



**I
N
A
O
E**

Desarrollo de un Reductor Focal para el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro

Por
Juan Enrique González Gómez

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requisitos para obtener
el grado de

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ASTROFÍSICA**

En el

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Agosto 2024
Tonantzintla, Puebla

Asesores:

Dr. Yalia Divakara Mayya, INAOE
Dra. Perla Carolina García Flores, INAOE

©INAOE 2024

Derechos reservados

El autor otorga al INAOE permiso para reproducir y distribuir copias
de este documento de tesis en su totalidad o en partes mencionando la
fuente.



Desarrollo de un Reductor Focal para el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro

Ing. Juan Enrique González Gómez

INAOE

Coordinación de Astrofísica

Tesis Para Obtener el Grado de Maestría en Ciencias de la
Especialidad de Astrofísica

Asesores:

Dr. Yalia Divakara Mayya

Dra. Perla Carolina García Flores

Sta. María Tonanzintla, Puebla México

Agosto 2024

Agradecimientos

A mis padres por tener dentro de ellos las mejores virtudes que heredé.

Al INAOE por permitir mi formación de estudios de postgrado y enseñarme tanto en tan poco tiempo.

Al Dr. Yalia Divakara Mayya por permitirme ser su asesorado facilitándome el respaldo académico y financiamiento para efectuar mi proyecto de tesis.

A la Dra. Perla Carolina García Flores por siempre estar disponible y de buena manera para animarme, escucharme y recomendar detalles a tomar en cuenta que no siempre lograba observar.

Al Dr. Edgar Castillo Domínguez por su paciencia y guía a lo largo del desarrollo del proyecto y especialmente por siempre haber estado disponible para asesorarme cada vez que lo necesité.

Al Dr. Fernando Fabián Rosales Ortega por facilitar sus recursos, estar al pendiente del desarrollo del proyecto y ayudar en la gestión con la coordinación para permitirme desarrollar este trabajo de tesis.

A la coordinación de astrofísica por confiar en mi y facilitar las acciones administrativas poniendo como prioridad los deseos personales de mi formación académica, esperando continúen motivando a los alumnos en cualquier área que estos escojan, ya que del entendimiento nace el gusto por las cosas.

Al Dr. Manuel Gerardo Corona Galindo por su confianza y capacidad de ver lo que otras personas no, además de aconsejarme compartiendo su conocimiento y experiencia cada vez que lo necesité.

A la Coordinación de óptica y sus investigadores por permitirme conocer el INAOE y además responderme dudas del área cada vez que lo requerí, esperando continúe siempre una buena colaboración entre todas las áreas del instituto.

Al Dr. Rafael Izazaga Pérez por actuar como un coasesor extra oficial sin obligación alguna, siempre estando disponible para aclararme dudas o conceptos de manufactura óptica y demás para el desarrollo de mi tesis.

Al Dr. Sergio Vazquez Y Montiel por compartir un poco de su gran experiencia en diseño óptico que me fue de mucha utilidad.

Al personal técnico, a los estudiantes de postgrado y en especial a Jorge De Jesús Alvarado Martínez, por compartir su conocimiento adquirido y así facilitar el desarrollo de este trabajo.

A todas las personas con las que me ha tocado coincidir en esta vida, todas me han ayudado a formar la persona que soy ahora, en verdad muchas gracias.

Abstract

In this work is described the development of a focal reduction optical system for the 2.1m telescope at the Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), making use of existing glass blanks, a filter wheel and a new back-illuminated CCD camera available at OAGH. The system reduces the original telescope's focal ratio from $f/12$ to $f/3.6$, bringing a field-of-view of 6 arc minutes into the 1024×1024 pixels CCD with a 13 microns pixel size, resulting in a plate scale of 0.355 arcsec/pix in the focal reducer image plane, making possible a nyquist sampling even with good seeing conditions ($1 \sim \text{arcsec}$) at the OAGH.

In addition a tolerance analysis for the optical elements was performed to generate the optical manufacturing drawings, to establish limits on the allowed assembly errors in order to keep the optical reducer functionality, taking into consideration manufacturing cost and budget. Furthermore, a thermal operation analysis of the instrument was performed, together with a mechanical design of the assembly considering the telescope and the detector. It is important to note that the optical and mechanical design, as well the corresponding simulations carried out as part of this thesis were made in the licensed-software Optic Studio and Solidworks.

Resumen

En este trabajo de tesis se describe el desarrollo de un sistema óptico reductor focal, que se utilizará para aumentar la capacidad de observación del telescopio del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH). Para el diseño se utilizaron unos blanks de vidrio óptico no utilizados en un proyecto anterior, una cámara con un CCD de 1024 x 1024 píxeles con un tamaño de píxel de 13 micras y una rueda de filtros con una ventana cuadrada de 46 mm por lado. El sistema obtenido reduce la razón focal del telescopio a $f/3.6$, coloca 6 minutos de arco en el CCD y la escala de placa en el plano imagen del sistema (0.355 arcsec/pix), permite hacer un muestreo eficiente con el detector aun con buen seeing en el OAGH ($\sim 1,0$ segundos de arco).

Posteriormente se realizó el análisis de tolerancias de los elementos ópticos del sistema, para poder generar los planos de manufactura óptica y obtener los parámetros de alineación del mismo en el ensamble. Se tuvo especial cuidado que estos parámetros estuvieran dentro de la posibilidad de fabricación y presupuesto. Se hizo también el análisis térmico de operación del instrumento y el diseño mecánico del ensamble para montarlo en el telescopio y colocar el detector. Es importante señalar que el diseño óptico y mecánico así como las simulaciones correspondientes de este sistema, fueron hechas en los software de Optic Studio y Solidworks.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH)	2
1.2. Cámara directa del observatorio	5
1.3. CCD ANDOR	9
1.4. Justificación del proyecto	11
1.5. Objetivos generales y específicos del proyecto	12
2. Marco teórico previo al diseño óptico de un reductor focal	14
2.1. Sistema óptico	14
2.2. Aspectos iniciales y parámetros ópticos fundamentales	15
2.3. Aberraciones ópticas	16
2.4. Patrón y disco de Airy	17
2.5. Diagrama de manchas y energía encerrada	18
2.6. Función de dispersión de punto o PSF	21
2.7. Función de transferencia de modulación o MTF	23
2.8. Criterios de calidad y eficiencia óptica	26
2.8.1. Criterios de calidad de imagen de objetos puntuales	27
2.8.2. Criterios de calidad de imagen de objetos extendidos	28
2.9. Optimización de un sistema óptico y modelado inicial de un reductor focal	29
3. Consideraciones, análisis y criterios básicos para manufactura óptica y diseño óptomecánico	36
3.1. Análisis de tolerancias ópticas	36
3.1.1. Tolerancias de manufactura óptica	37
3.1.2. Tolerancias de ensamble mecánico	38
3.1.3. Tolerancias de manufactura mecánica	40
3.1.4. Compensadores	42
3.1.5. Análisis de sensibilidad	44
3.1.6. Simulación Montecarlo	44
3.2. Análisis térmico de operación	45
3.3. Resumen teórico para diseño optomecánico	46
3.3.1. Propiedades y efectos físicos relevantes en optomecánica	47
3.3.2. Materiales comunes para sistemas optomecánicos	50
3.3.3. Criterios de integridad optomecánica	51
3.3.4. Tipos de ensamble óptico	53
3.3.5. Mecanismos de Ajuste	58

4. Diseño óptico	60
4.1. Metodología y obtención del diseño óptico	60
4.1.1. Necesidades del diseño óptico	60
4.1.2. Limitaciones y restricciones para el diseño	62
4.1.3. Técnicas y proceso de diseño	65
4.2. Análisis de tolerancias	88
4.2.1. Elección de parámetros y tolerancias máximas	88
4.2.2. Compensadores a utilizar	89
4.2.3. Resultados del análisis de sensibilidad y simulación Montecarlo	90
4.2.4. Tolerancias de manufactura óptica y ensamble mecánico establecidas para el diseño	98
4.3. Características del diseño óptico final	100
5. Diseño optomecánico	117
5.1. Análisis térmico de operación	117
5.2. Características y descripción del Ensamble mecánico	121
5.2.1. Acoplador con el sistema guiador del telescopio y la rueda de filtros	123
5.2.2. Ensamble de COL1 y COL2	125
5.2.3. Ensamble y acople del espejo diagonal M1	126
5.2.4. Celda de CAM1 y CAM2	129
5.2.5. Ensamble CAM1 Y CAM2 con el sistema de ajuste lateral del elemento compensador	131
5.2.6. Ensamble de CAM3 y CAM4	133
5.2.7. Ensamble de CAM5 y CAM6	134
5.2.8. Ensamble completo del barril de la cámara	136
5.2.9. Propiedades físicas de los materiales utilizados en el ensamble	138
5.3. Análisis estructural y resultados de las simulaciones de elementos finitos	138
5.3.1. Flexiones de la estructura	138
5.3.2. Estrés y desplazamientos en la óptica a causa de los efectos térmicos de los materiales del sistema optomecánico	144
5.3.3. Validación del sistema de ajuste	158
6. Conclusiones	162

Índice de figuras

1.1. Fotografías del telescopio y la cúpula del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH).	2
1.2. Características del telescopio de OAGH [9].	3
1.3. Detalles técnicos del telescopio de OAGH [mm] [14].	4
1.4. Fotografía de la base del telescopio con la cámara directa: 1) Base del sistema guiador donde se ensambla la mayoría de los instrumentos 2) Rueda de filtros 3) Botella criogénica donde se encuentra el CCD.	5
1.5. Filtros de banda ancha disponibles en OAGH.	6
1.6. Rueda de filtros de la cámara directa del OAGH.	6
1.7. Dimensiones externas e internas de la estructura mecánica de la rueda de filtros [mm].	7
1.8. Características técnicas del detector Tektronix [8].	8
1.9. Curva de eficiencia cuántica de CCD Tektronix [8].	8
1.10. Curva de eficiencia cuántica del CCD ANDOR de acuerdo al fabricante.	10
1.11. Características técnicas del CCD ANDOR de acuerdo al fabricante.	11
2.1. Representación gráfica de conceptos de propagación de la luz: a) Rayos partiendo de un punto objeto que atraviesan un sistema óptico; b) Imagen superpuesta con ambos conceptos teóricos de propagación; c) Frente de onda partiendo de un punto objeto y atravesando un sistema óptico [24].	16
2.2. Algunos tipos de aberración: a) Aberración esférica; b) Coma; c) Aberración cromática d) Curvatura de campo [13].	17
2.3. Ejemplo ilustrativo de un patrón de Airy producido por un sistema libre de aberraciones ópticas [24].	18
2.4. Ejemplo de un diagrama de manchas estándar: a) Escala impuesta por el usuario en μm para analizar la distribución de rayos en el plano imagen; b) Posiciones angulares del plano objeto respecto al eje óptico; c) Disco central de Airy del sistema libre de toda aberración referente a una longitud de onda escogida por el usuario; d) Organización de los puntos del FOV del sistema a analizar; e) Raíz cuadrática media de la dispersión central de los puntos objeto en el plano imagen, en donde se muestra una media estadística del radio que encierra la mancha; f) Dimensión del radio geométrico real que encierra toda la mancha; g) Longitudes de onda seleccionadas para analizar; h) Altura correspondiente del FOV del plano objeto en el plano imagen en mm.	19

