras pruebas, se llegaron a las siguientes mejoras/simplificaciones:

1. La manera más eficiente de maquinar las piezas es en solo dos procesos, esto es, no intercambiar la pieza más de una vez entre el torno y la fresadora, lo cual implica que la MUAC no tiene que ser intercambiable.

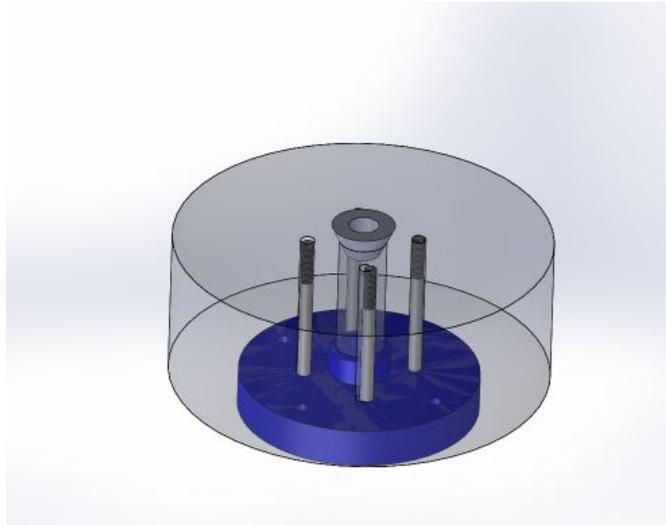


Figura 3.8: *Un tocho montado sobre el MUAC con el cono de auto centrado y tornillos de fijación visibles.*

2. Cuando el material es masivo, la superficie de contacto es relativamente pequeña y el centro de masa se aleja de la bancada, lo cual ocasiona vibraciones y deformaciones en los extremos. La base del MUAC debe ser mucho más delgada y en algunos casos puede desaparecer. Es decir, usar sólo el cono de autocentrado.
3. El MUAC debe de interferir lo mínimo posible con los hábitos de los operadores, por ello el montaje y desmontado se debe simplificar aún más.
4. El paralelismo de las caras debe ser más preciso para usarse en el torno; en la practica hubo vibraciones peligrosas que impidieron su uso cotidiano.

El MUAC funciona con algunas piezas en las que se necesita la característica de intercambiabilidad y son dimensionalmente compatibles con el: las piezas pequeñas y medianas. Ha tenido éxito en algunos otros rubros imprevistos también:

1. Para las piezas con acabados en ambas caras, el MUAC ha sido una herramienta muy práctica y que ahorra bastante tiempo.
2. El cono de auto centrado se puede usar por si solo para *centrar* las piezas que se montan con sistemas de fijación estándar. De este modo se resuelve el problema de la calibración.



Figura 3.9: *El MUAC montado en el torno del taller mecánico de precisión en sus últimas etapas de fabricación.*

Vistos con esta luz, el MUAC fue un ejercicio importante y lleno de aprendizaje. Si hubiera tiempo para una segunda iteración en su diseño, personalmente sugeriría no pensar en una solución integral, sino buscar las piezas que más lo necesitan y tratar de resolver su montaje por separado. Asimismo, se ha visto que realmente no se necesita para trabajar en el torno, por lo que sería mejor enfocar todos los esfuerzos en crear una versión sin tantos compromisos para la fresadora.

3.1.5 Planos

Se anexan los planos de manufactura del MUAC junto con su cono de auto centrado. El plano mostrado en la Figura 3.11 es del cono de auto centrado, mientras que el de la Figura 3.12 es el del MUAC como tal. Ambas piezas fueron fabricadas en el taller mecánico de precisión del IA-UNAM con Acero AISI 1018.



Figura 3.10: *Los dos MUACs terminados con sus respectivos conos de auto centrado. El ejemplar de la derecha está provisto con barrenos y cajones para su montura en la bancada de la fresadora.*

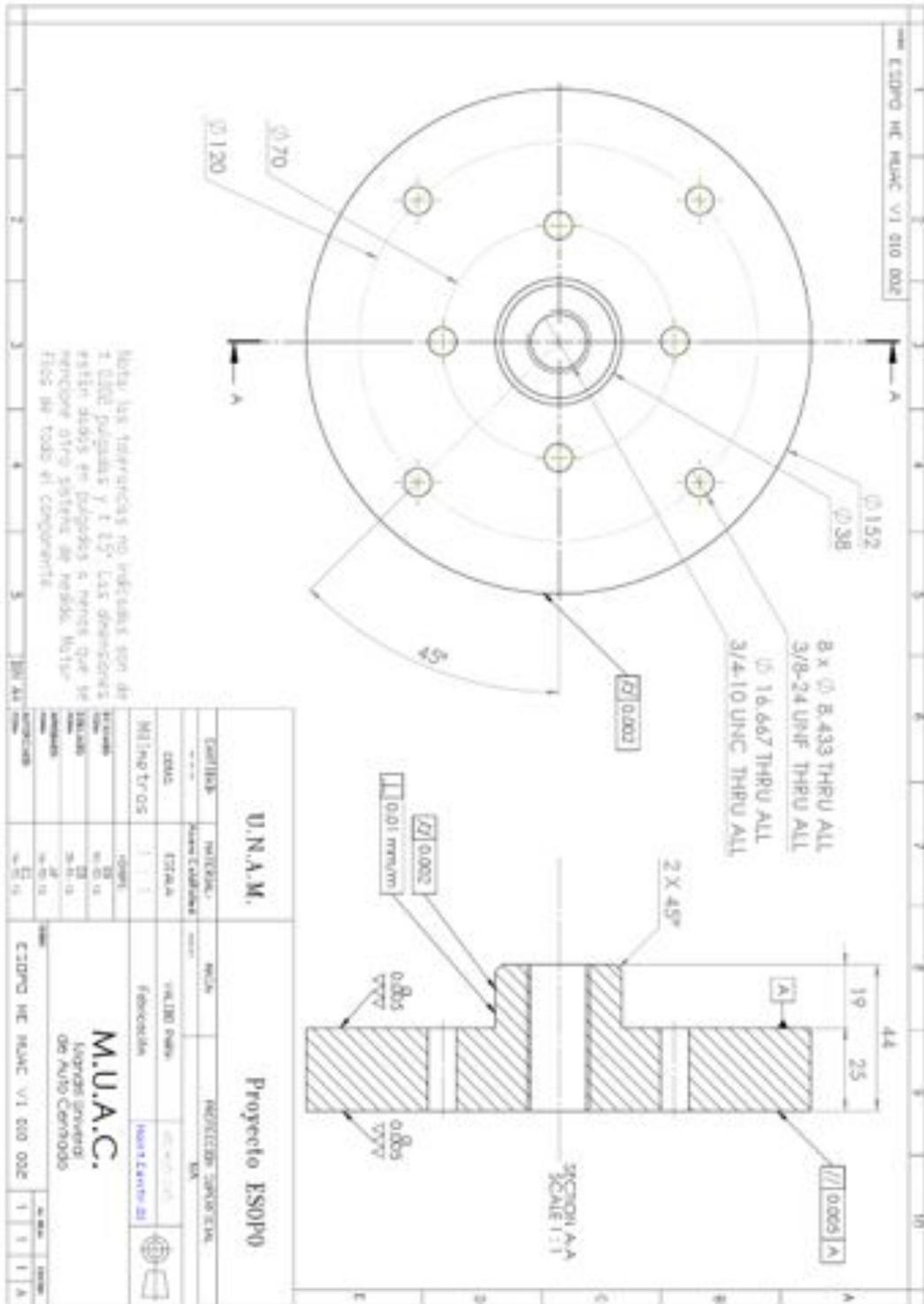


Figura 3.12: Copia del plano de la MUAC, tal y como se le entrego al taller mecánico de precisión del IA-UNAM.

3.2 Unidad de desplazamiento pasiva

Para instrumentación astronómica, el rango de temperatura presente en los observatorios restringe el diseño opto-mecánico. Se debe mantener la mejor calidad de imagen a lo largo de toda la noche, con los cambios de temperatura que ello involucra. Debido a que los índices de refracción y dispersión cambian con la temperatura, así como el volumen de los soportes, compensadores activos (*ie*: unidades de enfoque) y/o pasivos suelen ser utilizados

Se puede agregar un motor que enfoque las lentes para compensar por cualquier cambio o deformación, sin embargo los motores eléctricos introducen turbulencia debido a la disipación del calor y esto degrada la imagen. En estos casos, se puede usar una combinación de materiales con coeficientes de expansión térmica bien definidos que se dilaten o contraigan de acuerdo a la temperatura y *enfoquen* las lentes de forma pasiva, a esto se le llama Unidad de Desplazamiento Pasiva, de aquí en adelante, UDP.

Como sucedió con otras características de ESOPPO, este concepto también fue aplicado análogamente para el instrumento OSIRIS [13] con excelentes resultados.

3.2.1 Concepto

Este problema en particular está definido por los cambios en los índices de refracción y dispersión de las lentes. Utilizando simulaciones ópticas en programas de trazado de onda se hace un cálculo (a nivel de μm) de exactamente cuanto se debe mover una lente (que escoge el diseñador óptico) para compensar por los cambios de temperatura.

Con los valores del Brazo Azul mostrado en la Figura 3.13, se hizo un pequeño ejercicio para resolver el problema análogo en el Brazo Rojo con ayuda de una breve hoja de cálculo que puede calcular dos cosas. En ambos casos, los datos para la compensación focal son definidos por la óptica. Utilizando este ejercicio se provee un método rápido y eficiente para modificar el diseño apropiadamente una vez que se tenga el dato de compensación focal, mostrado en la Figura 3.2. Se consideran dos casos básicos ilustrados en la Tabla 3.4.

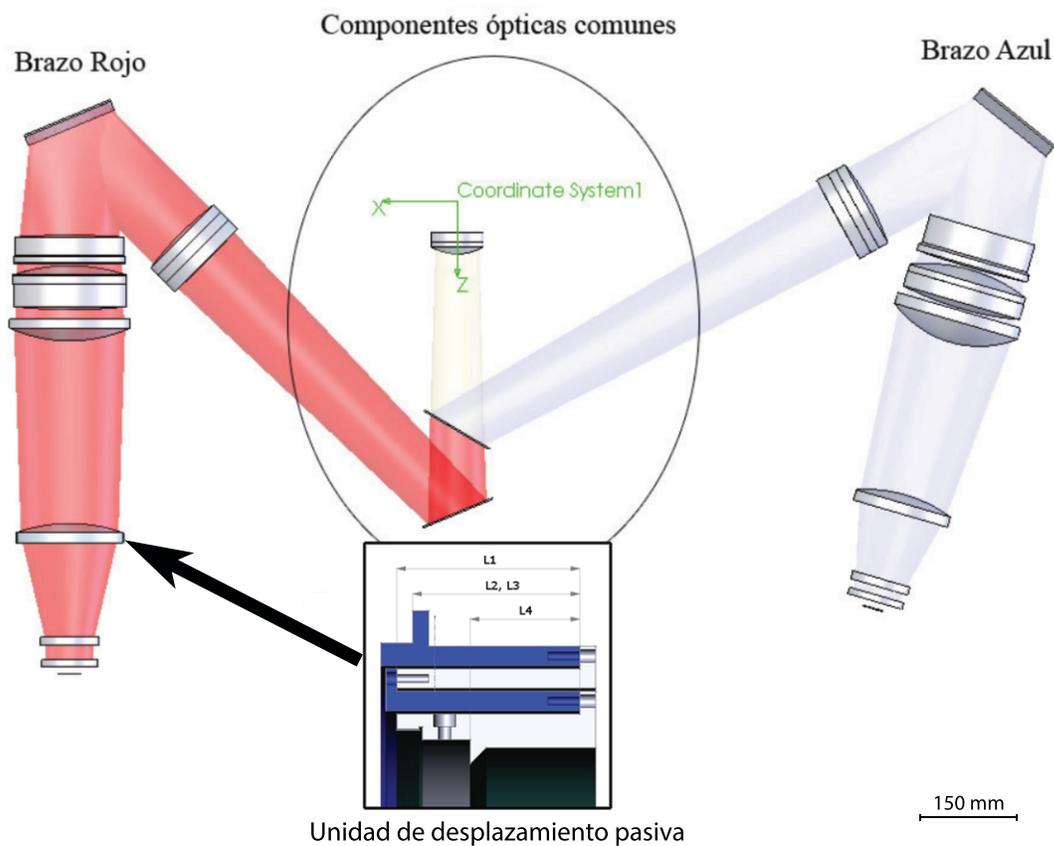


Figura 3.13: *Los 24 componentes ópticos de ESOPO, con la UDP señalada en el Brazo Rojo.*

1. Modificar la longitud las celdas en función del CTE ¹: se mantienen exactamente las mismas propiedades que para el caso Azul (es decir, los mismos materiales) y se calculan las dimensiones.
2. Se mantienen las dimensiones de las celdas: La variable se convierte en el CTE, con este dato podemos buscar especificaciones para un nuevo material.

¹Por sus siglas en inglés: Coeficiente de Expansión Térmica

 2/15/2007	ESOPO TÍTULO: DISEÑO ÓPTICO	CÓDIGO: ESOPO-OP-A-DO1 VERSIÓN: 2
--	--	--------------------------------------

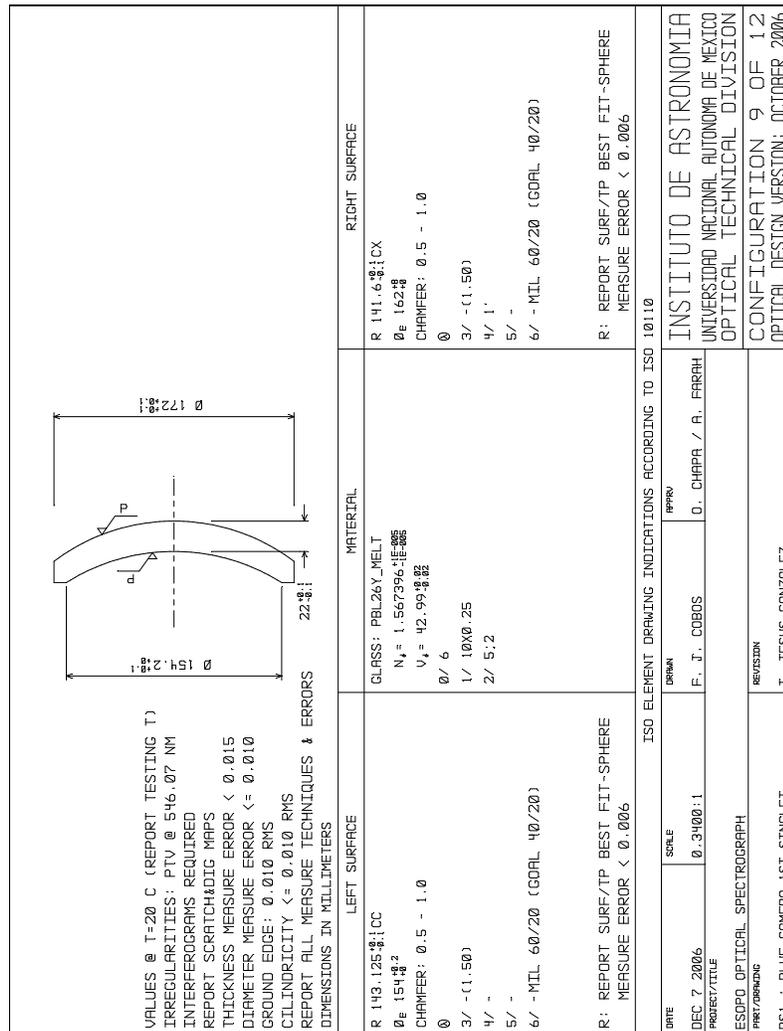


Figura 3.14: Plano de manufactura óptica de una lente de ESOPO, extracto del Diseño Óptico de ESOPO, ESOPO-OP-A-DO1 versión 2.0

3.2.2 Cálculo

Una vez resuelto el cálculo del movimiento de la lente para compensar y mantener la calidad de la imagen, se procede a buscar los materiales y formas adecuadas para lograr esta expansión térmica y lograr la compensación (o enfoque) de la imagen pasivamente. El cálculo se resume al problema ilustrado en la Figura 3.15 que muestra el arreglo de cuatro materiales, cuya longitud respectiva es L_1 , L_2 , L_3 y L_4 y cuya diferencia en sus coeficientes de expansión térmica hará que haya un desplazamiento efectivo en los extremos.