2.5. Ejemplo de un diagrama de manchas extendido que separa los rayos en el plano por longitud de onda en distintas posiciones del campo de visión que se quiera analizar, en esta imagen se puede observar que se colocó un círculo de 20 micras de diámetro que pudiese ser el tamaño del disco de seeing en el plano imagen del reductor focal.	20
2.6. Ejemplo de un gráfico de energía encerrada con el eje horizontal a escala micrométrica, donde la magnitud representa el radio del círculo que encierra la energía en un espacio del plano imagen. Cada curva contiene la energía promedio de todas las longitudes de onda y las distintas curvas muestran este comportamiento en otros puntos del campo de visión.	21
2.7. PSF de un sistema libre de aberraciones limitado solo por difracción: en la gráfica se puede apreciar que la mayoría de la energía que representa un punto objeto, esta concentrada en un círculo de radio menor a 13.2 micras visto en la escala horizontal del plano imagen.	22
2.8. Razón de Strehl: gráfica que muestra como este parámetro nos da información del esparcimiento del punto objeto en el plano imagen [28].	22
2.9. Patrón de franjas blancas y oscuras [24].	23
2.10. Ejemplo ilustrativo de diseños con distintas capacidades de resolver objetos con cierta resolución y contraste. En la figura vemos como cada vez que se requiere mayor capacidad de resolución la imagen puede ser no resuelta por el sistema óptico. [15].	24
2.11. Comparación de gráfica de MTF y su interpretación: El eje vertical tiene una escala normalizada de 0 a 1 con el porcentaje de contraste siendo 1 el 100 % del contraste y el eje horizontal contiene la frecuencia en términos de ciclos (1 par de líneas). Se puede apreciar que entre mas pequeño sea el tamaño del objeto será mas difícil que el sistema lo pueda resolver con un contraste adecuado [24].	25
2.12. Curva de MTF policromática típica del programa de diseño óptico: En el eje vertical se encuentra el porcentaje de contraste que se obtiene del módulo de la función de transferencia óptica y en el eje horizontal la frecuencia espacial en ciclos por mm (que nos da la relación de cuantas líneas de cierto espesor del plano objeto se pueden resolver en el plano imagen). En esta gráfica se muestra la MTF del sistema óptico en distintos puntos y alturas del FOV, diferenciadas con distintos colores según el punto del campo que se quiera analizar.	26
2.13. Imagen de como la turbulencia atmosférica o seeing determina el tamaño angular en el cielo de un objeto puntual. A) seeing de 0.7 segundos de arco ; B) seeing de 2 segundos de arco.	27
2.14. A) Imagen de dos objetos no resueltos por un sistema óptico B) Imagen de dos objetos resueltos por un sistema óptico. [24].	28
2.15. Esquema visual de un proceso de optimización random: La gráfica muestra el camino de valores que el algoritmo va obteniendo al variar parámetros de la función. [27].	30
2.16. Ejemplos del impacto en las aberraciones al modificar algunos parámetros en la óptica [27], a) índice de refracción, b) cantidad de elementos, c) combinación de materiales, d) ángulo de incidencia del rayo.	32

2.17. Ejemplos de algunos tipos de reductores: a) Reductor focal del Observatorio Michigan-Dartmouth-MIT Telescopio McGraw-Hill de 1.3 metros; b) Reductor focal f/2.8 del Telescopio de Vainu Bappu f/13 de 2.3 m; c) Reductor focal del Telescopio Nacional Tailandés; d) Reductor focal para CQUEAN del Telescopio Otto Struve de 2.1 m del observatorio McDonald.	34
3.1. Tabla estándar de tolerancias ópticas [29].	38
3.2. Errores de ensamble de un sistema óptico [26].	39
3.3. Tabla estándar de tolerancias optomecánicas [31].	39
3.4. Simbología de tolerancias de manufactura mecánica [26].	40
3.5. Simbología de parámetros mecánicos [26].	41
3.6. Criterios de dificultad de tolerancias de maquinado [26].	42
3.7. Tipos de elementos usados como compensadores con el movimiento de ajuste sugerido [2].	43
3.8. Ilustración que muestra el efecto de desenfoque por efectos térmicos en los materiales ópticos y mecánicos del sistema [2].	46
3.9. Tipos de esfuerzos.	47
3.10. Relación entre las constantes de rigidez elástica [26].	48
3.11. Preferencia técnica en propiedades de materiales para diseño optomecánico[26].	49
3.12. Coeficientes de estrés óptico de algunos materiales[26].	50
3.13. Criterios de error en OPD permitidos para distintas aplicaciones [26].	53
3.14. Ejemplo ilustrativo de un montaje duro [2].	54
3.15. Ejemplo ilustrativo de un montaje empotrado [32].	55
3.16. Ejemplo ilustrativo de un montaje elastométrico [26].	55
3.17. a) Barril con espaciadores b) Barril con escalones internos [26].	56
3.18. Geometrías de contacto entre la superficie óptica y la retención axial: a) Contacto cuadrado b) Contacto tangente c) Contacto a 135 grados d) Contacto toroidal e) Contacto con misma curvatura f) Contacto plano [2].	57
3.19. Ejemplos ilustrativos de ensamblajes con elementos de sujeción axial suave: a) Retención con flexor b) Retención con O-ring c) Retención con Resorte ondulado [32].	58
3.20. Componentes para ajustes lineales [2].	59
3.21. Componentes para ajustes de inclinación [2].	59
3.22. Componentes para ajustes rotatorios [2].	59
4.1. Imágenes astronómicas de la: a) Remanente de supernova M1 [23] b) Nebulosa de la laguna M8 [30].	61
4.2. Especificaciones de los vidrios ópticos disponibles para el diseño del reductor focal.	63
4.3. Vista de corte del ensamble que muestra la distancia entre el ultimo lente y el CCD ANDOR.	64
4.4. Tipo de montura y dimensiones de la estructura del CCD ANDOR.	64
4.5. Diagrama de rayos del diseño f/2.5 y 10 minutos de arco. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.	66
4.6. Diagrama de manchas estándar del diseño f/2.5 y 10 minutos de arco..	67
4.7. Diagrama de manchas extendido del diseño f/2.5 y 10 minutos de arco, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	68

4.8. Diagrama de rayos del primer modelo de diseño f/3.2 y 8 minutos de arco. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.	69
4.9. Diagrama de manchas estándar del primer modelo de diseño f/3.2 y 8 minutos de arco.	70
4.10. Diagrama de manchas extendido del primer modelo de diseño f/3.2 y 8 minutos de arco, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	71
4.11. Diagrama de rayos del segundo modelo de diseño f/3.2 y 8 minutos de arco con rango espectral reducido. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.	72
4.12. Diagrama de manchas estándar del segundo modelo de diseño f/3.2 y 8 minutos de arco con rango espectral reducido.	73
4.13. Diagrama de manchas extendido del segundo modelo de diseño f/3.2 y 8 minutos de arco, con rango espectral reducido y con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	74
4.14. Ilustración que muestra como distinta razón focal coloca un mismo campo de visión en el plano imagen del detector.	75
4.15. Diagrama de rayos del diseño inicial f/3.6 y 6 minutos de arco. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.	75
4.16. Diagrama de manchas estándar de diseño inicial f/3.6 y 6 minutos de arco.	76
4.17. Diagrama de manchas extendido de diseño inicial f/3.6 y 6 minutos de arco con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	77
4.18. Coeficientes de Seidel del diseño inicial f/3.6 con 6 minutos de arco.	78
4.19. Diagrama de Seidel del diseño inicial f/3.6 con 6 minutos de arco.	79
4.20. Superficies con mayor grado de aberración del diseño inicial f/3.6 con 6 minutos de arco.	80
4.21. Comparación de mejora en el nivel de aberraciones con el uso de constantes de conicidad y de la segmentación de superficies de un doblete acromático[27].	81
4.22. Ilustración de apoyo: a) Ilustración de como el tamaño de la pupila de entrada de un sistema limita el campo de visión que el mismo puede resolver; b) Ilustración de sistemas que cumplen la relación paraxial descrita anteriormente.	82
4.23. Diagrama de rayos del diseño final preliminar f/3.6 con 6 minutos de arco. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.	83
4.24. Diagrama de manchas estándar del diseño final preliminar f/3.6 con 6 minutos de arco.	84
4.25. Diagrama de manchas extendido del diseño final preliminar f/3.6 con 6 minutos de arco, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	85
4.26. Diagrama de Seidel del diseño final a evaluar en el análisis tolerancias. Se puede observar la mejora en el coeficiente de Seidel para la aberración esférica del sistema debido a la segmentación de superficies.	86
4.27. Diagrama de rayos del diseño final a evaluar en el análisis tolerancias con espejo inclinado 45 grados en posición piloto.	87

4.28. Diagrama de rayos del diseño final a evaluar en el análisis tolerancias con espejo inclinado 45 grados y filtro astronómico en posiciones piloto.	88
4.29. Elementos mas críticos en su alineación porque sus superficies generan las mayores aberraciones dentro del sistema óptico.	89
4.30. Movimientos utilizados en los elementos para compensar los errores de manufactura óptica y ensamble mecánico.	90
4.31. Resultados del análisis de sensibilidad con los 14 parámetros del sistema que mayor aportación provocan a la degradación de la calidad del mismo donde se muestra el parámetro analizado, la superficie donde se encuentra cada parámetro, el valor de la tolerancia máxima de cada parámetro, el valor degradado de la figura de mérito utilizado como criterio para hacer el análisis (radio RMS de la mancha [mm]) y el cambio del valor original de esta función	91
4.32. Resultados de la estadística de la simulación Montecarlo del análisis de tolerancias [mm].	92
4.33. Diagrama de manchas extendido del archivo con el valor promedio de la figura de mérito en los resultados de la simulación Montecarlo, con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama.	93
4.34. Diagrama de manchas extendido con frecuencias corridas hacia los extremos del rango espectral optimizado, del archivo con el valor promedio de la figura de mérito en los resultados de la simulación Montecarlo, con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama.	94
4.35. Diagrama de manchas extendido del archivo con un valor de 3 sigmas alejado del valor promedio en la distribución estadística de la figura de mérito, en los resultados de la simulación Montecarlo, con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama.	95
4.36. Diagrama de manchas extendido con frecuencias corridas hacia los extremos del rango espectral optimizado, del archivo con un valor de 3 sigmas alejado del valor promedio en la distribución estadística de la figura de mérito en los resultados de la simulación Montecarlo, con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama.	96
4.37. Diagrama de manchas extendido del archivo con el peor valor de la figura de mérito en la simulación Montecarlo de los errores desconocidos, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	97
4.38. Tolerancias de manufactura del diseño óptico final.	98
4.39. Tolerancias de ensamble del diseño óptico final.	99
4.40. Ilustración de las posibles flexiones mas relevantes en el sistema. La figura de la izquierda muestra la dirección de las posibles flexiones que tendrá el ensamble como conjunto y la de la derecha las flexiones que se presentaran en esa parte del ensamble que contendrá los elementos de la cámara.	99
4.41. Diagrama de rayos del diseño final con filtro astronómico. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.	101
4.42. Tolerancias de manufactura del espejo plano.	101

4.43. Diagrama de rayos del diseño final con espejo inclinado y filtro astronómico que incluye todas las separaciones centrales entre elementos y los diámetros [mm]. Los números azules son los diámetros del eje central de los elementos ópticos y los negros la separación entre el vértice de los componentes.	102
4.44. Diagrama de manchas estándar con escala de un píxel de 13 micras. La escala del cuadrado que encierra al diagrama de manchas es de 13 micras por lado, que es el tamaño de un píxel de nuestro detector a utilizar.	103
4.45. Diagrama de manchas, con las manchas encerradas en círculos que representan el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen.	104
4.46. PSF policromática en el centro del campo de visión.	105
4.47. PSF policromática en el extremo del campo de visión.	106
4.48. MTF del sistema óptico en todo el campo de visión.	107
4.49. Diagrama de manchas encerrado por un cuadrado de 13 micras por lado equivalente a nuestro tamaño de píxel a Utilizar. Se muestra un desplazamiento del rango espectral de operación al azul 370-420 nm, para analizar su funcionamiento en zonas alejadas del rango espectral al que se optimizó.	108
4.50. Diagrama de manchas extendido con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama, con desplazamiento del rango espectral de operación al azul 370-420 nm, para analizar su funcionamiento en zonas alejadas del rango espectral al que se optimizó.	109
4.51. Diagrama de manchas encerrado por un cuadrado de 13 micras por lado equivalente a nuestro tamaño de píxel a Utilizar. Se muestra un desplazamiento del rango espectral de operación al rojo 860-960 nm.	110
4.52. Diagrama de manchas extendido con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama, con desplazamiento del rango espectral de operación al rojo 860-960 nm.	111
4.53. Transmisión del sistema en el plano sagital y tangencial del campo central del detector, donde cada color representa la transmitancia de cada longitud de onda a lo largo de la pupila del sistema.	112
4.54. Transmisión del sistema en el plano sagital y tangencial del campo extremo del detector, donde cada color representa la transmitancia de cada longitud de onda. . .	113
4.55. Troughput del sistema en el campo central y en el campo extremo del detector. . .	114
4.56. Editor de parámetros del software Optic Studio con las especificaciones del diseño final [mm].	115
4.57. Espacio en los componentes ópticos para su sujeción mecánica [mm]. En la parte superior se muestran los componentes de la cámara y en la parte inferior el colimador	116
5.1. Diagrama de manchas extendido del sistema a 10°C y 0.74 atm enfocado con el espejo secundario del telescopio, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	118
5.2. Diagrama de manchas del sistema a 15°C y 0.74 atm después del enfoque hecho a 10°C, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	119
5.3. Diagrama de manchas del sistema a 5°C y 0.74 atm después del enfoque a 10°C, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	120
5.4. Ensamble completo del sistema optomecánico del reductor focal con el detector. . .	121

5.5. Ensamble completo del sistema optomecánico del reductor focal con vista de sección.	122
5.6. Vista explosionada del ensamble completo del sistema optomecánico del reductor focal con vista de sección.	123
5.7. Vista explosionada del ensamble del acoplador con el sistema guiador del telescopio.	123
5.8. Ensamble del acople con sistema guiador del telescopio (a) vista frontal y b) lateral ambas con su vista de sección).	124
5.9. Vista explosionada y de sección del ensamble de COL1 Y COL2.	125
5.10. Ensamble de COL1 y COL2 con vista de sección.	126
5.11. Vista explosionada del ensamble completo del espejo diagonal M1.	126
5.12. Vista explosionada y de sección de la montura del espejo M1.	127
5.13. Ensamble del espejo inclinado M1 con vista de sección.	128
5.14. Vista explosionada y de sección de la celda de CAM1 y CAM2.	129
5.15. Ensamble de la celda individual con vista de sección de CAM1 y CAM2.	130
5.16. Vista explosionada del ensamble de CAM1 Y CAM2.	131
5.17. Ensamble de CAM1 Y CAM2 con vista de sección.	132
5.18. Sistema de ajuste lateral del elemento compensador.	133
5.19. Vista explosionada del ensamble de CAM3 y CAM4 con vista de sección.	133
5.20. Ensamble de CAM3 y CAM4.	134
5.21. Vista explosionada y de sección del ensamble de CAM5 y CAM6 con el detector colocado.	134
5.22. Ensamble con vista de sección de CAM5 y CAM6 con el detector colocado.	135
5.23. Vista mas detallada del ensamble con el detector.	135
5.24. Vista explosionada del ensamble completo del barril de la cámara con el detector colocado.	136
5.25. Ensamble completo del barril de la cámara con vista de sección con el detector colocado.	137
5.26. Algunas propiedades físicas de los materiales ópticos y mecánicos del reductor focal.	138
5.27. Estrés a) y desplazamientos; b) causados por el peso del sistema con el telescopio apuntando al zenit.	139
5.28. Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 90 grados respecto al zenit con inclinación trasera del reductor.	140
5.29. Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 90 grados respecto al zenit con inclinación frontal del reductor.	140
5.30. Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 90 grados respecto al zenit con inclinación lateral del reductor.	141
5.31. Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 60 grados respecto al zenit con inclinación trasera del reductor.	141
5.32. Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 60 grados respecto al zenit con inclinación frontal del reductor.	142
5.33. Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 60 grados respecto al zenit con inclinación lateral del reductor.	142
5.34. Estrés a) y desplazamientos b) de la flexión solo del barril de la cámara, causado por el peso del sistema cuando el telescopio apunta hacia el zenit.	143
5.35. Modelo 3D usado para la simulación del estrés radial en el componente óptico CAM1 y CAM2.	146

5.36. Orientación de la gravedad en el Modelo 3D de la simulación de estrés radial en el componente óptico CAM1 y CAM2.	147
5.37. Resultado de la simulación de elementos finitos del estrés radial [MPa], causada por solo el ensamble del componente óptico CAM1 y CAM2: a) estrés en todo el ensamble b) estrés solo en el componente óptico.	147
5.38. Resultados de las simulación de elementos finitos del estrés radial [MPa], causado por la dilatación térmica de los materiales a 30°C: a) estrés en todo el ensamble; b) estrés solo en el componente óptico CAM1 Y CAM2.	148
5.39. Resultados de las simulación de elementos finitos del estrés radial [MPa], causado por la dilatación térmica de los materiales a -15°C: a) estrés en todo el ensamble b) estrés solo en el componente óptico CAM1 Y CAM2.	149
5.40. Modelo 3D usado para la simulación del estrés axial del componente óptico CAM1 y CAM2.	151
5.41. Resultado de la simulación de elementos finitos del estrés axial [MPa], causada por solo el ensamble del componente óptico CAM1 y CAM2: a) estrés en todo el ensamble; b) estrés solo en el componente óptico	151
5.42. Resultados de las simulación de elementos finitos del estrés axial [MPa], en el componente óptico CAM1 y CAM2 a causa de la dilatación térmica de los materiales a 30°C: a) estrés en todo el ensamble; b) estrés solo en el componente óptico.	152
5.43. Resultados de las simulación de elementos finitos del estrés axial [MPa], en el componente óptico CAM1 y CAM2 a causa de la compresión térmica de los materiales a -15°C: a) estrés en todo el ensamble b) estrés solo en el componente óptico.	153
5.44. Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre COL1 y COL2, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente(estrés radial a -15 grados).	156
5.45. Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre M1, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente(estrés radial a -15 grados).	156
5.46. Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre CAM1 Y CAM2, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente(estrés radial a -15 grados).	157
5.47. Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre CAM3 Y CAM4, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente(estrés radial a -15 grados).	157
5.48. Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre CAM5 Y CAM6, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente(estrés radial a -15 grados).	158
5.49. Fuerza de 30N aplicada en uno de los puntos de contacto del tornillo de ajuste.	159
5.50. Estrés a) y desplazamientos; b) de la simulación del ajuste lateral del elemento compensador.	160

5.51. Estrés a) y desplazamientos; b) de la pieza dummy que representa la celda individual de CAM1 y CAM2.	161
6.1. Diagrama de rayos del diseño final que incluye todos los espesores y las separaciones centrales entre elementos [mm]. Los números azules son los diámetros del eje central de los elementos ópticos y los negros la separación entre el vértice de los componentes.	163
6.2. Diagrama de manchas extendido con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.	164
6.3. Tolerancias de manufactura del diseño óptico final.	165
6.4. Tolerancias de ensamble del diseño óptico final.	165

Capítulo 1

Introducción

Hasta comienzos del siglo XVII los astrónomos habían observado el cielo sin la ayuda de ningún tipo de instrumento, sin embargo, en 1608 se produjo en Holanda la mayor aportación a la técnica de la Astronomía, la invención del telescopio (atribuida a Hans Lippershey, aunque sus principios ópticos ya habían sido enunciados en el siglo XIII por Roger Bacon). Galileo informado de este descubrimiento por su discípulo Jacques Badouere, fue el primero en utilizarlo con fines astronómicos [16].