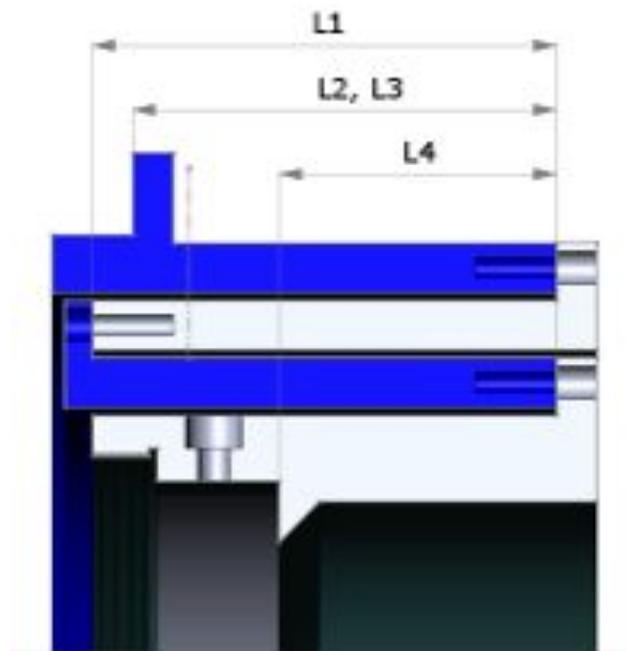


Figura 3.15: *Esquemático de la unidad pasiva de desplazamiento. Se distinguen cuatro piezas, dos azules y dos grises, las piezas del mismo color son del mismo material. La longitud de las piezas de en medio es la misma.*

Se definen las siguientes dimensiones, mostradas en la Figura 3.15: L_1 , L_2 , L_3 , L_4 y la condición dada por la geometría: $L_2 = L_3$

Por otro lado, se define la expansión térmica lineal como: ΔL , en donde:

$$\Delta L = L\alpha_L\Delta T \quad (3.1)$$

donde L = longitud inicial respecto a la superficie que se apoya en su interfaz.

α_L = CTE = coeficiente de expansión térmica lineal

ΔT = cambio de temperatura

Haciendo uso de la imagen, se puede ver que la longitud inicial L , se puede definir como $L = L1 - L2 + L3 - L4$ en donde el coeficiente de expansión térmica es el mismo para $L1, L3$ y $L2, L4$ respectivamente.

Por lo que haciendo una factorización simple se llega a:

$$\Delta L = \Delta T[\alpha_{L1}(L1 + L3) - \alpha_{L2}(L2 + L4)] \quad (3.2)$$

de donde se pueden despejar las siguientes dos ecuaciones:

$$L2 = L3 = \frac{\frac{\Delta L}{\Delta T} + \alpha_{L2}L4 - \alpha_{L1}L1}{\alpha_{L1} - \alpha_{L2}} \quad (3.3)$$

$$\alpha_{L2} = \frac{-\frac{\Delta L}{\Delta T} + \alpha_{L1}(L1 + L3)}{L2 + L4} \quad (3.4)$$

Que nos sirven para obtener fácilmente las longitudes $L2, L3$ en caso de que quieran mantener los mismos materiales del barril Azul o en su defecto el coeficiente de expansión térmica α_{L2} de un nuevo material en caso de que se quiera mantener las mismas dimensiones.

Las ecuaciones 3.3 y 3.4 se utilizaron en una hoja de cálculo para obtener un documento fácil de manejar y rápido que sirva para obtener tanto $\Delta L, L2 = L3$ como α_{L2} . El resultado su muestra en las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4.

3.2.3 Análisis por elementos finitos

Para corroborar los resultados analíticos, se hizo una simulación (ver Figura 3.16) con el método de los elementos finitos, de cuyos resultados podemos verificar cualitativa y cuantitativamente el movimiento de la UDP con respecto a la superficie de apoyo.

Para el desarrollo de este cálculo se toman varias consideraciones importantes:

- Para simplificar el modelo de la UDP y no tener que mallar todo el instrumento, se utilizan un juego de vigas como elementos auxiliares (ver Figura 3.16) que simulan la rigidez y expansiones térmicas equivalentes del instrumento.
- Estos elementos auxiliares son diez veces más rígidos que el Aluminio (para eliminar los torques inducidos por la longitud de las vigas) y poseen propiedades de expansión térmica equivalentes a las de la montura de la UDP.
- Se toma como referencia la superficie en la que la UDP se monta a la interfaz.
- Se utilizan las cualidades de los materiales mostrados en la Tabla 3.3, *Nylamid M* y acero inoxidable *SS AISI 446*.

Los resultados se muestran en la Tabla 3.3 y se comparan con el cálculo analítico desarrollado en la Sección anterior. Cabe resaltar que los resultados son aceptables y muy apegados a lo esperado.

3.2.4 Desarrollo

Se debe escoger un material a través de un análisis de los siguientes parámetros:

- El Módulo de rigidez (E): Es la relación esfuerzo deformación que describe el comportamiento de un material elástico.
- Esfuerzo de tracción: El esfuerzo máximo que un material soporta en tracción. No nos dice cómo se comporta, sino cuando se presentará un falla. A fin de cuentas, es una medida de que tan resistente es un material.

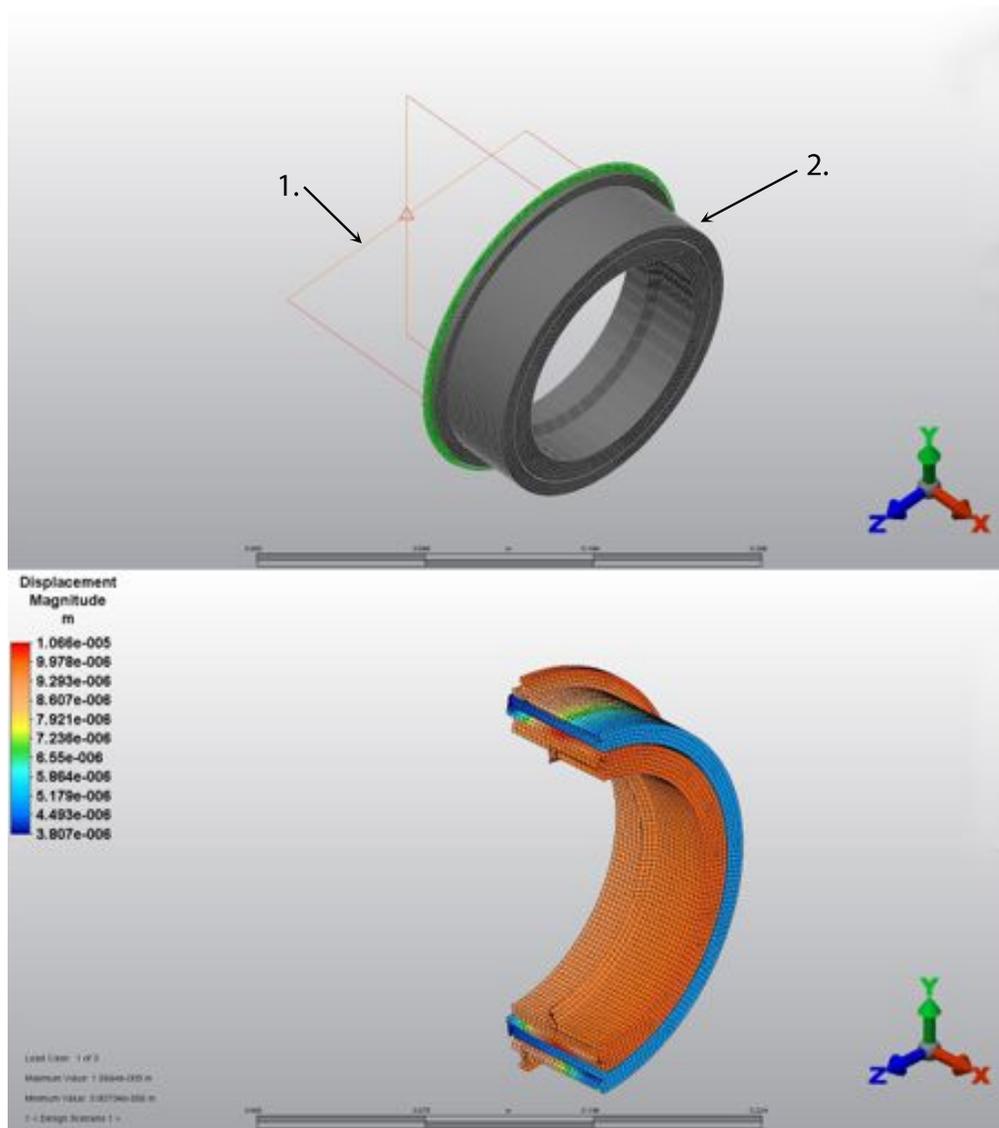


Figura 3.16: Imagen superior: 1. Elementos finitos auxiliares para simular de modo simplificado el montaje, rigidez y expansiones térmicas equivalentes de la UDP. 2. Mallado de la UDP. Imagen inferior: Resultados del análisis por elementos finitos, se puede ver el desplazamiento efectivo en los resultados del lado izquierdo.

- CTE: El coeficiente de expansión térmica es un valor que relaciona al cambio de volumen con el cambio de temperatura. Es el valor que buscamos al hacer los análisis de la UDP.

El material que se seleccione, debe satisfacer los requerimientos mecánicos de ESOPO (en cuanto a requerimientos mecánicos) además de tener un CTE equivalente para compensar adecuadamente. Es altamente improbable que exista un material que satisfaga todas las condiciones exactamente, se tiene que buscar un compromiso o en su defecto modificar las dimensiones físicas hasta encontrar condiciones optimas para que la UDP logre enfocar correctamente.

Como se mencionó anteriormente, el parámetro de compensación focal proviene del presupuesto de error, un documento en donde se cualifican los posibles errores que se pueden generar y tolerar en los requerimientos de operación diseño, construcción e integración. El presupuesto de error estará ligado estrechamente a la resolución final y el desempeño del instrumento.

En el presupuesto de error se consideran varios *compensadores*, que compensan por diferentes tipos de errores, específicamente para ESOPO [14]:

- Compensadores de diseño: Compensador estático, una vez con los datos reales de la óptica se debe ajustar el diseño.
- Compensadores de manufactura: Compensador estático de los errores en el maquinado de las piezas, involucra mover una o más componentes ópticas.
- Compensadores de integración: Compensador estático, el ajuste de la interface mostrado en el Capítulo 6.3 es un ejemplo claro.
- Compensadores de operación: Compensador dinámico, la UDP es un ejemplo de un compensador de operación.

Tabla 3.2: Parámetro de compensación focal. Este dato proviene del presupuesto de error y sólo se tiene para el Brazo Azul, sin embargo se proponen dos valores para el Brazo Rojo con el fin de *probar* el cálculo analítico.

Brazo Azul	Brazo Rojo (Propuestas)
$\Delta L = 8.8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$	$\Delta L = 8.8 \mu\text{m}/^\circ\text{C} \quad 8.95 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$

Tabla 3.3: Análisis de UPD aprobado en 2010 para el brazo AZUL.

Material 1	Nylamid M
CTE	9.00E-05
L1 (m)	0.0525
L2 (m)	0.0575
Esfuerzo de tracción (Pa)	6.89E+07
E (Pa)	1.38E+09
Material 2	SS AISI 446
CTE	1.04E-05
L3 (m)	0.0575
L4 (m)	0.03429
E (Pa)	2.00E+11
Desplazamiento analítico (m)	8.95E-06
Análisis FEA	
Desplazamiento FEA (m)	1.066E-05
Error (Analítica/FEA)	16.04 %

Tabla 3.4: Cálculo analítico de prueba para el Brazo Rojo, utilizando los valores propuestos y listo para compararse con el dato obtenido de la simulación por elementos finitos una vez que el ΔL se defina en el presupuesto de error. Los valores en negritas e itálicas son los resultados obtenidos por la hoja de cálculo. Se muestran resultados para los dos casos planteados, uno manteniendo las características del material y variando las dimensiones y el otro maniendo las dimensiones y variando las características (CTE primordialmente).

	Variando Dimensiones	Variando CTE
ΔL propuesto	8.8 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	8.95 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$
Material 1	Nylamid M	Nylamid M
CTE	9.00E-05	9.00E-05
L1	0.0525	0.0525
L2	L2=Lv	0.0575
Material 2	SS AISI 446	a definirse
CTE	1.04E-05	<i>1.03E-05</i>
L3	Lv	0.0575
L4	0.03429	0.03429
Lv=L2=L3	<i>5.57E-02</i>	predefinido

3.2.5 Conclusión

Con respecto a los resultados de la Tabla 3.3, la variación del 16% entre el cálculo analítico y la simulación por el método de los elementos finitos se debe a las simplificaciones utilizadas para el cálculo analítico, que sólo considera expansiones lineales (el análisis FEA considera expansiones en tres dimensiones) y no considera el contacto entre las superficies de los elementos de la UDP. También se puede atribuir un error significativo a que las especificaciones de los materiales disponibles para el FEA no son exactamente las mismas (por limitaciones del software) que se utilizaron para el cálculo analítico.

Una vez que se termine con la fabricación de la óptica, se podrá obtener el parámetro de compensación focal con el cual podemos utilizar el procedimiento descrito en este Capítulo para calcular las características y/o dimensiones corregidas del material necesario. Para este proceso, el contenido de este Capítulo contribuirá de manera importante.

Capítulo 4

Desarrollo y Resultados

El desarrollo principal del proyecto, la fabricación de las celdas del espectrógrafo ESO-PO, se puede desmenuzar en tres partes fundamentales:

1. Manufactura
2. Metrología
3. Integración

Estas tres partes se han desarrollado de manera dispareja; La manufactura se ha llevado a cabo de modo sistemático y aunque al momento de terminar este documento no están fabricadas el 100% de las celdas, el avance ha sido estable y en los próximos meses estarán terminadas todas las celdas. Además de la manufactura, hay que corroborar que las piezas cumplan con las especificaciones de fabricación (metrología) y posteriormente comenzar el proceso largo de integración, que culmina con el armado total del instrumento.

4.1 Manufactura

La manufactura se ha llevado a cabo siguiendo las instrucciones de trabajo de piso mostradas en el Apéndice A, conforme hubo disponibilidad de los operadores y las máquinas, algunas piezas se hicieron en su totalidad en la CNC y otras en el torno y fresadora.

El trabajo ha sido muy constante y los retrasos que se han presentado han sido relacionados más con problemas mecánicos con la CNC que por errores humanos. Al momento de escribirse este documento, de las 33 celdas documentadas en la Tabla A.1, se han manufacturado las 4 celdas mostradas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Celdas manufacturadas.

	Nombre de pieza	Figura	Código de Pieza	Tamaño ["]		
				x	y	z
1	Celda cámara roja C1	4.1	ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001	11	11	3
5	Celda cámara roja C2	4.4	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-001	10	10	2
11	Celda cámara roja S1	4.4	ESOPO-ME-CAMR-V1-030-001	10	10	1.5
32	Interfáz barril 1	4.3	ESOPO-ME-ICAMR-V1-010-001	11.5	10	5

Las piezas se manufacturaron utilizando MasterCAM y un traductor programado específicamente para transformar el código que se obtiene directamente de MasterCAM a un Código G que nuestra fresadora CNC comprenda. Como se demostrará a continuación, los resultados han cumplido con las especificaciones.

La MUAC se ha utilizado con buenos resultados en el proceso de manufactura, en algunos casos el cono de auto centrado (ver Figura 3.10) se ha utilizado por sí sólo para centrar las piezas. El torno no se ha utilizado menos de lo que se consideró en un inicio y debido a ello la función de intercambio de la MUAC no se ha usado tanto como se pensaba. En la Figura 4.4 se pueden ver los barrenos para la utilización del MUAC con bastante claridad. Las instrucciones de trabajo de piso se han utilizado tal y como se planeo, de tal modo que se ha tenido mucho control sobre el proceso de manufactura y a su vez este ha sido muy estructurado.



Figura 4.1: *Celda cámara roja S1, ESOPO-ME-CAMR-V1-030-001.*



Figura 4.2: *Celda cámara roja C1 montada sobre el torno para ajusta el diámetro exterior al tamaño justo de la interfaz (ver figura 4.3).*



Figura 4.3: *Interfaz barril 1, ESOPO-ME-ICAMR-V1-010-001, antes y después del acabado superficial y barrenos para su montaje.*



Figura 4.4: *Celda cámara roja C2 (abajo) y celda cámara roja C1 (arriba), ESOP-
ME-CAMR-V1-020-001 y ESOP-
ME-CAMR-V1-030-001, respectivamente.*

4.1.1 Técnicas Alternativas

Como se ha explicado antes, la manufactura de las celdas es complicada. Para OSIRIS algunas celdas se manufacturaron con electroerosión específicamente porque no se había encontrado una manera de sujetarlas en una CNC sin ocasionar deformaciones o daños. En respuesta a esto, se desarrollo un método alterno, en el que la pieza queda sujeta al tocho durante todo el maquinado y posteriormente se sujeta con cera para finalmente trancarlo y obtener la pieza final. Este método es más rápido y más barato.

Desarrollo

El tocho se prepara y se llevan a cabo los maquinados necesarios en la CNC, una vez que los maquinados están terminados (ver Figura 4.5), se rellenan de cera las cavidades entre la pieza y lo que se vaya a trancar como se muestra en la Figura 4.6. Una vez con le cera seca, se hace una careado de la superficie opuesta hasta la tolerancia necesaria, la cera será lo único que sujeta la pieza, ver Figura 4.7. Finalmente se vota la cera con una maso de hule y la pieza está lista como se muestra en la Figura 4.8

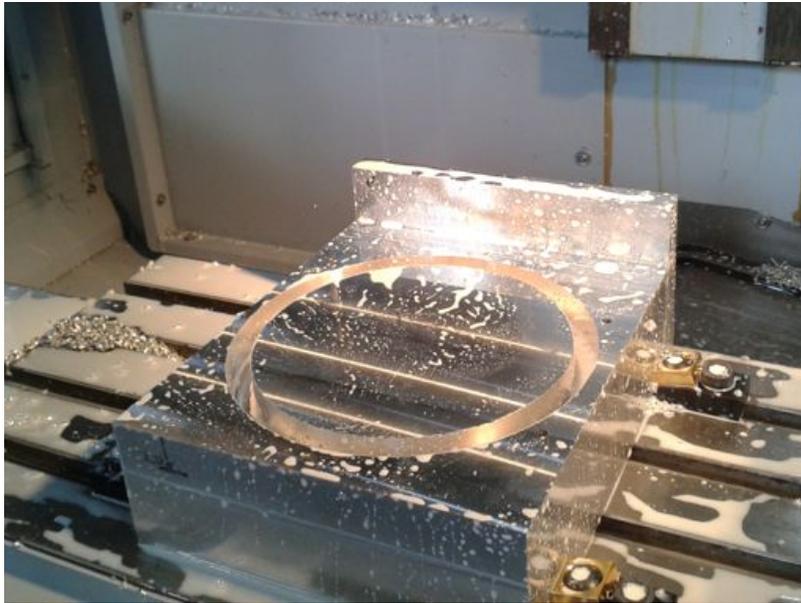


Figura 4.5: *Maquinado de interface.*



Figura 4.6: *Relleno de cera.*



Figura 4.7: *Relleno de cera.*



Figura 4.8: *Relleno de cera.*

4.1.2 Código G

A pesar de llevar algunos maquinados manuales hechos por los operadores del taller mecánico de precisión, todos los cortes importantes y principales se han hecho con la fresadora CNC con Código G proveniente de los modelos CAD de las piezas en Solid-Works. El Código G es un paso importante: muchas de las tolerancias se pueden definir en esta etapa y la calidad de los acabados también.

El cuerpo del Código G tiene una estructura que se divide en 3 partes principales: la inicialización (colocar la herramienta correcta, establecer la velocidad de corte, definir referencia, unidades, offset, etc), el desarrollo, separado por bloques de corte (*ie*: careado, saqueado, barrenado, etc) y el final, en donde la máquina regresa a condiciones iniciales lista para ejecutar el programa de nuevo. A continuación se muestra un extracto del Código G generado para la manufactura de la Celda Cámara Roja C1, ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001:

Comienza inicialización:

```
%
(MCV-OP ) (15-DEC-2013)
(SUBROUTINES: O2 .. O0)
G90 G17
G80 G49 G40
G54
G91 G28 Z0
G90
M01
N1 M6 T1
G90 G00 G40 G54
G43 H1 D31 G0 X-126.705 Y90.743 Z50. S1000 M3
M8...
```

... Desarrollo, etapa de careado:

```
(—————)
(FM-FACEMILL-T1 - FACE-MILLING)
(—————)
```

X-126.705 Y90.743 Z10.

Z4.

G1 Z0. F33

X124.705 F100

G2 X124.705 Y64.829 R-12.957 F200

G1 X-124.705 F100

G3 X-124.705 Y38.915 R-12.957 F200

G1 X124.705 F100

G2 X124.705 Y13.001 R-12.957 F200

G1 X-124.705 F100

G3 X-124.705 Y-12.913 R-12.957 F200

G1 X124.705 F100

G2 X124.705 Y-38.827 R-12.957 F200

G1 X-124.705 F100

G3 X-124.705 Y-64.741 R-12.957 F200

G1 X124.705 F100

G2 X124.705 Y-90.655 R-12.957 F200

G1 X-126.705 F100

G0 Z10.

G91 G28 Z0

G90

M01

N2 M6 T2

(TOOL -2- MILL DIA 6.0 R0. MM)

G90 G00 G40 G54

G43 H2 D32 G0 X2. Y-143.665 Z50. S1000 M3

M8...

... Desarrollo, etapa de barrenado y final (siempre marcado por M30 y %):

(—————)

(D-DRILL-T3 - DRILL)

(—————)

X83.281 Y-48.053 Z10.

G98 G81 Z-31.604 R2. F33

X83.298 Y48.142

X0. Y96.254
X-83.316 Y48.171
X-83.333 Y-48.023
X-0.034 Y-96.136
G80
M30
%

4.1.3 Conclusión

La manufactura lleva un avance importante y aunque el número de piezas manufacturadas (mostradas en la Tabla 4.1) parece pequeño, todos los pormenores del proceso de manufactura como lo son, Ruta de Manufactura, técnicas de maquinado, de metrología e incluso la traducción a Código G de los archivos CAD, están resueltos. Lo cual deja el terreno listo para continuar con el resto de las piezas.

4.2 Metrología

El primer control de calidad se hizo con la metrología de la *Celda Cámara Roja C1 (ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001)* montada en una bancada de mármol aún en el taller mecánico de precisión, utilizando un pie de rey (ver Figura 4.9), un instrumento de precisión micrométrica, pero burdo para los estándares de fabricación.

Esta fue la primera pieza que se manufacturo, por ende las mediciones son muy importantes para tener una referencia de la calidad de nuestros maquinados y acabados. La metrología de esta pieza se hizo con mucho cuidado, y de sus resultados depende la correcta fabricación del resto del instrumento. Si la pieza se encuentra dentro del presupuesto de error, habrá luz verde para maquinar el resto del instrumento. Si no, habrá que retro-alimentar el proceso de manufactura iterativamente hasta que obten-gamos un maquinado lo suficientemente preciso.



Figura 4.9: *Pie de Rey utilizado para las mediciones de taller.*

4.2.1 Metrología de taller

Como parte del protocolo de manufactura, con las piezas aún en el taller, se realizaron algunas mediciones con un pie de rey para corroborar que la manufactura estaba dentro de los estándares establecidos. Se muestran las mediciones como referencia.

Para tener una idea de la calidad de los acabados se hicieron mediciones en tres puntos diferentes a 120 grados de separación cada uno. Así había un relación entre las mediciones y el paralelismo de las superficies. Las mediciones resultaron ser bastante acertadas como se puede ver en la Figura 4.11.

Tabla 4.2: Resultados de metrología de taller. Las referencias (A,B,C, etc se pueden ver en la Figura 4.11). Todos los valores en *mm*.

	A			B			C		
	a1	a2	a3	b1	b2	b3	c1	c2	c3
1	26.458	26.451	26.391	41.852	41.886	41.841	5.106	5.107	5.065
2	26.464	26.457	26.391	41.870	41.898	41.823	5.100	5.114	5.062
3	26.446	26.459	26.390	41.857	41.894	41.823	5.099	5.114	5.063
4	26.443	26.442	26.390	41.860	41.891	41.826	5.101	5.107	5.062
5	26.449	26.443	26.396	41.861	41.893	41.823	5.112	5.104	5.062
6	26.467	26.452	26.394	41.857	41.891	41.829	5.099	5.104	5.059
7	26.469	26.452	26.398	41.859	41.887	41.827	5.104	5.113	5.060
8	26.469	26.449	26.398	41.861	41.889	41.828	5.105	5.105	5.059
9	26.478	26.449	26.392	41.858	41.896	41.833	5.102	5.110	5.055
10	26.469	26.452	26.396	41.864	41.887	41.825	5.107	5.090	5.061
prom	26.461	26.451	26.394	41.860	41.891	41.828	5.104	5.107	5.061
std dev	0.0117	0.0053	0.0032	0.0048	0.0040	0.0056	0.0041	0.0071	0.0027

Tabla 4.3: Continuación de resultados de metrología de taller. Las referencias (D,E,F, etc se pueden ver en la Figura 4.11) Todos los valores en *mm.*.

	D			E			F		
	d1	d2	d3	e1	e2	e3	f1	f2	f3
1	20.492	20.458	20.503	7.357	7.353	7.370	18.485	18.445	18.459
2	20.496	20.458	20.500	7.388	7.348	7.372	18.483	18.447	18.460
3	20.493	20.465	20.500	7.359	7.356	7.372	18.490	18.446	18.460
4	20.494	20.458	20.500	7.360	7.356	3.369	18.483	18.448	18.458
5	20.493	20.459	20.499	7.359	7.357	7.369	18.484	18.445	18.458
6	20.492	20.462	20.500	7.360	7.357	7.368	18.486	18.444	18.465
7	20.497	20.462	20.500	7.362	7.358	7.370	18.483	18.446	18.458
8	20.491	20.459	20.500	7.361	7.357	7.367	18.483	18.446	18.459
9	20.494	20.461	20.503	7.362	7.357	7.371	18.484	18.444	18.458
10	20.494	20.460	20.501	7.362	7.357	7.365	18.486	18.447	18.459
prom	20.494	20.460	20.501	7.363	7.356	6.969	18.485	18.446	18.459
std dev	0.0018	0.0023	0.0013	0.0089	0.0030	1.2650	0.0022	0.0013	0.0021

Tabla 4.4: Tabla de resultados resumida. Todos los valores en *mm.*

Elemento	Nominal	Tolerancia	Actual	Diferencia
A	26.5	0.050	26.461	0.039
B	42.887	0.050	41.860	0.027
C	5.0	0.100	5.104	0.104
D	21.387	0.100	20.494	0.89
E	7.416	0.050	7.363	0.053
F	18.387	0.050	18.485	0.098



Figura 4.10: *Proceso de medición de ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001 con el pie de rey.*

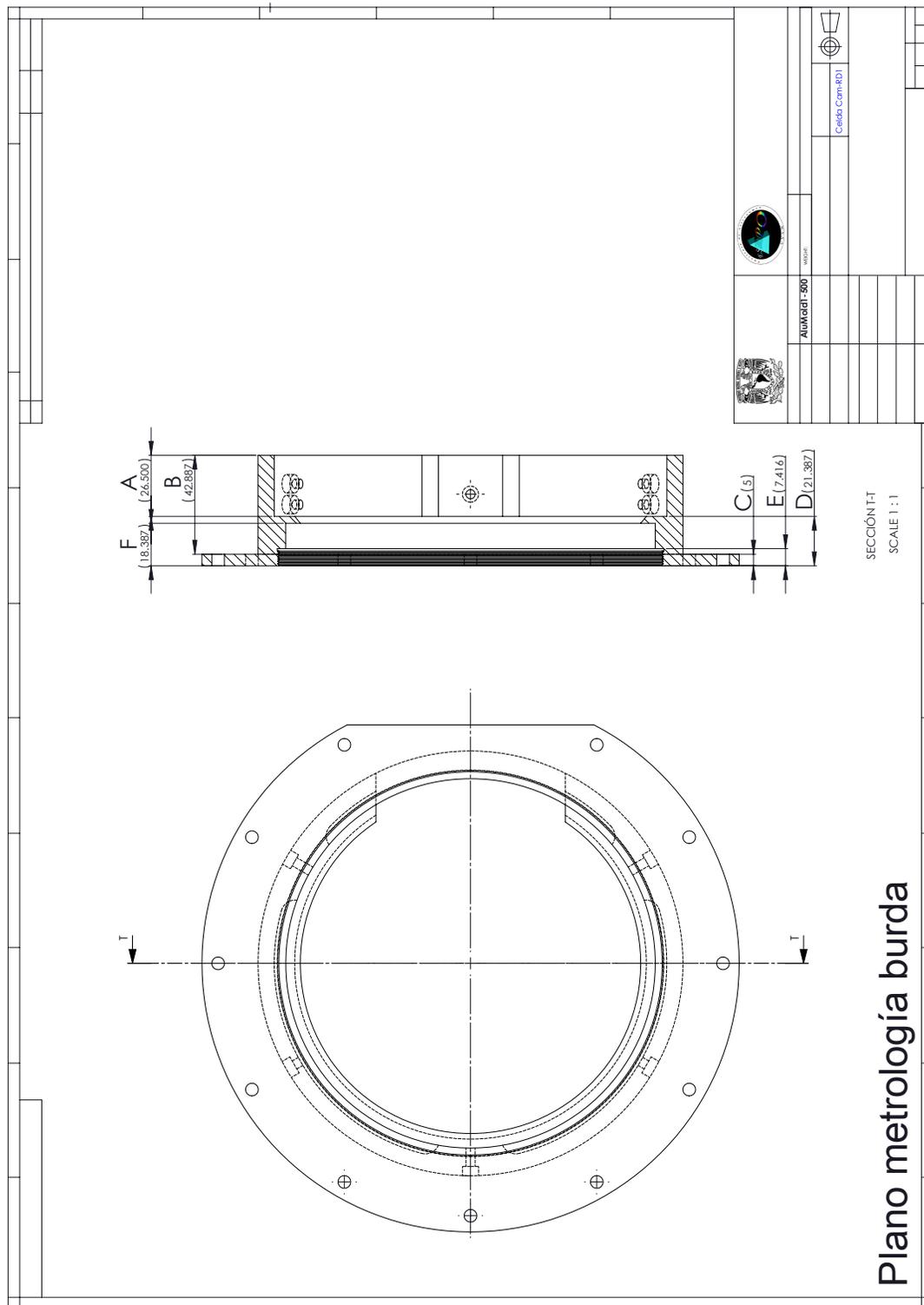


Figura 4.11: Plano de las mediciones realizadas en el taller.