Desde entonces hasta la fecha los telescopios han evolucionado y siguen siendo una de las herramientas más importantes de la astronomía moderna. Estos instrumentos tienen parámetros fundamentales como la distancia focal y su diámetro de apertura, siendo la razón de estos lo que se conoce como número f o razón focal, los valores de estos parámetros determinan entre otras cosas el campo de visión y la escala de placa del telescopio.

Un reductor focal es un sistema óptico que se coloca en los telescopios para cambiar su razón focal disminuyendo la distancia focal efectiva, esto provoca un cambio en las ampliaciones de la óptica, aumentando la magnitud de la escala de placa. Estos sistemas son muy útiles en astronomía óptica, puesto que los detectores actuales que se utilizan son dispositivos de carga acoplada (CCD) y estos tienen la característica de tener un tamaño de píxel de unas pocas micras.

En 1938 Bernhard Schmidt construyó el primer reductor focal y los primeros en utilizarlos en una cámara directa fueron Courtés(1951,1960) y Meinel(1956) [11]. Generalmente los reductores focales se utilizan como complemento para aumentar la capacidad de observación de un instrumento que se acopla al telescopio, como una cámara directa, polarímetro o espectrógrafo de campo. Si alguno de estos instrumentos no cuenta con un sistema reductor, obliga a usar mosaicos de detectores con elementos de mayor tamaño en el instrumento para cubrir un FOV aceptable, o en su defecto observar seccionadamente para analizar objetos de gran tamaño angular, en consecuencia esto aumenta el costo instrumental o el tiempo de observación respectivamente.

Este trabajo de tesis consiste en el desarrollo de un reductor focal para el telescopio del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro. El sistema pretende aumentar la capacidad de observación del observatorio y facilitar el acople de nueva instrumentación al mismo. En específico se describe la motivación científica del proyecto, el proceso realizado para obtener el diseño óptico-optomecánico, tomando en cuenta los recursos con los que se contaban, las limitaciones y los conceptos teórico

prácticos necesarios para efectuarlo.

1.1. Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH).

El Observatorio Astrofísico Nacional de Tonanzintla (OANTON) fue inaugurado el 17 de febrero de 1942, por decreto presidencial del general Manuel Ávila Camacho, siendo el Dr. Luis Enrique Erro (1897-1955) el primer director del observatorio. En 1971 el observatorio se transformó en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), a solo un año después inició el proyecto de realizar un telescopio para un nuevo observatorio en Cananea, Sonora, este observatorio llevaría el nombre de Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) y heredaría el legado astronómico de OANTON.

El INAOE se encargaría del diseño y construcción del sistema óptico del telescopio que tendría un espejo primario de 2.12 metros de diámetro, este espejo sería del mismo tamaño que uno de los telescopios del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir de la UNAM. En el taller de óptica del INAOE se diseñaron y fabricaron las máquinas para el tallado y pulido del espejo, así como las herramientas necesarias para probar todo el sistema óptico del telescopio, este fue un proceso que duró más de cinco años [21].

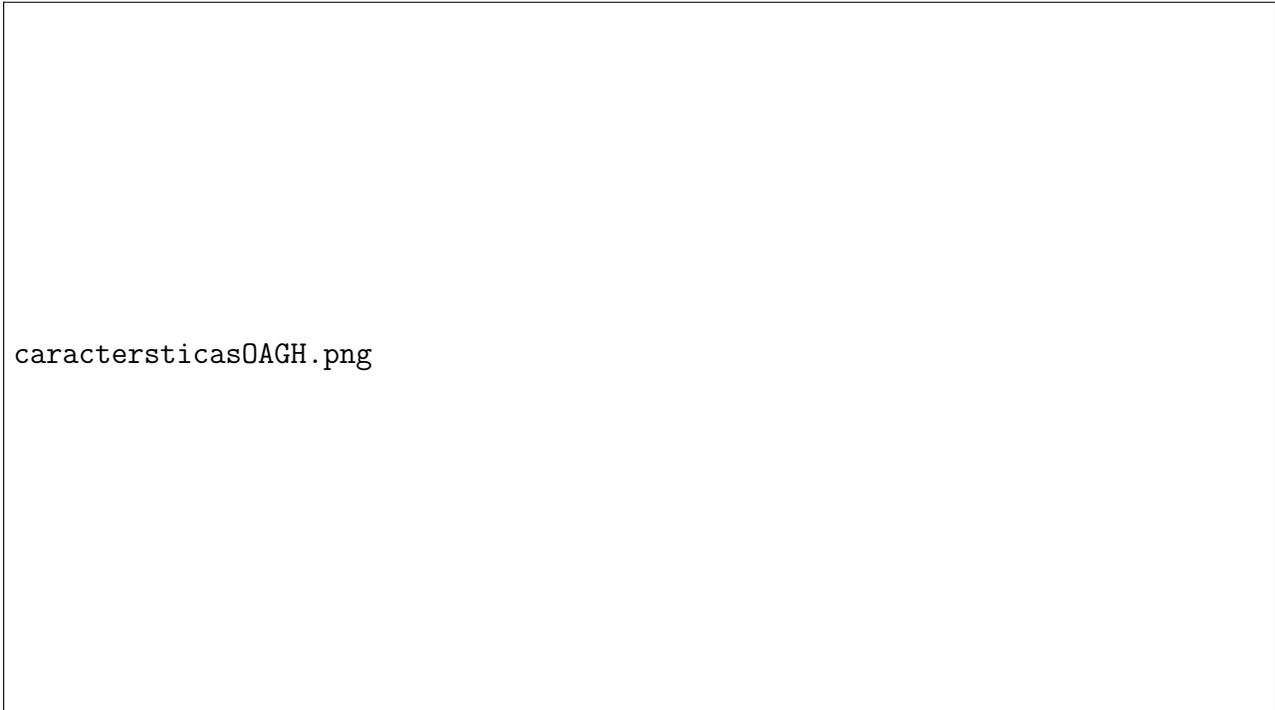
La estructura mecánica del telescopio fue diseñada por la empresa Rademakers en Rotterdam, Holanda, sus piezas fueron construidas en Alemania, Italia y Estados Unidos, siendo la mayor parte de estas hechas por la empresa De Bartolemeis ubicada en Lecho, Italia. El diseño y construcción del edificio y la cúpula que encierra el telescopio fue realizado en nuestro país, siendo el observatorio inaugurado el 8 de septiembre de 1987 en la Sierra de la Mariquita, en Cananea, Sonora.



Figura 1.1: Fotografías del telescopio y la cúpula del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH).

El telescopio reflector de OAGH es del tipo Ritchey-Chretien derivado del Cassegrain de razón focal $F/12$, está constituido por dos espejos, el espejo primario es un espejo cóncavo de 2.12 metros de diámetro con razón focal $F/2.7$, el espejo secundario es un espejo hiperbólico convexo de 50 cm con razón focal $F/30$, contando ambos con superficies esféricas. El diseño es libre de aberración

esférica y coma pero tiene una cantidad significativa de astigmatismo y curvatura de campo, en un campo de observación superior a los 12 minutos de arco (Las características y detalles técnicos se muestran en las figuras 1.2 y 1.3) [9].



caractersticasOAGH.png

Figura 1.2: Características del telescopio de OAGH [9].

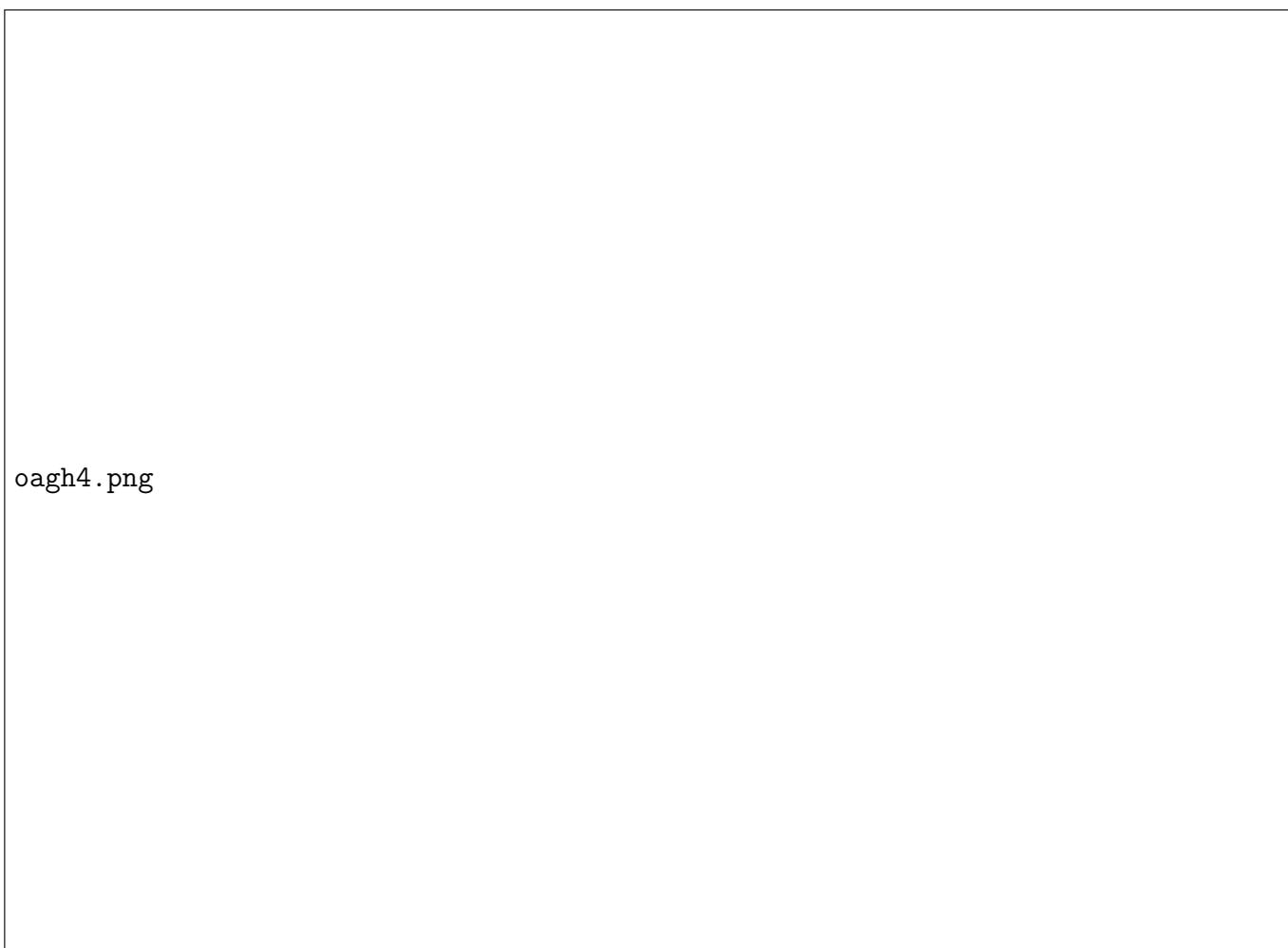


Figura 1.3: Detalles técnicos del telescopio de OAGH [mm] [14].

1.2. Cámara directa del observatorio

El observatorio cuenta con una cámara directa que permite tomar imágenes astronómicas, cubriendo un campo de 3.35 minutos de arco. La cámara directa es un instrumento muy simple, éste consta solo de una unidad para colocar filtros y un CCD que se coloca en la parte inferior, debiendo estar este último enfocado en el plano focal del telescopio (ver figura 1.4).



Figura 1.4: Fotografía de la base del telescopio con la cámara directa: 1) Base del sistema guiador donde se ensambla la mayoría de los instrumentos 2) Rueda de filtros 3) Botella criogénica donde se encuentra el CCD.

La base del sistema guiador tiene una brida con barrenos, posicionados en distintas posiciones que se utilizan para sujetar los instrumentos del observatorio. La unidad de filtros esta hecha de aluminio con agujeros para su fijación a la base del sistema guiador del telescopio. Esta equipada con una rueda de 11 casillas para colocar igual número de filtros, controlada desde una computadora en la sala de control (La vista de frente y los planos de la rueda de filtros estan mostrados en las figuras 1.6 y 1.7). Los filtros disponibles son placas cuadradas de 50 mm por lado y 4 mm de espesor para las bandas que se muestran en la figura 1.5. Cabe señalar que los marcos de aluminio que se utilizan para sujetarlos generan que solo se tenga un área efectiva en los filtros de 46 mm por lado.



Figura 1.5: Filtros de banda ancha disponibles en OAGH.

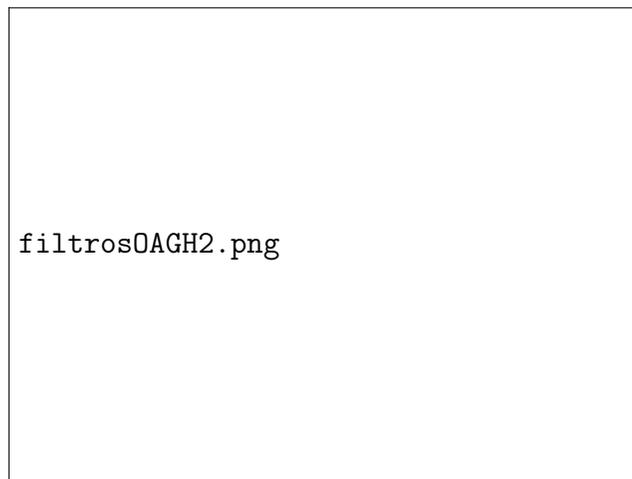


Figura 1.6: Rueda de filtros de la cámara directa del OAGH.



filtrosOAGH3.png

Figura 1.7: Dimensiones externas e internas de la estructura mecánica de la rueda de filtros [mm].

El CCD es un Tektronix de 1024 x 1024 píxeles con un tamaño de píxel de 24 micras, el tamaño del CCD es de 2.54 cm por lado, éste se localiza dentro de una botella provista de un diafragma. La botella es enfriada con nitrógeno líquido para disminuir la corriente oscura en el detector durante las observaciones (las especificaciones se resumen en las figuras 1.8 y 1.9).

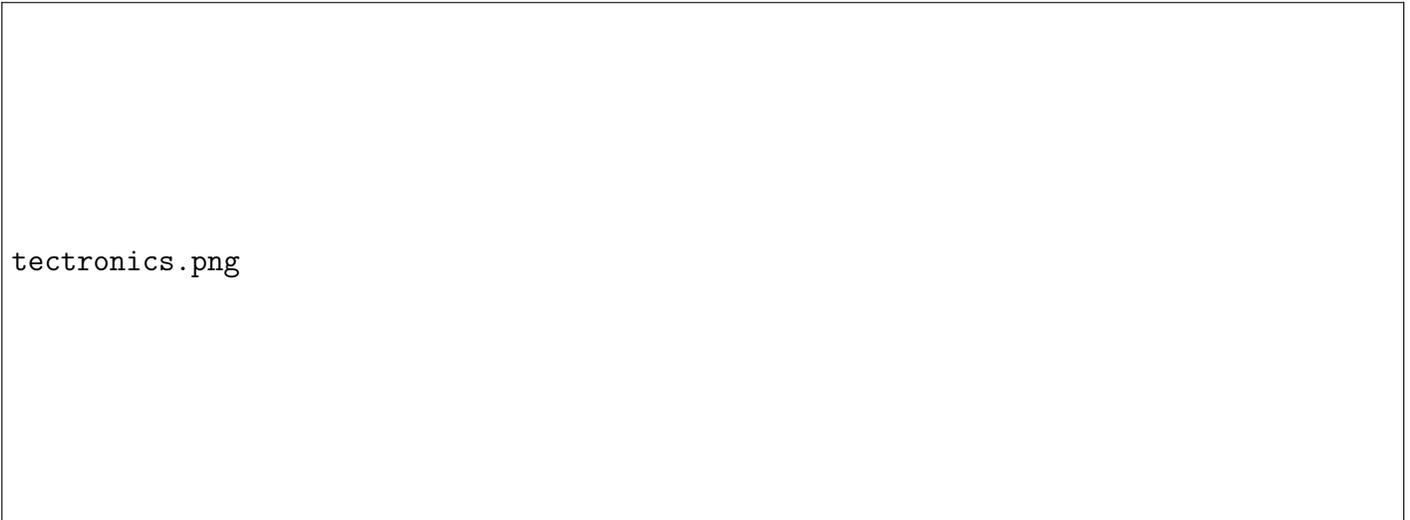


Figura 1.8: Características técnicas del detector Tektronix [8].

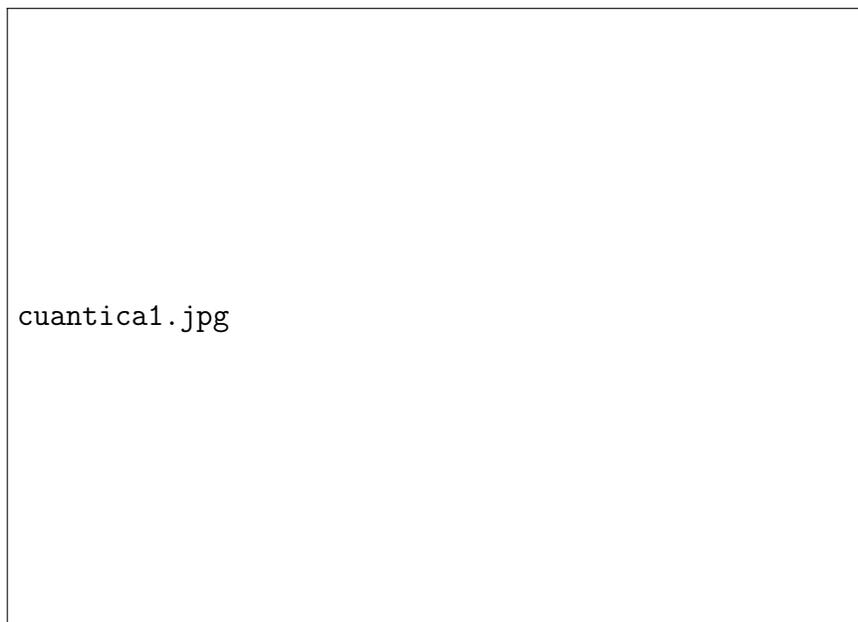


Figura 1.9: Curva de eficiencia cuántica de CCD Tektronix [8].

1.3. CCD ANDOR

Actualmente se tiene disponible un detector de la marca ANDOR, el CCD pertenece a una nueva generación de detectores EMCCD, el cual es una variante de CCD que utiliza la multiplicación de electrones para elevar la señal de electrones muy por encima del nivel mínimo de ruido de lectura, para maximizar la sensibilidad en imágenes con poca luz (las especificaciones y dimensiones se describen en las siguientes figuras).

Parámetros	Especificaciones
Tamaño de píxel	13 μm
Píxeles activos	1024 x 1024
Corriente oscura	0.0005 e-/pix/sec
Temperatura de operación	-95 °C a 20 °C
Velocidad de lectura	100 KHz a 30 MHz
Digitalización	16 bits
linealidad	mayor de 99%
Área activa de profundidad de pozo de píxel (e-)	80,000
Ganancia de registro de profundidad de pozo de píxel (e-)	730,000

Tabla 1.1: Características nominales del CCD ANDOR de acuerdo al fabricante.