4.2.2 Metrología de precisión

Las mediciones se hicieron en una mesa de coordenadas (Mitutoyo 7106) bajo condiciones de temperatura y presión ambiental, dejando a la pieza reposar un día entero en el cuarto donde se realizaron las medidas. Se compararon contra los planos de ESOP, que también estaban diseñados a temperatura ambiente.

Los resultados de las mediciones se pueden encontrar en las Tablas 4.5 y 4.6, así como una versión resumida en la Tabla 4.7. Las tablas muestran la información cruda tal como la arroja la máquina. Por facilidad, se han resaltado los valores importantes, que se pueden ver en el plano que también se muestra a continuación (ver Figura 4.12). Se hicieron medidas antes y después de anodizar, es importante analizar estas medidas con cuidado puesto que es posible que el anodizado deposite tanto material que la pieza se salga del presupuesto de error.

Tabla 4.5: Medidas de ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001 después de anodizar. Todos los valores en *mm*.

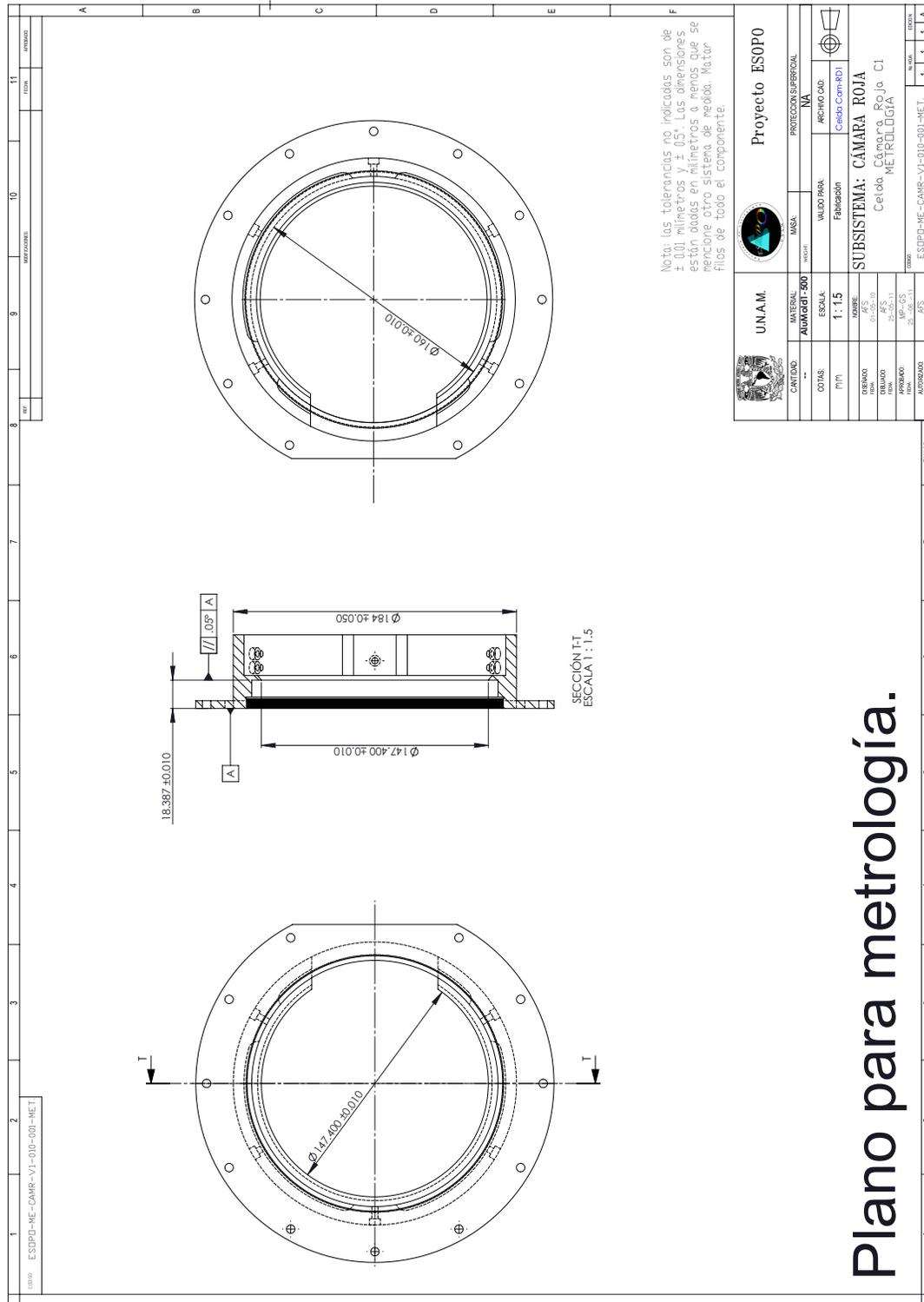
elem No	line No	Element Tolerancia	Pnt Ref	X coord X ángulo Nominal	Y coord Y ángulo Up/Lo	Z coord Z ángulo Actual	Diámetro Dist/ang Desv/error	Varianza
2	11	Diám exterior Máx inscrito	20	-0.174	0.191	43.992	183.707	0.196
2	16	Diám exterior		184.000	0.050	183.707	-0.293	-0.243
		Diám			-0.050			
2	17	Diám exterior Redondez			0.030		0.196	0.166
3	24	Diámetro interior orejitas	3	-0.187	0.239	45.192	159.990	
3	27	Diámetro interior orejitas		160.000	0.010	159.990	-0.010	
		Diámetro			-0.010			
3	28	Diámetro interior orejitas Concentricidad	X Y	-0.174 0.191	0.010 0.239	-0.187	0.099	0.089
4	34	Diámetro interior filo Gauss	20	-0.162	0.260	19.114	148.417	0.028
4	37	Diámetro interior filo		147.400	0.010	148.417	1.017	1.007
		Diámetro			-0.010			
4	38	Diámetro interior filo Redondez			0.030		0.028	***
4	39	Diámetro interior filo Redondez			0.010		0.028	0.018 ***
4	41	Diámetro interior filo Concetricidad	X Y	-0.187 0.239	0.005	-0.162 0.260	0.065	0.060
4	42	Diámetro interior filo Redondez			0.010		0.028	0.018 —
2	50	Plano superior Gauss	20	0.005	0.014	19.700		0.238
				89:59:08	89:57:31	0:02:38		
2	53	Plano superior Planitud			0.010	0.238	0.238	0.228 —
1	55	Esp de filo sin compensación		0.000	0.000	-0.587	0.587	
1	56	Esp de filo Distancia ZX		3.000	0.010	0.587	-2.413	-2.403
					-0.010			
1	57	nnnn Crear elemento teórico		-0.162	0.260	19.114		
2	58	Plano superior Paralelismo			0.010		0.047	0.037 —
1	59	Cil Orejas Gauss	6	-0.291	0.161	38.253	159.925	0.083
				89:58:48	89:49:29	179:49:25		
1	63	Cil Orejas Diámetro		160.000	0.010	159.925	-0.075	-0.065 —
					-0.010			
1	64	Cil Orejas Perpendicularidad			0.050		0.095	0.045 —
1	65	Cil Orejas Perpendicularidad			0.050		0.016	***—
1	66	Ángulo barreino1abarreno3					89:49:25	
1	67	Ángulo barreino1abarreno3 Ángulo		90:00:00	0:00:30	89:49:24	-0:10:35	-0:10:05 —
					-0:00:30			
1	68	Cil Orejas Tol de simetría p/ejes			0.050		90.000	89.950 —

Tabla 4.6: Medidas de ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001 antes de anodizar. Todos los valores en *mm*.

L.No	Mem	Matter	Des. Nominal	Tolerancia	Actual	Dev	Oversize
13	1	Circulo coor_1	184.000	0.050	183.987	-191.013	-190.963
		Diámetro		-0.050			
22	1	Cilindro_interior	160.000	0.010	160.009	4.713	4.703
		Diámetro		-0.010			
31	1	Plano superior	0.000	0.010	0.007	0.007	
		Posición X		-0.010			
31	1	Plano superior	0.000	0.010	0.022	0.022	0.012
		Posición Y		-0.010			
31	1	Plano superior	0.000	0.010	135.953	135.953	135.943
		Posición Z		-0.010			
40	2	Plano intermedio	0.000	0.010	0.002	0.002	
		Posición X		-0.010			
40	2	Plano intermedio	0.000	0.010	0.041	0.041	0.031
		Posición Y		-0.010			
40	2	Plano intermedio	0.000	0.010	117.364	117.364	117.354
		Posición Z		-0.010			
47	2	Diámetro chafra	147.400	0.010	147.377	-227.623	-226.623
		Diámetro		-0.010			

Tabla 4.7: Tabla de resultados resumida. Todos los valores en *mm*.

Elemento	Nominal	Tolerancia	Actual	Diferencia
Antes de anodizado				
Diámetro exterior	184.000	0.050	183.987	0.013
Diámetro interior orejas	160.000	0.010	160.009	0.009
Diámetro interior filo	147.400	0.010	147.377	0.023
Despues de anodizado				
Diámetro exterior	184.000	0.050	183.707	0.293
Diámetro interior orejas	160.000	0.010	159.990	0.010
Diámetro interior filo	147.400	0.010	148.417	1.017



Plano para metrología.

Figura 4.12: Plano de metrología fina.

4.2.3 Conclusiones de metrología

Cómo se puede ver en las Tablas 4.7 y 4.4, los resultados de la metrología que se llevó a cabo en dos pasos son bastante adecuados. Incluso la metrología de taller, cuyo propósito es únicamente monitorear el correcto maquinado de las piezas, nos proporciona datos importantes para la caracterización de la pieza además de retroalimentación importante para los operadores. Con respecto a los resultados de metrología de precisión, se puede ver que el proceso de anodizado perjudicó las medidas y aumentó el error: la preparación de la pieza para el anodizado involucra un baño con sosa caústica que ataca el aluminio de manera agresiva, específicamente en las aristas. Es por ello que el diámetro interior del filo (ver Tabla 4.7) se encuentra tan fuera de especificación después del anodizado. Aunque la pieza aún está dentro de los errores aceptados, se debe prever este depósito de material desde el maquinado.

4.3 Integración

La integración es la parte final de la manufactura y consiste en el armado y calibración de los sub-sistemas que eventualmente formarán el sistema entero. Parte importante de la integración del espectrógrafo ESOPO es la capacidad de absorber errores en el maquinado (y diseño) a través de calibración. En el armado de un sistema tan grande y complicado, las probabilidades de que todo este manufacturado a la perfección son muy bajas.

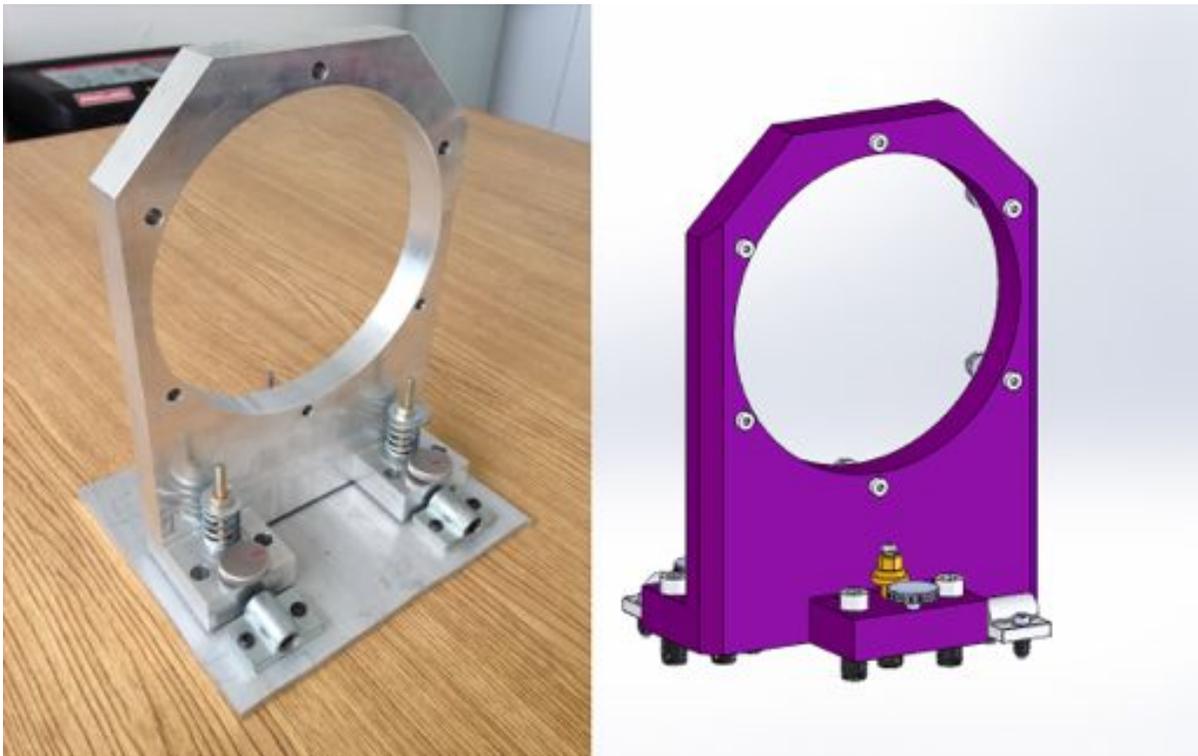


Figura 4.13: *Sistema de calibración.*

Esta previsión se hizo con la implementación de un sistema de calibración (ver Figura 4.14 y 4.13) en las interfaces de las celdas. El sistema mencionado se caracterizó para obtener un estimado del *error* que se puede corregir. Cabe resaltar que el propósito de dicho instrumento es principalmente lograr una buena alineación del eje óptico entre las varias interfaces.