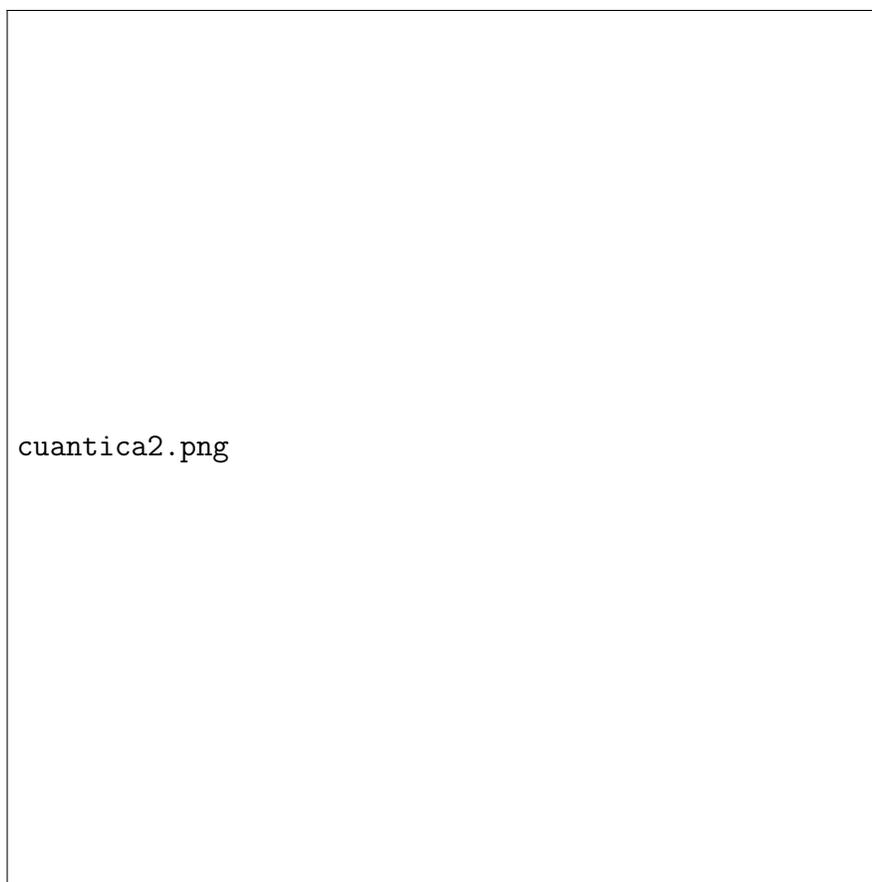
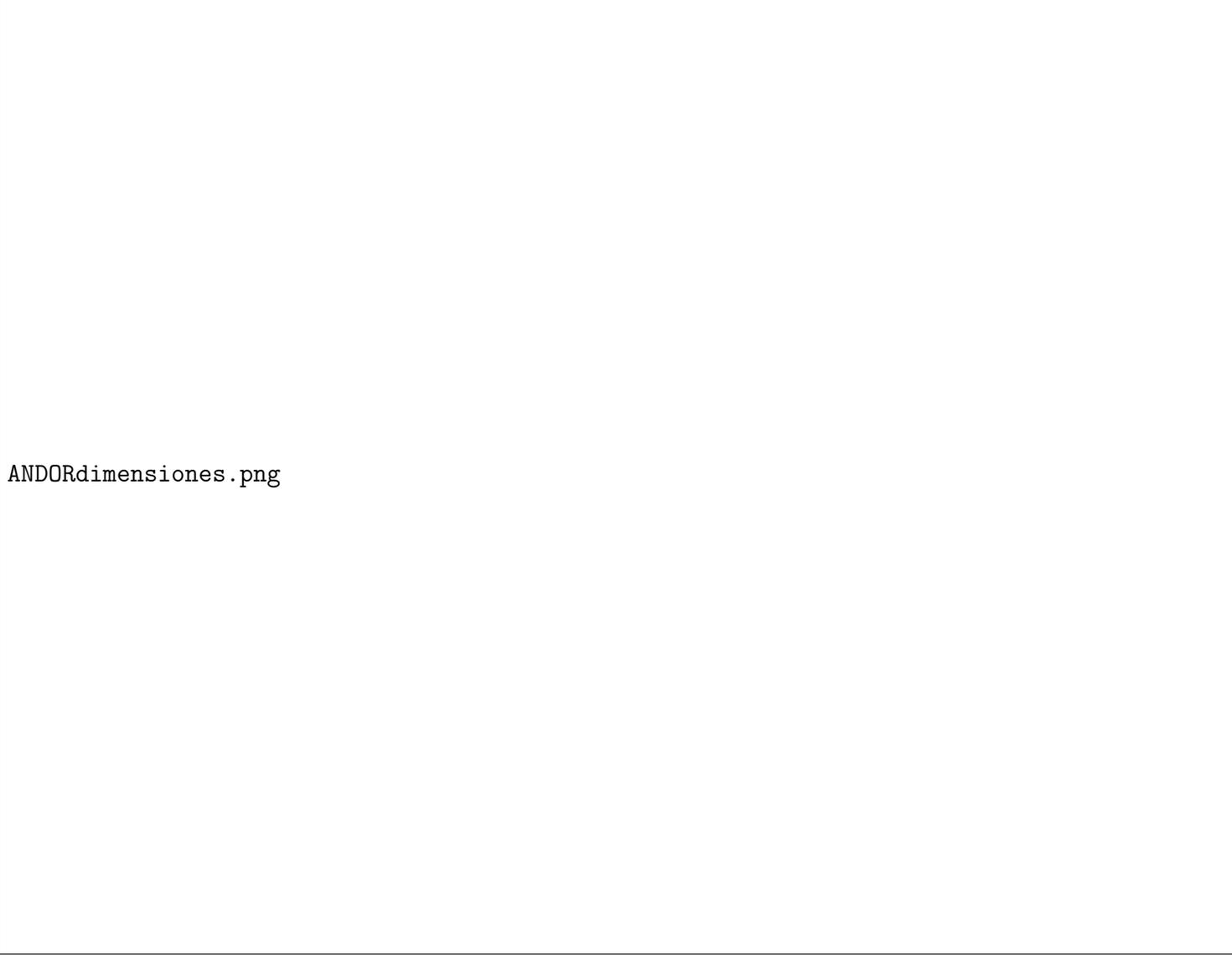


Figura 1.10: Curva de eficiencia cuántica del CCD ANDOR de acuerdo al fabricante.



ANDORdimensiones.png

Figura 1.11: Características técnicas del CCD ANDOR de acuerdo al fabricante.

1.4. Justificación del proyecto

Los objetos extendidos como lo son las galaxias, nebulosas o cúmulos globulares tienen tamaños angulares variados en el cielo, éstos pueden abarcar un gran espacio en el plano focal del telescopio. Un ejemplo de un objeto que cubre un campo de 6 minutos de arco en el cielo, por la escala de placa del telescopio de OAGH, se convierten en 44 mm en el plano focal del mismo.

Para el caso de los objetos puntuales como las estrellas, el tamaño angular está definido por el seeing del sitio de observación. Un buen seeing del sitio donde está el observatorio puede llegar a ser de 1 segundo de arco, pero la coordinación de astrofísica maneja una mediana de tamaño de seeing de 1.4 segundos de arco.

Por la dimensión del área total y de píxel del CCD ANDOR si este se colocara en la cámara directa, se observarían 1.8 minutos de arco, esto dificulta la posibilidad de realizar estudios fotométricos eficientes con los que se podrían hacer mapas de extinción para encontrar regiones de formación estelar, estudiar sistemas binarios modelando curvas de luz, entre otros. Asimismo el disco de seeing de 1 segundo de arco necesitaría una matriz de 10 x 10 píxeles, lo que conlleva además del campo de visión reducido, a un sobremuestreo en el CCD para resolver los objetos de menor tamaño en las observaciones.

Para solucionar este problema se requiere un reductor focal y aunque si bien la cámara directa, ya cuenta con un detector, este tiene la desventaja de tener varias décadas de operación, con su respectiva reducción de eficiencia, por tanto el diseño fue enfocado en mejorar la capacidad de observación de la cámara directa, pero utilizando el nuevo CCD.

Cabe mencionar que este detector está contemplado para ser utilizado en un prototipo de espectrómetro de transformada de Fourier. Este prototipo diversificará el tipo de investigación que se puede hacer en el observatorio, de tal forma que hacer estudios fotométricos con este lo caracterizará de mejor manera, además de que este reductor podría ser utilizado de manera genérica para adaptar algún otro tipo de instrumento futuro.

En un proyecto anterior se diseñó un reductor focal y se adquirió el conjunto de blanks para fabricar las lentes, desafortunadamente el proyecto no se culminó y por motivos de costo, pero sobre todo por el tiempo de entrega de materiales ópticos, se decidió reutilizar los blanks y el diseño base del proyecto anterior para diseñar este nuevo reductor focal.

1.5. Objetivos generales y específicos del proyecto

El objetivo general del proyecto es diseñar los componentes ópticos y optomecánicos de un reductor focal para el telescopio de 2.1m del OAGH con las siguientes características:

- Que opere en el rango espectral visible
- Que introduzca un campo de visión de al menos 6 minutos de arco
- Que utilice los blanks del proyecto anterior
- Que cuente con una capacidad de muestreo eficiente de 2X2 píxeles en el detector ANDOR
- Que facilite el acople de nueva instrumentación al telescopio

Lo anterior para poder hacer estudios fotométricos eficientes y facilitar el acople de nueva instrumentación al telescopio.

Específicamente se pretende:

- Obtener y validar el diseño óptico

- Realizar el análisis de tolerancias para generar los planos de fabricación y errores de ensamble permitidos
- Hacer el análisis térmico de operación del instrumento
- Diseñar y validar la mecánica de ensamble para colocar el sistema en el telescopio

En la siguiente tabla se muestran los parámetros fundamentales que deberá tener el instrumento (Estas se detallan en el capítulo 4).

Parámetros	Valores propuestos para el instrumento
Campo de visión	6 a 12 minutos de arco
Rango espectral de operación	400 nm - 900 nm
Escala de placa	0.5 segundos de arco por píxel (para un seeing = 1 segundo de arco)
Razón focal	2.5

Tabla 1.2: requerimientos del reductor focal.

Capítulo 2

Marco teórico previo al diseño óptico de un reductor focal

No existe un recetario de como diseñar cada tipo de sistema óptico, ya que cada uno tiene su aplicación y elementos específicos para la misma. Aunque existen muchos libros de diseño óptico de donde se puede recolectar toda la información teórica necesaria para diseñar cualquier tipo de sistema, esta información está muy dispersa y generalizada en la literatura, por lo que cuando se es principiante es complicado lograr estructurar todos los aspectos que se deben de tener en cuenta para diseñar un sistema óptico específico.

Diseñar un sistema que tiene la función de generar una imagen para hacer observaciones de cámara directa con un telescopio, es distinto a diseñar uno que esté pensado para obtener un espectro, la razón es porque no se le da el mismo peso a todos los parámetros para validar su funcionalidad y el comportamiento requerido de la propagación de la luz dentro del sistema es diferente. En esta sección se describen los detalles técnicos y conceptos teóricos mas elementales, que se necesitaron para llevar a cabo el diseño y validación óptica de un reductor focal de telescopio. No se describe de manera detallada todo lo mencionado, solo se da una idea general y se enfatiza la importancia que tiene cada aspecto de una manera mas objetiva.

2.1. Sistema óptico

Un sistema es un conjunto de elementos relacionados entre sí, que funcionan como un todo para un fin en común, en el caso de un sistema óptico estos elementos son las superficies refractantes o reflectantes, éstas tienen el objetivo de modificar la dirección de propagación de la luz para una aplicación específica. Estos sistemas pueden clasificarse en sistemas dióptricos, catóptricos, cata-dióptricos, centrados y descentrados principalmente.

En la práctica ningún sistema es perfecto, sin embargo, en óptica se describe el comportamiento de los rayos de luz que atraviesan un sistema óptico ideal que tiene la finalidad de crear la imagen de un objeto. Para esta descripción se utilizan tres condiciones conocidas como las tres condiciones de Maxwell para un sistema óptico ideal:

- A un punto objeto le corresponde un solo punto imagen, es decir, todos los rayos que parten

del punto objeto que pasan por el sistema óptico salen de él y pasan por el punto imagen, a estos puntos se les denomina puntos conjugados.

- A un plano normal al eje óptico en el espacio objeto le corresponde otro plano normal al eje óptico en el espacio imagen. A estos planos se les denominan planos conjugados, en el que a todo punto objeto contenido en el plano objeto le corresponde un punto imagen contenido en el plano imagen.
- A una figura objeto contenida en el plano objeto le corresponde una figura imagen semejante contenida en el plano imagen. La razón de la semejanza o tamaño entre las figuras conjugadas es constante para el par de planos conjugados y se denomina como aumento lateral.

2.2. Aspectos iniciales y parámetros ópticos fundamentales

Para diseñar un reductor focal de un telescopio utilizado en astronomía, hay que conocer las características de todo lo que involucra el proyecto, como la motivación científica, el presupuesto, la razón focal y escala de placa del telescopio, la capacidad de mover los elementos del telescopio para compensar malos enfoques, el tamaño del seeing del sitio de observación, el espacio que se tiene para colocar el reductor, las especificaciones técnicas del detector a utilizar y el campo de visión con el rango espectral que se quiere analizar. Tener conocimiento de todo lo anterior ahorra tiempo de trabajo, puesto que se puede evitar el diseñar un sistema no acorde a las limitaciones que puedan existir.

En la teoría paraxial de los cursos básicos de óptica instrumental, se aprenden los conceptos iniciales para entender las técnicas de diseño óptico y como es que se manipula la dirección de propagación de la luz que pasa por un sistema, pero en una aplicación específica, la mayoría de las veces se opera fuera de la región paraxial, con distinta cantidad y tipos de componentes, por lo que hay que manejar conceptos mas generalizados que faciliten el diseño conocidos como parámetros de diseño óptico. Existen muchos parámetros pero la misma aplicación nos ayuda a fijar algunos que permiten acotar la forma de este y la manera que se empezará a diseñarlo.

Para estos instrumentos en especial los parámetros iniciales a definir son el rango espectral porque definirá los materiales, el campo de visión que toda lo óptica ambiciona resolver y el numero f al que se desea convertir el sistema, lo ultimo para lograr una escala de placa que permita hacer un muestreo eficiente con el CCD, lo ideal sería lograr colocar el seeing en una matriz de 2×2 píxeles para muestrear, lo que garantiza un gran campo de visión para un detector dado, pero dependiendo del tamaño de píxel y detector puede ser algo no tan sencillo de alcanzar, ya que puede requerir de un sistema muy rápido y estos tienden a presentar mayores aberraciones. Por el modo de operación de la técnica de binning (discretización), si se complica lograr un sistema que logre una escala de placa para un muestreo de 2×2 , éste puede relajarse a uno que pueda hacerlo con una matriz de 3×3 o 4×4 píxeles, cuidando mantener el mayor campo de visión posible en el detector.

El campo de visión que la óptica logra introducir puede no ser el mismo que puede caber en el detector, se pretende que al menos coincidan para evitar el viñeteo o sea superior para tener la

mayor capacidad posible en el instrumento, si es que este se va a utilizar de manera genérica y no solo para una sola aplicación. Lo importante es mantener una buena calidad de imagen en todo el campo de visión del instrumento. El campo de visión que se puede observar está limitado por otros parámetros fundamentales que son las pupilas de entrada y salida, éstas a su vez dependen del tamaño de la apertura física de los componentes, por tanto hay que escoger el tamaño adecuado de los elementos del sistema para cubrir un cierto campo (Se puede obtener la relación campo - apertura en las ecuaciones descritas en 9.4 de [25]).

2.3. Aberraciones ópticas

Las imágenes generadas por un sistema óptico tienen defectos debido a las aberraciones ópticas, desde un punto de vista de la teoría ondulatoria de la luz las aberraciones son las deformaciones del frente de onda que se generan al pasar a través de los elementos de la óptica. Desde el punto de vista de la óptica geométrica se pueden definir como las desviaciones distintas a la ideal que debería tener un rayo al pasar por un elemento, ambas interpretaciones son útiles por lo que es mejor tomar en cuenta las dos.

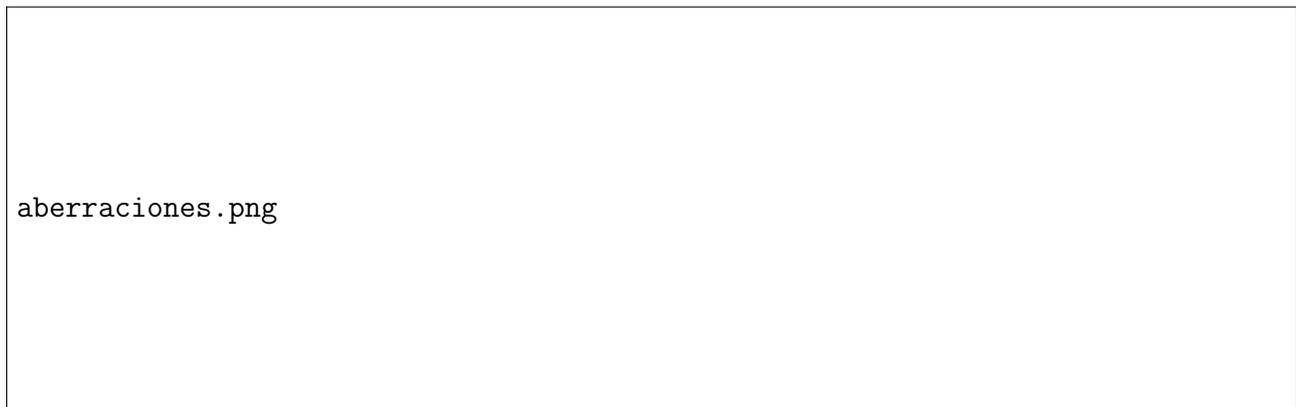


Figura 2.1: Representación gráfica de conceptos de propagación de la luz: a) Rayos partiendo de un punto objeto que atraviesan un sistema óptico; b) Imagen superpuesta con ambos conceptos teóricos de propagación; c) Frente de onda partiendo de un punto objeto y atravesando un sistema óptico [24].

Existen dos tipos principales de aberraciones, las cromáticas y monocromáticas, las cromáticas se presentan debido a la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda, mientras que las monocromáticas están relacionadas con la geometría de las superficies. Cada una de ellas contribuye a la degradación de la calidad de imagen del sistema, así que es importante tomarlas todas en cuenta.

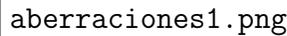
The image area is mostly blank, with the text 'aberraciones1.png' located in the lower-left corner. This indicates that the visual content of the figure is missing or not rendered in this view.

Figura 2.2: Algunos tipos de aberración: a) Aberración esférica; b) Coma; c) Aberración cromática d) Curvatura de campo [13].

Al ser vistas como una deformación superficial del frente de onda, éstas pueden ser representadas por polinomios, las aberraciones mas comunes son llamadas de tercer orden por solo contener los términos de orden 3 del polinomio y para aplicaciones específicas requiere tomarse en cuenta ordenes superiores pero no es el caso. Estos polinomios son útiles porque los programas de diseño especializado modelan estos mostrando el valor del coeficiente de cada termino, permitiendo al diseñador cuantificar el nivel de cada aberración y la contribución de cada elemento por separado para modificar el sistema objetivamente.

En la práctica todas las aberraciones aparecen simultáneamente volviendo complicado eliminarlas por completo, por lo que al menos deben de corregirse o compensarse a lo largo de los elementos del sistema. Si se intenta corregir una sola aberración la acción siempre influye en la aparición de otras, de tal forma que es preferible encontrar un equilibrio entre éstas para al final obtener una buena calidad de imagen.

2.4. Patrón y disco de Airy

Aún si la óptica estuviera libre de aberraciones, la forma circular de las aperturas del sistema y los efectos de difracción de la luz al pasar por los elementos, provocan que un objeto puntual se distribuya formando un patrón en el plano imagen, éste tiene la forma de pequeños anillos concéntricos y se conoce como patrón de Airy. El diámetro del disco central llamado disco de Airy está relacionado con la longitud de onda de la luz y el tamaño de la abertura circular, alrededor del 85 % de la energía se concentra dentro del primer anillo y 91 % dentro del segundo. Un sistema

óptico en el que su capacidad de resolución no está limitada por las aberraciones del mismo sino sólo por el efecto de difracción de la luz se dice que está limitado por difracción.