El sistema consiste en tres tornillos (de aquí en adelante llamados $T1$, $T2$ y $T3$, ver Figura 4.17) que pueden cambiar de orientación la interfaz con cierto grado de precisión. Además el sistema cuenta tres topes, con el objetivo de *guardar* la posición de la interfaz en caso de que se tenga que quitar. Es decir, una vez que está calibrada, los topes se ajustan y en case de ser necesario, se puede remover la interfaz con cierta confianza de que al regresarla, los topes la hagan quedar en su posición anterior. Finalmente, la interfaz cuenta con seis barrenos para fijarse una vez terminada la calibración.

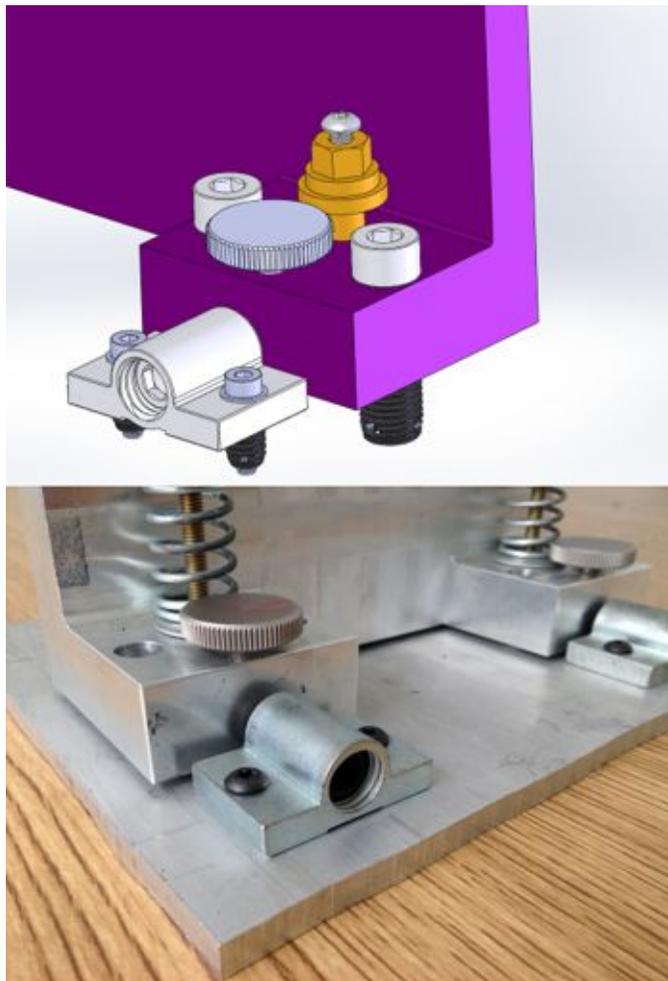


Figura 4.14: Acercamiento del sistema de calibración.

Durante la etapa de diseño y para alimentar el presupuesto de error, se hizo un análisis por elementos finitos de la interfaz con las condiciones de frontera como se muestran en la Figura 4.15. El análisis comprobó que la interfaz es lo suficientemente rígida para soportar el peso de la óptica con deformaciones aceptables.

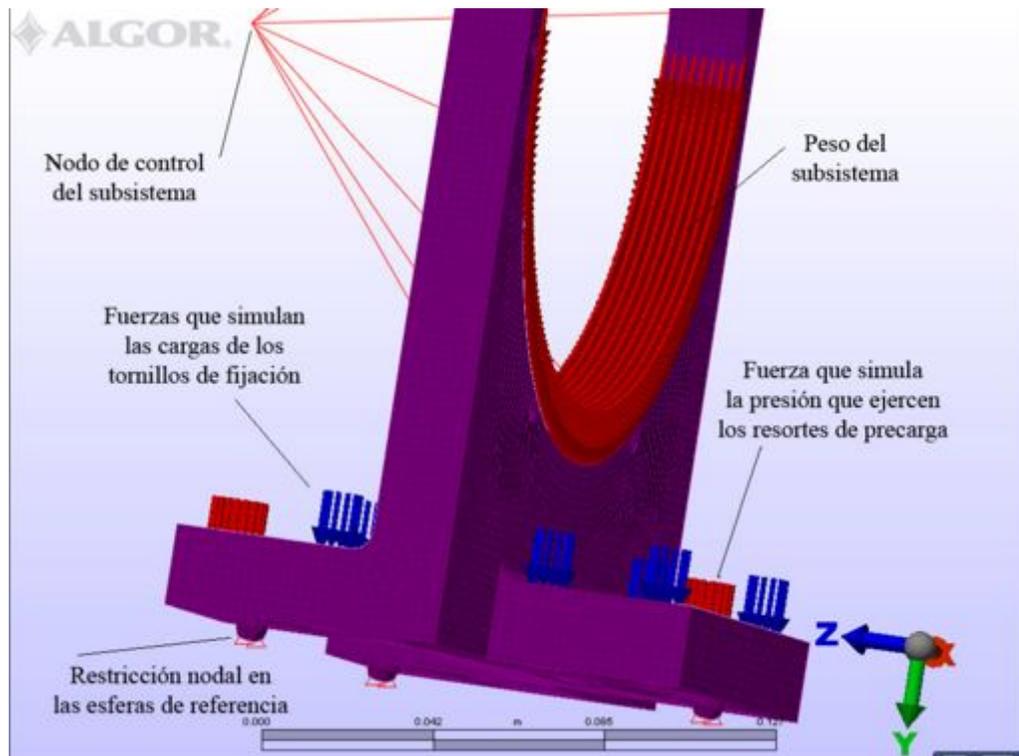


Figura 4.15: *Análisis por elementos finitos de la interfaz.*

La caracterización y pruebas del sistema se hizo midiendo el desplazamientos de un LASER (utilizando el principio de brazo de palanca óptico) en un campo circular y posteriormente, midiendo el desplazamiento en Photoshop y haciendo una equivalencia entre longitud real y pixeles. Así, se obtuvo la posición del LASER en coordenadas polares, obteniendo modulo y ángulo. Esto se transformo en las componentes de desplazamiento angular utilizando trigonometría simple. Las consideraciones se muestran en la Tabla 4.8. El ángulo de las coordenadas polares se corrigió por una pequeña inclinación en las imágenes.

Para garantizar un movimiento tan simple como fuera posible, la caracterización se hizo con la pieza levantada aproximadamente 1 mm sobre la superficie de medición. Esto fue necesario, porque de tratar de caracterizar con la pieza pegada a la superficie, la interfaz comienza a pivotar sobre su superficie de apoyo y el movimiento se vuelve muy errático, especialmente en la componente X .

Tabla 4.8: Consideraciones.

Relación pixeles/mm	Brazo de palanca óptico (mm)	Radio de LASER (error)
27 pixeles = 5 mm	2325	11 pixeles

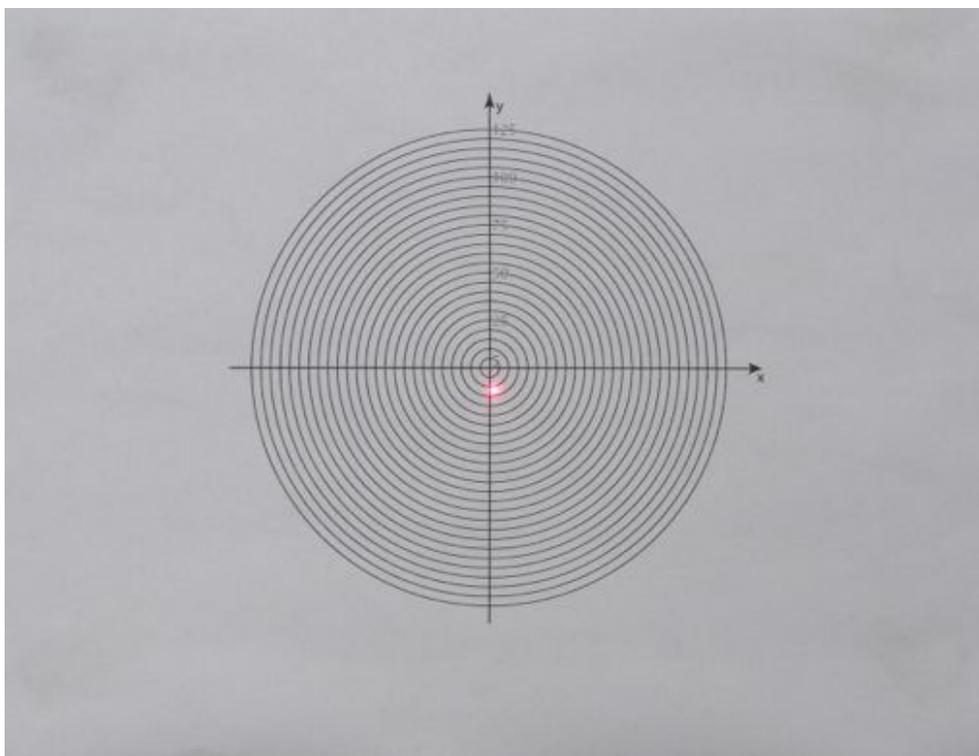


Figura 4.16: *Imagen ejemplo de medición de desplazamiento del LASER en el campo, de aquí se obtenían las coordenadas polares del LASER.*

Tabla 4.9: Resultados de caracterización con tornillo único delantero, Tornillo 1.

vueltas	despl (pix)	áng (deg)	áng corr (deg)	áng X (deg)	áng Y (deg)
0	9.22	49.4	44.2	0.030	0.029
0	13.45	42	36.8	0.049	0.037
1/4	63.51	-82.8	-77.6	0.062	-0.283
1/2	139.03	-88.8	-83.6	0.071	-0.630
3/4	206	-90.3	-85.1	0.080	-0.937
1	279.04	-91	-85.8	0.093	-1.270
0	9.85	66	60.8	0.022	0.039
-1/4	87.86	78.2	73	0.117	0.383
-1/2	158.2	87.1	81.9	0.102	0.715
-3/4	227.22	87.5	82.3	0.139	1.027
-1	303.16	88.1	82.9	0.171	1.373

Tabla 4.10: Resultados de caracterización con tornillo dual izquierdo trasero, Tornillo 2.

vueltas	despl (pix)	áng (deg)	áng corr (deg)	áng X (deg)	áng Y (deg)
0	11.18	100.3	95.1	-0.005	0.051
1/4	51.55	108.1	102.9	-0.053	0.229
1/2	87.56	95.9	90.7	-0.005	0.400
3/4	117.04	88.5	83.3	0.062	0.530
1	155.03	88.9	83.7	0.078	0.703
0	15.26	58.4	53.2	0.042	0.056
-1/4	20.88	-106.7	-101.5	-0.019	-0.093
-1/2	58.56	-102.8	-97.6	-0.035	-0.265
-3/4	91.92	-98.1	-92.9	-0.021	-0.419
-1	117.39	-98.8	-93.6	-0.034	-0.535

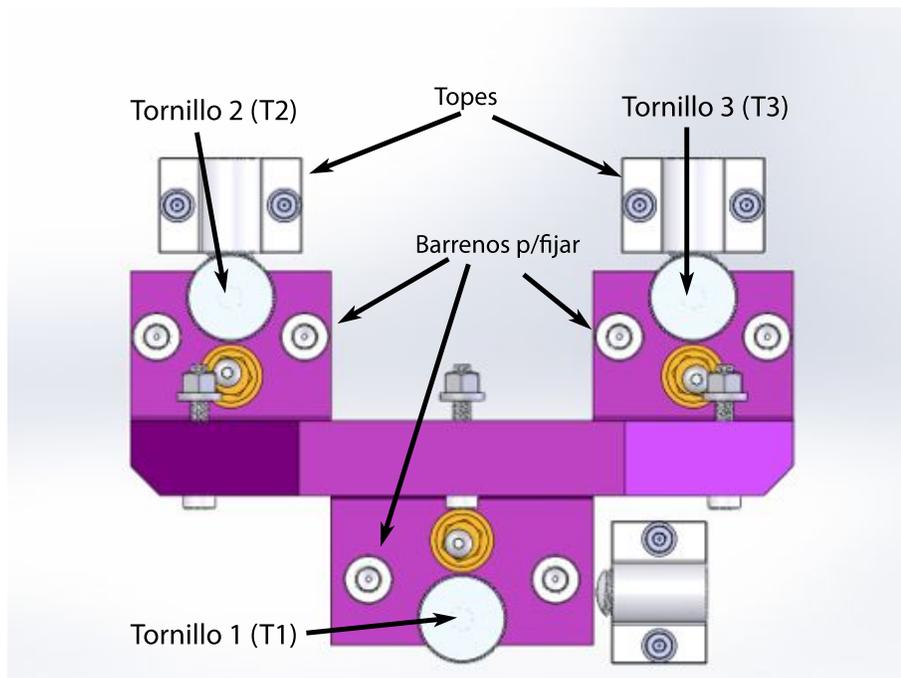


Figura 4.17: Ubicación de los tornillos descritos en las Tablas siguientes.

Tabla 4.11: Resultados de caracterización con tornillo dual derecho trasero, Tornillo 3.

vueltas	despl (pix)	áng (deg)	áng corr (deg)	áng X (deg)	áng Y (deg)
0	29.53	151.7	146.5	-0.112	0.074
1/4	63.56	114.1	108.9	-0.094	0.274
1/2	101.14	104.3	99.1	-0.073	0.456
3/4	138	103.8	98.6	-0.094	0.623
1	177.69	101.7	96.5	-0.092	0.806
0	26.93	148.7	143.5	-0.099	0.073
-1/4	29.21	-128	-122.8	-0.072	-0.112
-1/2	64.54	-102.5	-97.3	-0.037	-0.292
-3/4	107.23	-93.7	-88.5	0.013	-0.489
-1	122.04	-91.4	-86.2	0.037	-0.556

4.3.1 Interpretación

La interpretación de los datos es bastante directa. De la Tabla 4.12 obtenemos la resolución de los movimientos individuales de cada tornillo en cada componente y (lo más importante) la magnitud del desplazamiento angular máximo que se puede obtener en cada componente.

Tabla 4.12: Resumen de resultados, desplazamiento máximo y resoluciones. Los campos marcados como N/A no tienen componentes en ese rango.

	X	Y	-X	-Y
Despl angular max (arcsecs)	612 (en T1)	4932 (en T1)	-432 (en T3)	-4572 (en T1)
Res. en T1 (arcsecs/1/4 vuelta)	150	1250	-81	-1143
Res. en T1 (arcsecs/1/4 vuelta)	63	630	-27	-477
Res. en T1 (arcsecs/1/4 vuelta)	N/A	720	-108	N/A

Es importante considerar que dada la presencia de los topes, especialmente el que se puede observar en la parte inferior de la Figura 4.17, la movilidad en la componente X está limitada, particularmente en el rango positivo. El comportamiento en la componente X es notablemente errático debido a la presencia de los topes.

Conclusiones

En esta tesis se han desarrollado, estudiado y construido las celdas optomecánicas del Brazo Rojo de ESOPPO y las principales conclusiones derivadas se muestran a continuación:

La necesidad y el beneficio de una Ruta de Manufactura (mostrada en el Apéndice A) para asistir a la fabricación de un instrumento astronómico (*ie:* ESOPPO) resultó ser de gran importancia. Durante la aplicación de la mencionada ruta, se llegó a las siguientes conclusiones importantes:

- Las tolerancias maquinado superficial se lograron en el rango de $10 \mu m$ (arriba del límite superior de las capacidades de una fresadora manual) con buena repetitibilidad utilizando la ruta de manufactura propuesta.
- Las capacidades de una montura de autocentrado (*ie:* la MUAC) son importantes para encontrar el cero pieza sistemáticamente.
- La metrología de taller es una etapa importante, puesto nos provee medidas de manera rápida y eficaz que se pueden utilizar para retroalimentar el proceso de manufactura *in situ*.
- Una observación interesante de la metrología es que la aportación de material del anodizado debe considerarse en la etapa de diseño, hay un aumento en espesor del 0.15 % y ello aumentó el margen de error. Especialmente en el filo metálico que es muy susceptible a la electrólisis.
- La manufactura de los soportes radiales, que se hizo por electroerosión para el instrumento OSIRIS, fue posible hacerse en una fresadora CNC utilizando los métodos de sujeción innovadores que se describen en el cuerpo del trabajo.

- El programa en excel desarrollado para calcular las características de la UPD puede funcionar bajo condiciones variadas y es posible utilizarse para cualquier otra UPD.
- El trabajo documentado en esta tesis se puede usar efectivamente como una guía de diseño, manufactura y metrología de celdas optomecánicas para la instrumentación astronómica.
- La integración mostró que el sistema de calibración para la interfaz permite calibrar la posición del eje óptico con una precisión de 1250 arcsecs por cada cuarto de vuelta en el eje horizontal y aproximadamente 150 arcsecs por cada cuarto de vuelta en el eje vertical. Ambos valores suficientes para la calibración.

Ruta a Futuro

- La Ruta de Manufactura se puede convertir en un documento más general y simplificarse aún más para utilizarse como referencia por el equipo de manufactura, antes y durante el propio maquinado de las piezas.
- La interface ante el usuario del programa que calcula la UPD se puede mejorar para obtener mejores resultados e incrementar su uso, incluyendo variables como el tipo de material a usarse.
- Es importante eficientar el proceso de manufactura - metrología. Utilizar una herramienta especial en el cabezal de la CNC para convertirla en un instrumento de medición *impromptu* sería una excelente mejora.

Bibliografía

- [1] J. de la Herran. *Symposium on recent advances in observational astronomy, Ensenada, Mexico*, 41:1–139, 1981.
- [2] Avila R. Tapia M. Cruz-Gonzalez, I. San pedro mártir: Astronomical site evaluation. *Heat and Mass Transfer*, 41:1–8, 2003.
- [3] Wikipedia. List of large optical telescopes, December 2013, http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_large_optical_reflecting_telescopes.
- [4] George E. Dieter. *ENGINEERING DESIGN, A materials and processing approach*. McGraw-Hill, USA, 1991.
- [5] Peter Smid. *CNC Porgramming Handbook*. Industrial Press, third edition, November 2007.
- [6] Ted Busch. *Fundamentals of Dimensional Metrology*, volume 2. Delmar Publishers, 1989.
- [7] Leslie E. Smith Horst Czichos, Tetsuya Saito, editor. *Springer Handbook of Metrology and Testing*, volume 2 edition. Springer Berling Heidelberg, 2011.
- [8] S. Perruchot, D. Kohler, F. Bouchy, and et al. “The SOPHIE spectrograph: design and technical key points for high throughput and high stability”. In A. Moorwood and I. Masanori, editors, *Astronomical telescopes and instrumentation*, volume 6000, pages 1–9, 2008.
- [9] M. Roth, L. Uwe, and W. Heilemann. “PMAS fiber spectrograph: design, manufacture and performance”. In A. Moorwood and I. Masanori, editors, *Optical and IR telescope instrumentaction and detectors*, volume 4008, pages 1–9, 2000.

- [10] R. Navarro, E. Elswik, M. de Haan, and et al. “X-Shooter near-IR spectrograph arm: design and manufacturing methods.”. In E. Atad-Ettinger, J. Antebi, and D. Lemke, editors, *Optomechanical technologies for astronomy*, volume 6273, pages 1–9, 2006.
- [11] A. Farah, J. Gonzalez, and G. Sierra. “Thermal gradient analysis for the ESOPO spectrograph”. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, 7014:1–12, 2008.
- [12] A. Farah. Optomechanical design, manufacturing, assembly, and integration of contemporary camera barrels for astronomical instrumentation. *Optical Engineering*, 073401:1–8, 2008.
- [13] Alejandro Farah. *Diseño y Fabricación Optomecánicos en la Instrumentación Astronómica: OSIRIS*. PhD thesis, UNAM, Julio 2008.
- [14] J. Jesús Gonzalez. Esopo error budget notes. Reporte técnico, UNAM, Enero 2007.

Apéndice A

Instrucciones de trabajo de piso

El siguiente desarrollo incluye las instrucciones de piso (Ruta de Manufactura) que se le dieron a los mecánicos y operadores encargados de fabricar las celdas del proyecto ESOP. El propósito de este documento es evitar la falta de comunicación entre el equipo de diseño y el de manufactura, así como el de facilitar el trabajo del operador y llevar un registro del trabajo hecho y las decisiones tomadas.

A.1 Celdas y suministro de material

En la Figura A.1 se muestra una versión abreviada de la base de datos generada, se muestran las 33 celdas, sus códigos, las dimensiones de sus respectivos tochos y cuantos tochos hay disponibles para la manufactura de cada pieza. Para las piezas más complicadas, se asigna más de un tocho a cada pieza para dar algo de flexibilidad al proceso de manufactura y permitir un error plausible.

A.2 Definición de Ruta de Manufactura

Son instrucciones de alto nivel para los operadores, determinan los pasos a seguir hasta tener el producto terminado. Se definen las herramientas a usar, las piezas a manufacturar, la calidad de los acabados y precisión de los maquinados. La ruta de manufactura es sinónimo de las instrucciones de trabajo de piso.

Tabla A.1: Celdas y material disponible para cada una.

item	Nombre	Código	Tamaño			Stock
			x	y	z	
Celda cámara roja C1						
1	Celda cámara roja C1	ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001	11	11	3	2
2	Soporte radial RD1L1	ESOPO-ME-CAMR-V1-010-002	8	8	1	2
3	Separador 2 CAM-RD1	ESOPO-ME-CAMR-V1-010-003	8	8	1	1
4	Separador3 CAM-RD1	ESOPO-ME-CAMR-V1-010-004	10	8.5	1	1
Celda cámara roja C2						
5	Celda cámara roja C2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-001	10	10	2	1
6	Soporte radial RD21L1	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-002	9	9	0.75	2
7	Soporte radial CAM-RD2L2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-003	9	9	1	2
8	Separador2 CAM-RD2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-004	8	8	1	1
9	Separador3 CAM-RD2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-005	10	9	0.75	1
10	Anillo Interfáz-celda CAM-RD2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-0006	11	11	0.75	1
Celda cámara roja S1						
11	Celda cámara roja S1	ESOPO-ME-CAMR-V1-030-001	10	10	1.5	2
12	Soporte radial RS1	ESOPO-ME-CAMR-V1-030-002	9	9	1	2
13	Separador CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-030-0005	8	8	1	1
Celda cámara roja barril DOS						
14	Celda cámara roja barril DOS	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-001	11	11	3	1
15	Celda atermalización a	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-002				0
16	Celda atermalización b	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-003				0
17	Celda atermalización c	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-004				0
18	Soporte radial CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-005	6.5	6	2	2
19	Soporte radial RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-006	7	8	1	1
20	Separador3 CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-007	7	8	1	1
Celda cámara roja C3						
21	Celda cámara roja C3	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-001	6.5	6	2	2
22	Soporte radial RS3	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-002	5	5	1	2
23	Separador2 CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-003	5	5	1	1
24	Separador3 CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-004	6	6	1	1
25	Extensión CAM-RS3-CR	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-005	10	10	2	1
Celda colimador rojo						
26	Celda colimador rojo	ESOPO-ME-COLR-V1-010-001	9	9	3	2
27	Soporte radial RT1L1	ESOPO-ME-COLR-V1-010-002	7	7	1	2
28	Soporte radial RT1L1	ESOPO-ME-COLR-V1-010-003	7.5	8	1	2
29	Separador1 COL-RT2	ESOPO-ME-COLR-V1-010-004	7	8	1	1
30	Separador2 COL-RT2	ESOPO-ME-COLR-V1-010-005	7	8	1	1
Interfaces						
31	Interfáz Colimador Rojo	ESOPO-ME-ICOLR-V1-010-001	10	8	3	1
32	Interfáz barril 1	ESOPO-ME-ICAMR-V1-010-001	11.5	10	5	1
33	Interfáz barril 2	ESOPO-ME-ICAMR-V1-020-001	11	10	3	1
Extras						
34	Material extra	—	8	8	1	4

A.3 Ruta General, preparación de la pieza

Todas las piezas deben seguir estos pasos antes de su manufactura específica, cuando la ruta general ha sido terminada y la pieza está lista para montarse sobre el MUAC y careadas con superficies paralelas, la pieza estará lista para continuar con las operaciones de maquinado más específicas.

A.3.1 Primer paso

Colocar en la CNC con ayuda de la prensa (ver Tabla A.1) y las barras paralelas el tocho en la prensa, tener cuidado de que la placa quede colocada de tal manera de que los barrenos no lleguen a la prensa, ver Figura A.1.

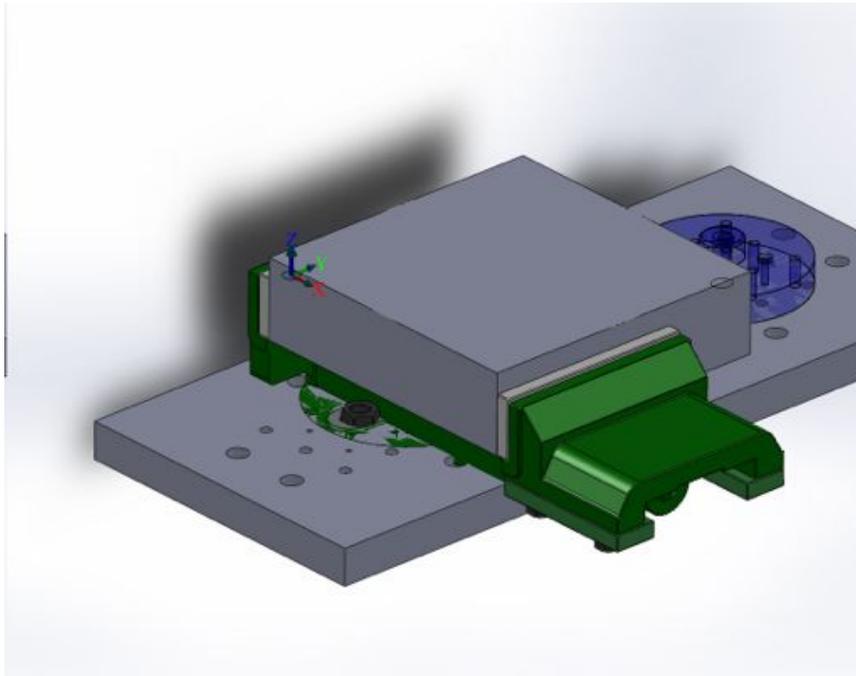


Figura A.1: *El tocho sobre la prensa lista para el careado.*

A.3.2 Careado

La superficie superior del tocho debe ser careada con un acabado mejor a 5 micrómetros. Posteriormente, debe hacerse un barreno de 1.^{en} el centro geométrico de la pieza (ver Figura A.2), precisión de 0.1 mm.

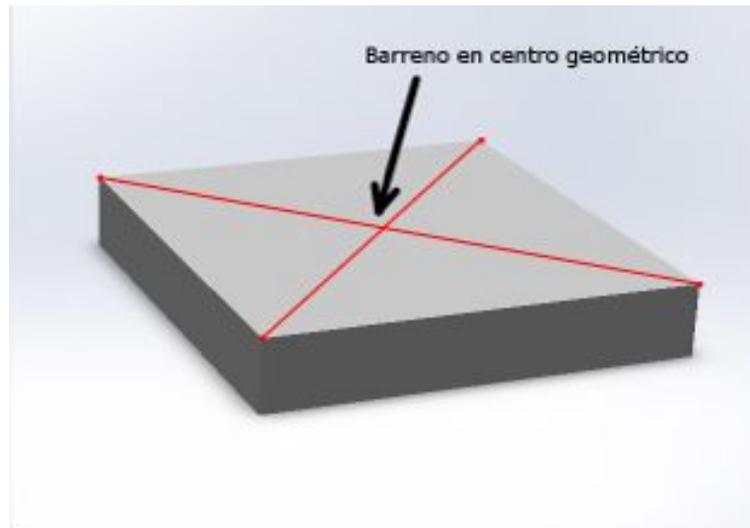


Figura A.2: El barreno debe estar en la intersección de las diagonales.

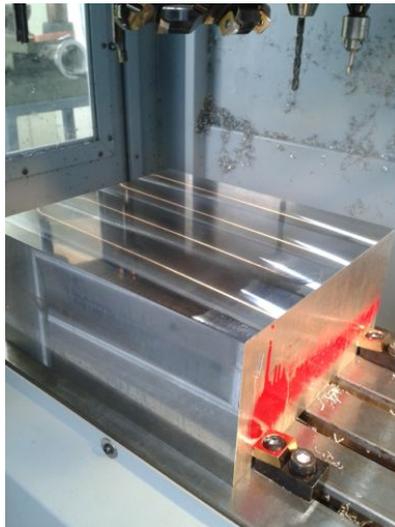


Figura A.3: Un tocho careado en la CNC.

Una vez terminado el barreno del centro, se deben maquinar cuatro nuevos barrenos (ver Figura A.4), se deben escoger los barrenos que mejor se acomoden al tamaño de la pieza, precisión baja, $3/8''$.

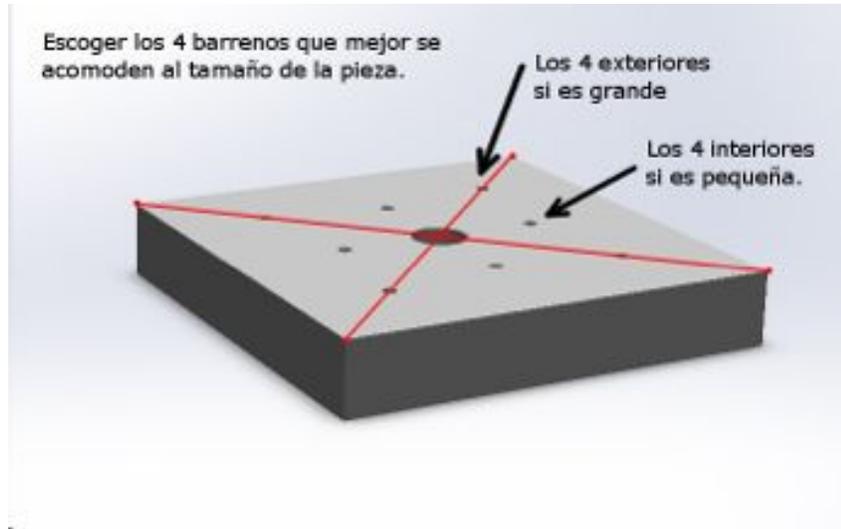


Figura A.4: *Esquemático de los barrenos auxiliares.*

A.3.3 Recorte

Se procede al recorte del envolvente de la pieza (ver Figura A.5). Todas las piezas tienen envolventes circulares y terminar el recorte de la pieza en la etapa de preparación ayudará a ahorrar tiempo en la etapa de manufactura de precisión.

A.3.4 Sección en torno

En el torno, montado sobre el soporte MUAC se procede a colocar el tocho con la cara planeada apoyada hacia la chuck y el careado de la segunda superficie externa del tocho. Se debe carear exclusivamente la parte útil incluyendo tolerancia holgada hacia el interior y el exterior pasado.

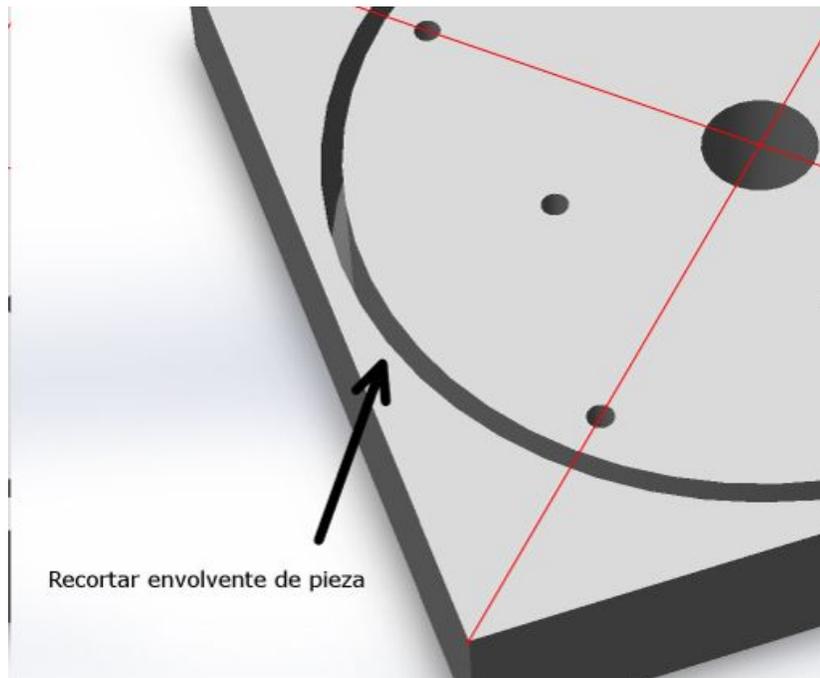


Figura A.5: *Esquemático de recorte del tocho.*

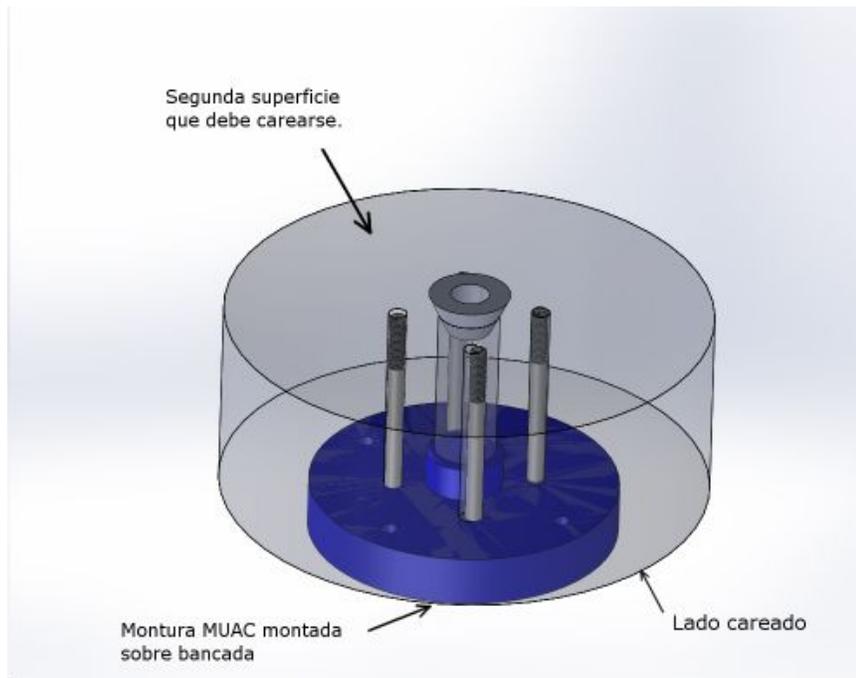


Figura A.6: *Muestra del tocho recortado montado sobre el MUAC.*

A.4 Ruta Semi-Específica

Para facilitar la manufactura las piezas se dividen en 6 categorías generales, para cada categoría la CNC tiene los mismos elementos en el porta-herramientas.

A.4.1 Celdas

Las siguientes seis (6) piezas entran en la categoría de Celdas. A continuación mostramos una imagen representativa de esta categoría.

Tabla A.2: Las seis piezas a fabricar en la categoría de celdas.

Celda cámara roja C1	ESOPO-ME-CAMR-V1-010-001
Celda cámara roja C2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-001
Celda cámara roja S1	ESOPO-ME-CAMR-V1-030-001
Celda cámara roja bar II	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-001
Celda cámara roja C3	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-001
Celda colimador rojo	ESOPO-ME-COLR-V1-010-001

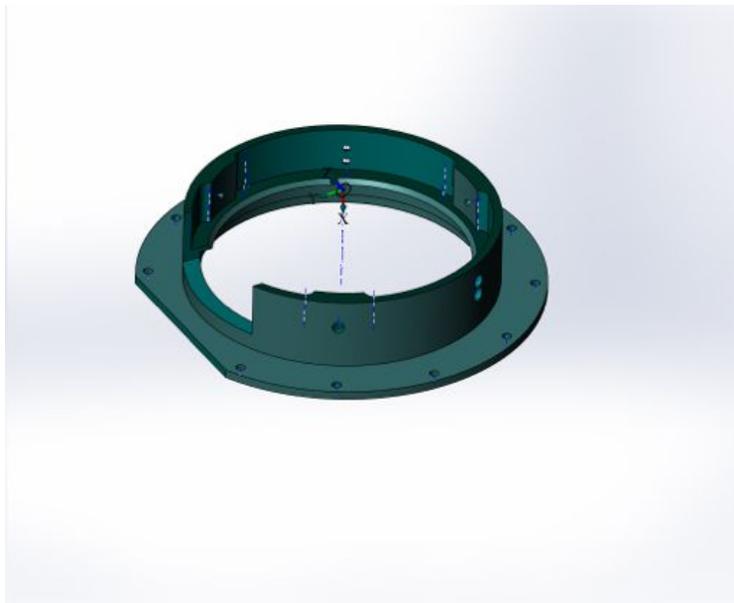


Figura A.7: Celda cámara roja C1, todas las celdas son de esta forma básica.

Una vez montado el tocho sobre la MUAC (Figura A.8) hay que proceder con el maquinado. En el caso de las celdas la superficie interior es la más delicada y se recomienda empezar por allí (Figura A.9).

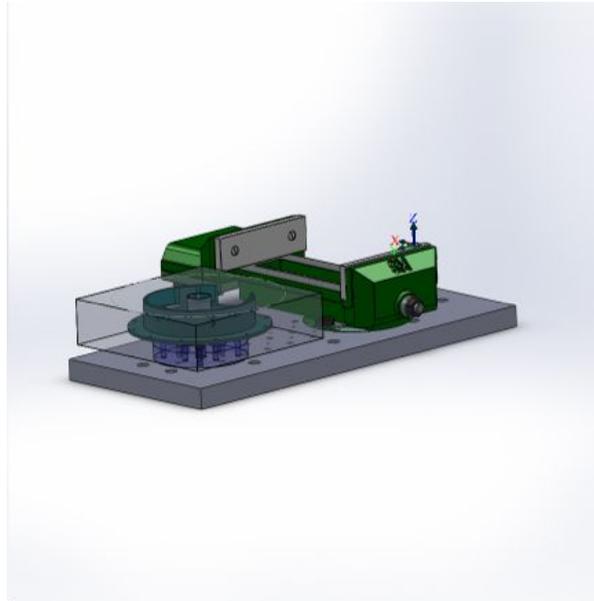


Figura A.8: *El tocho debe estar montado sobre el MUAC y no sobre la prensa.*

Una vez terminado el maquinado de la superficie interior que se muestra en la imagen A.9 con tolerancia en el acabado superficial de 0.01 mm se procede a cortar la superficie exterior que se muestra en dicha imagen así como el escalón y barrenos que se muestran a continuación.

La pieza tiene cortes en la parte de atrás (el lado opuesto al que está montado) que se deben cortar en torno una vez desmontada de la fresadora. La Figura A.11 muestra un detalle de los cortes. Para llevar a cabo estos cortes, la pieza se debe montar en el MUAC al revés de como se montaría normalmente.

Una vez hechos los cortes de la parte inferior, y los maquinados extras, la pieza se debe trunzar para desprenderla del tocho y comenzar los barrenos transversales, cuerdas, acabados y posteriormente la metrología.

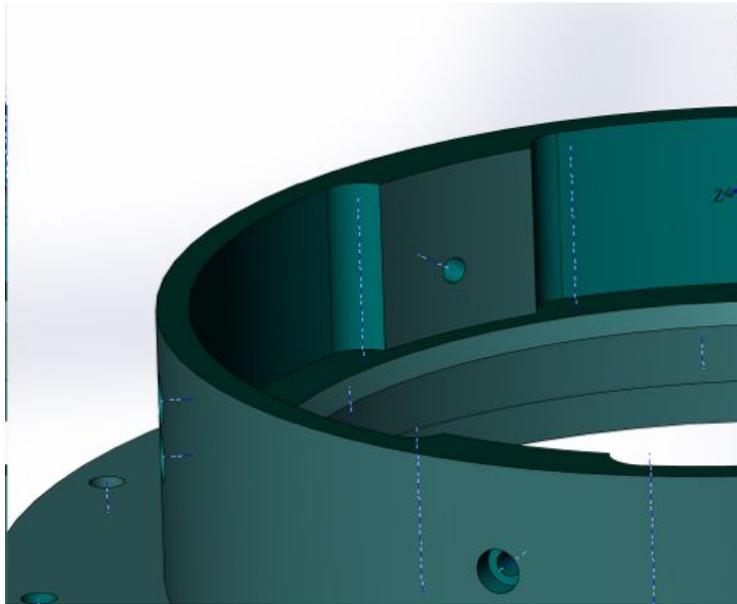


Figura A.9: *Detalle de Celda cámara roja C1*

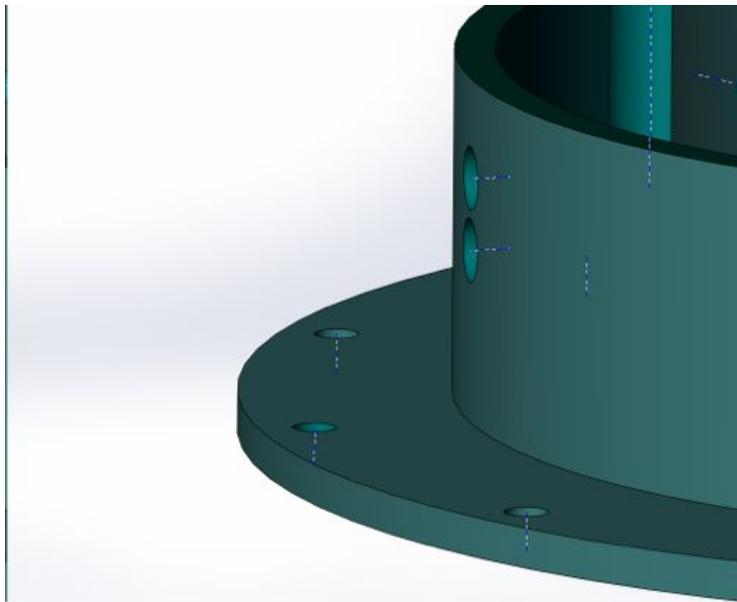


Figura A.10: *Detalle de escalón y barrenos.*

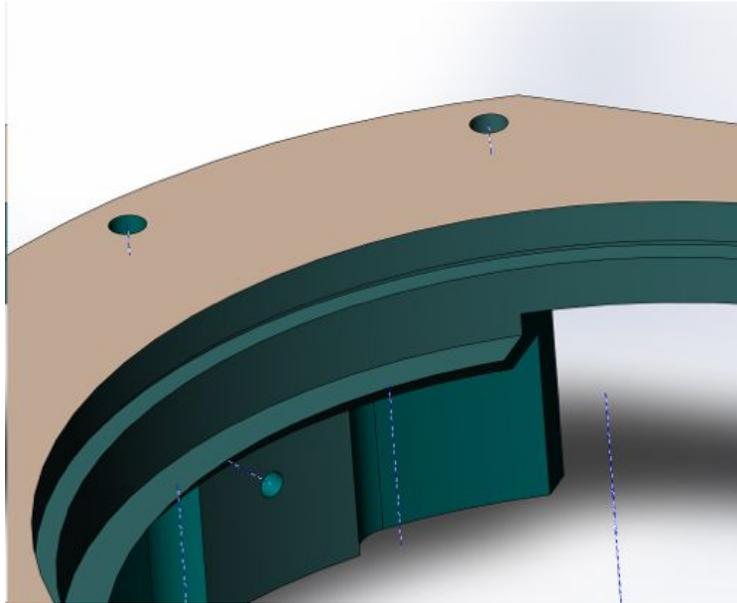


Figura A.11: *Detalle de cortes inferiores. En la parte inferior se puede ver la superficie interior que se lleva a cabo en el primer corte.*

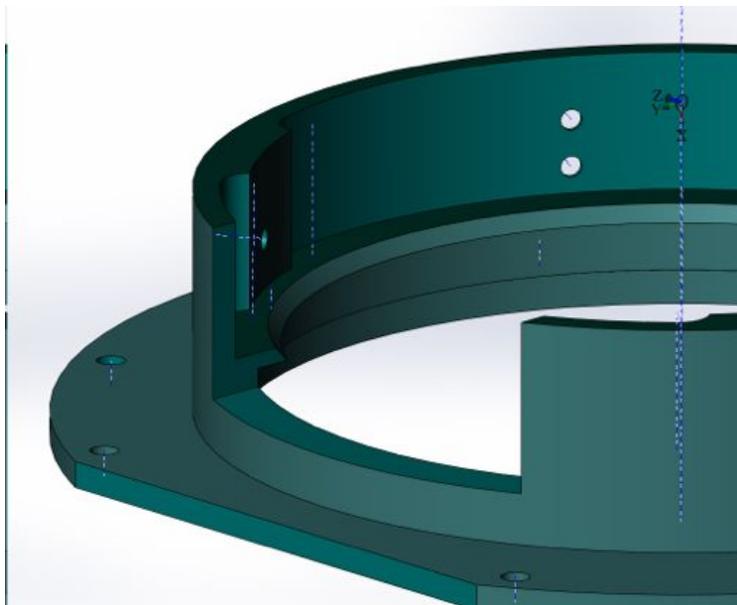


Figura A.12: *Detalle de maquinado extra único para la Celda cámara roja C1.*

A.4.2 Soportes Radiales

Las siguientes 9 piezas corresponden a la categoría de Soportes Radiales. A continuación mostramos una imagen característica de la categoría.

Tabla A.3: Las seis piezas a fabricar en la categoría de soportes radiales

Soporte radial RD1L1	ESOPO-ME-CAMR-V1-010-002
Soporte radial RD21L1	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-002
Soporte radial CAM-RD2L2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-003
Soporte radial RS1	ESOPO-ME-CAMR-V1-030-002
Soporte radial CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-005
Soporte radial RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-006
Soporte radial RS3	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-002
Soporte radial RT1L1	ESOPO-ME-COLR-V1-010-002
Soporte radial RT1L1	ESOPO-ME-COLR-V1-010-003

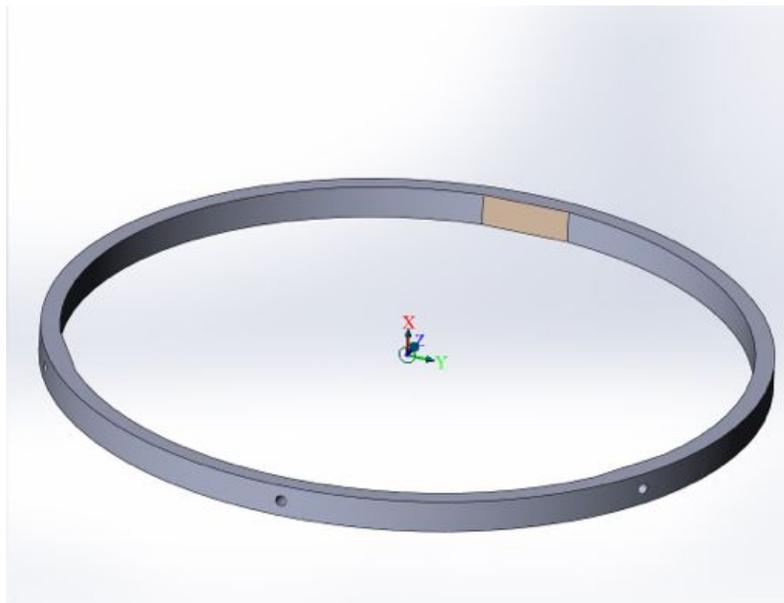


Figura A.13: *Soporte Radial RD21L*. Note la tres superficies planas cada 120 grados.

Una vez montado el tocho sobre la MUAC (como lo muestra la siguiente imagen) hay que proceder con el maquinado. Las tres superficies planas de los soportes radiales son

de los maquinados que involucran mayor precisión y se recomienda tener cuidado extra.

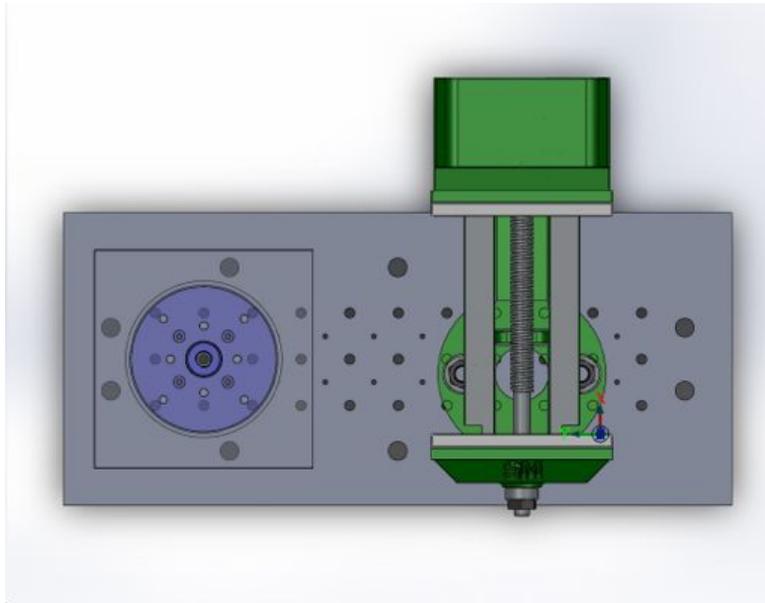


Figura A.14:

Se procede con el maquinado del interior de la pieza junto con los tres planos. Posteriormente se carea del lado opuesto, montando el MUAC al revés de manera semejante a las otras piezas. El careado debe terminar por cortar la pieza y separarla, dejándola lista para la aceptación y la metrología.

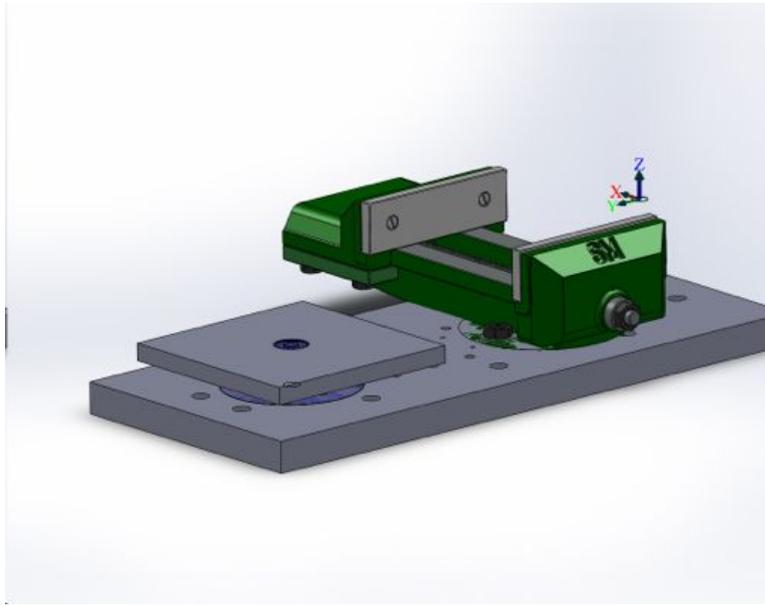


Figura A.15: Se muestra el tocho montado sobre el MUAC con la prensa sólo como referencia.

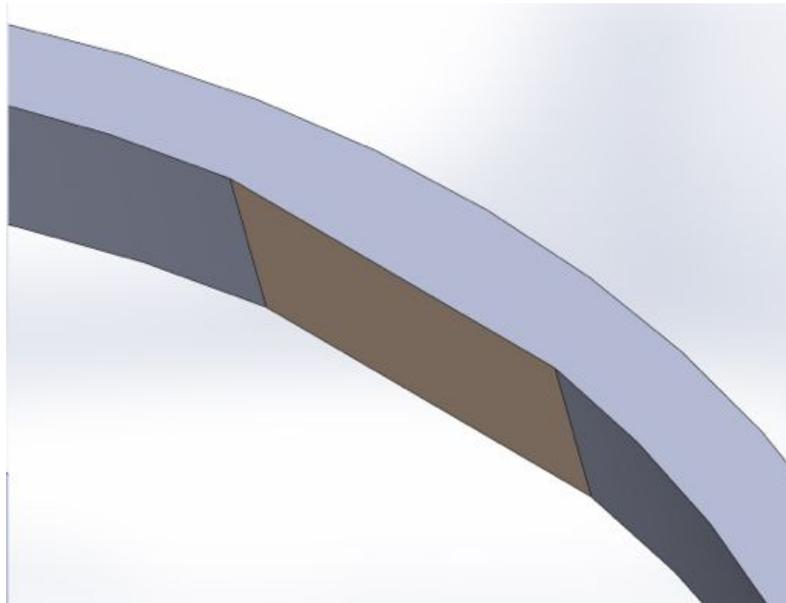


Figura A.16: Soporte Radial RD21L1, la superficie plana se muestra de otro color para resaltarla.

A.4.3 Separadores

Las siguientes diez piezas son separadores, los separadores son de las piezas más sencillas y con necesidad de menor precisión. Se puede ver en la imagen que sus formas no son muy complicadas.

Tabla A.4: La seis piezas a fabricar en la categoría de separadores

Separador 2	CAM-RD1	ESOPO-ME-CAMR-V1-010-003
Separador3	CAM-RD1	ESOPO-ME-CAMR-V1-010-004
Separador2	CAM-RD2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-004
Separador3	CAM-RD2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-005
Separador	CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-030-0005
Separador3	CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-007
Separador2	CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-003
Separador3	CAM-RS2	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-004
Separador1	COL-RT2	ESOPO-ME-COLR-V1-010-004
Separador2	COL-RT2	ESOPO-ME-COLR-V1-010-005

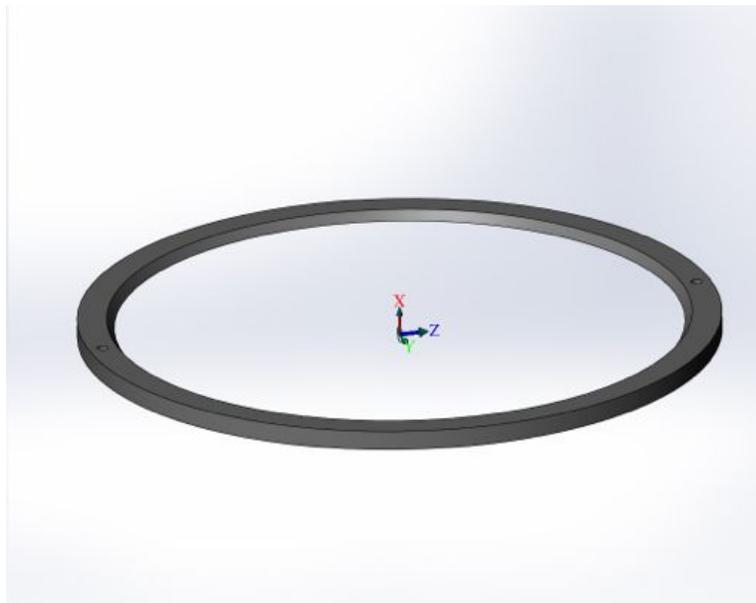


Figura A.17: *Un ejemplo de separador genérico.*

Una vez montado en la montura MUAC se procede a hacer el careado y el corte inte-

rior, algunos de los separadores tienen cortes especiales. Si se ve con atención la Figura A.18 se ve como tiene un rampa en la parte interior.

Para algunas piezas los siguientes cortes (en este caso la rampa interior y un escalón en el reverso de la pieza) se debe transportar el tocho a la montura MUAC del torno.

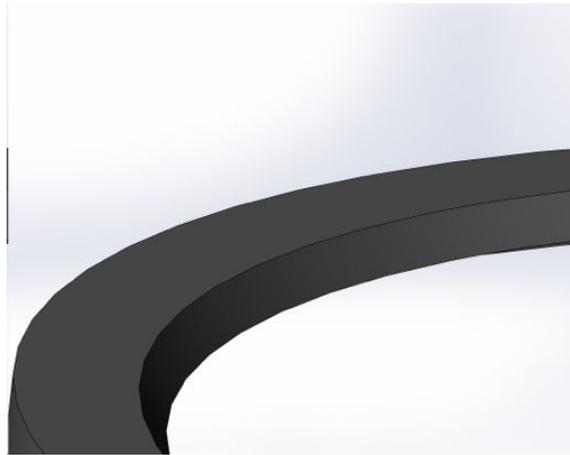


Figura A.18: *Note la rampa en la parte interior, este acabado se debe hacer en el torno.*

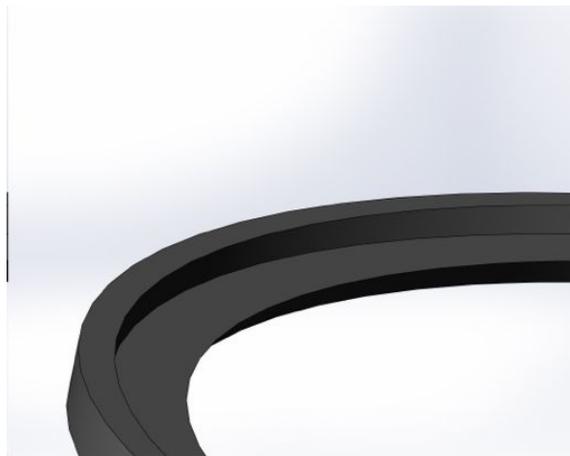


Figura A.19: *Detalle del escalón en el reverso de la pieza.*

Una vez terminados estos cortes, la pieza se debe trincar con cualquiera de los métodos usados anteriormente.

A.4.4 Interfaces

Las siguientes tres piezas son interfaces, estas piezas son las más grandes, y la planicidad de sus acabados es de mucha importancia.

Tabla A.5: La tres piezas a fabricar en la categoría de interfaces

Interfáz Colimador Rojo	ESOPPO-ME-ICOLR-V1-010-001
Interfáz barril 1	ESOPPO-ME-ICAMR-V1-010-001
Interfáz barril 2	ESOPPO-ME-ICAMR-V1-020-001



Figura A.20: *Interfáz Colimador Rojo.*

Una vez montado el tocho en el MUAC siguiendo instrucciones semejantes a los anteriores, se procede al maquinado de las superficies importantes. Esta pieza tiene varios planos importantes y se debe maquinar por los dos lados.

Se carea la parte superior junto con las patas, y de manera análoga la parte inferior, colocando la pieza en la MUAC del lado correspondiente.

Una vez hecho el careado, se procede a cortar el círculo interior. Esta pieza es lo suficientemente fuerte como para que los últimos desbastes se hagan sosteniendo la propia pieza con la prensa.

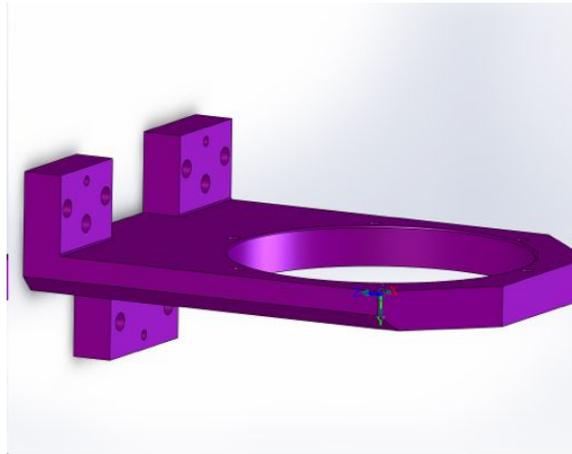


Figura A.21: *Detalle de la interfáz del colimador rojo. Se debe carear la parte superior e inferior con mucha precisión.*



Figura A.22: *Detalle de corte interior, notesé el mate en la parte superior e inferior. Estos cortes se deben hacer en la CNC.*

A.4.5 Celdas de atermalización

Estas piezas tienen la función de compensar por los cambios en el coeficiente de expansión térmica entre la óptica y los elementos optomecánicos. Por razones obvias, las piezas no son de aluminio y su diseño final depende de la presentación final de la óptica, por ello, al momento de este trabajo aún no se tiene la especificación del material a usarse.

Tabla A.6: Las tres piezas a fabricar en la categoría de celdas de atermalización.

Celda atermalización a	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-002
Celda atermalización b	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-003
Celda atermalización c	ESOPO-ME-CAMR-V1-040-004

A.4.6 Otras

Algunas de las piezas están hechas para cumplir con algunos compromisos de tamaño e integración, estas piezas son únicas y no entran en ninguna de las categorías anteriores. Son piezas relativamente sencillas en lo respectivo al maquinado.

Tabla A.7: Las dos piezas a fabricar que no entran en ninguna de las categorías anteriores.

Anillo Interf-cel CAM-RD2	ESOPO-ME-CAMR-V1-020-0006
Extensión CAM-RS3-CR	ESOPO-ME-CAMR-V1-050-005