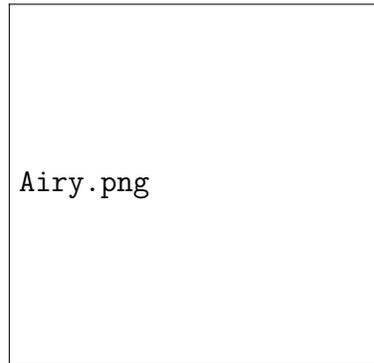


Figura 2.3: Ejemplo ilustrativo de un patrón de Airy producido por un sistema libre de aberraciones ópticas [24].

2.5. Diagrama de manchas y energía encerrada

Una forma práctica de visualizar el comportamiento y la calidad de un sistema óptico a lo largo del desarrollo de un diseño, es graficar la intersección de los rayos en el plano imagen para ver su distribución. Idealmente cada punto imagen debería ser idéntico a cada punto objeto pero por lo discutido anteriormente, las aberraciones del rayo y el efecto de difracción de la luz provocan que estos puntos se esparzan con un tamaño y forma diferente.

Los programas de diseño de diseño permiten realizar este gráfico de las intersecciones conocido como diagrama de manchas, mostrándolo en el rango espectral de operación y a lo largo del campo de visión, el programa puede colocar una escala impuesta por el usuario que puede ser el tamaño de píxel, el seeing del sitio de observación o el disco de Airy, permitiendo visualizar las aberraciones del rayo en el plano imagen y la capacidad de resolución del sistema. Las figuras 2.4 y 2.5 ilustran los diagramas de manchas para dos casos.

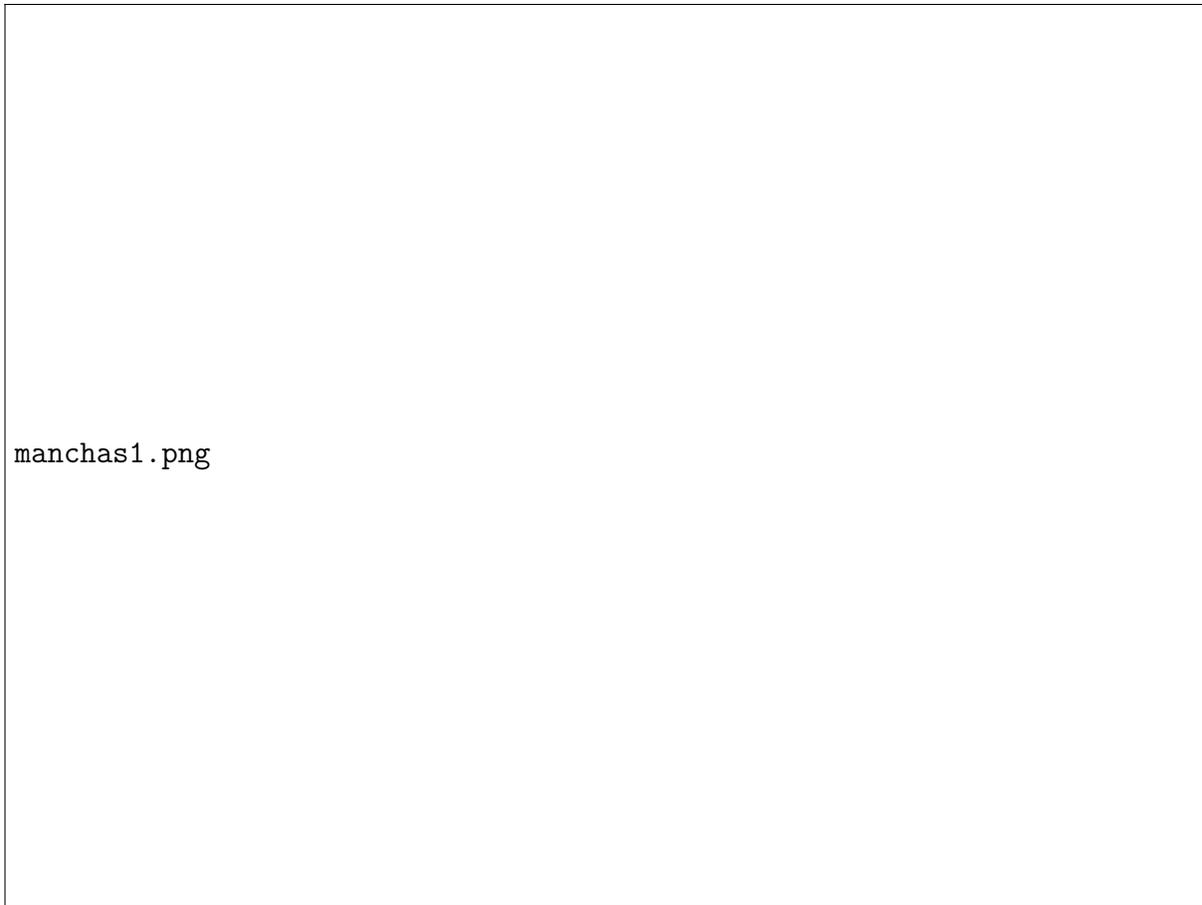


Figura 2.4: Ejemplo de un diagrama de manchas estándar: a) Escala impuesta por el usuario en μm para analizar la distribución de rayos en el plano imagen; b) Posiciones angulares del plano objeto respecto al eje óptico; c) Disco central de Airy del sistema libre de toda aberración referente a una longitud de onda escogida por el usuario; d) Organización de los puntos del FOV del sistema a analizar; e) Raíz cuadrática media de la dispersión central de los puntos objeto en el plano imagen, en donde se muestra una media estadística del radio que encierra la mancha; f) Dimensión del radio geométrico real que encierra toda la mancha; g) Longitudes de onda seleccionadas para analizar; h) Altura correspondiente del FOV del plano objeto en el plano imagen en mm.

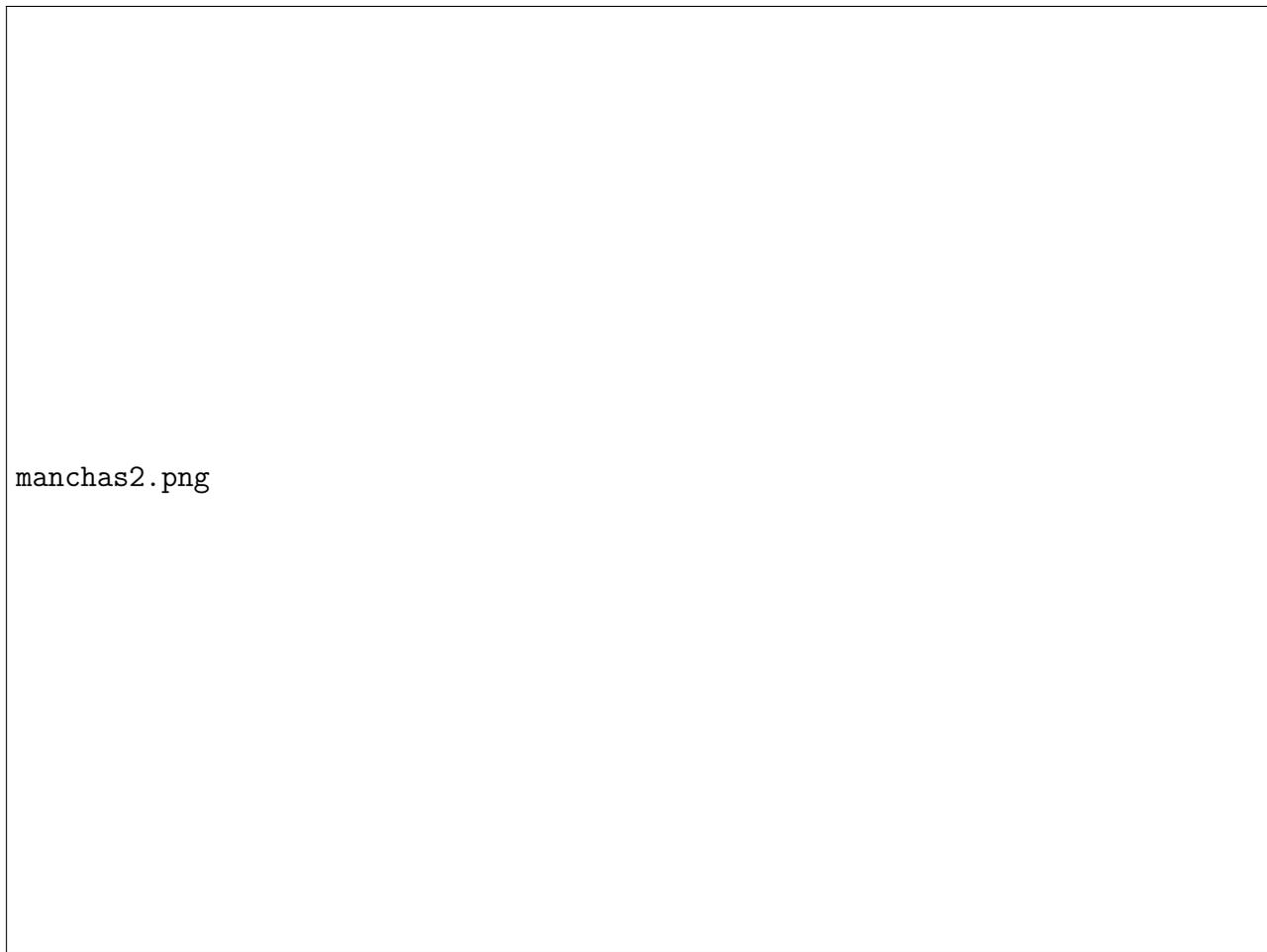


Figura 2.5: Ejemplo de un diagrama de manchas extendido que separa los rayos en el plano por longitud de onda en distintas posiciones del campo de visión que se quiera analizar, en esta imagen se puede observar que se colocó un círculo de 20 micras de diámetro que pudiese ser el tamaño del disco de seeing en el plano imagen del reductor focal.

Al ser luz la que entra al sistema podemos hablar en términos de energía, esto facilita validar un sistema óptico enfocándonos solo en la distribución de energía de un punto objeto en el plano imagen en un área específica, esta área puede estar formada por los píxeles que se usaran para muestrear la imagen o el tamaño del disco de seeing en el plano imagen.

El programa de diseño tiene la capacidad de generar gráficos que muestran en el eje horizontal el tamaño del radio del círculo y en el eje vertical el porcentaje de la energía encerrada (normalmente se muestra un gráfico superpuesto que muestra la energía encerrada si el sistema trabajara solo limitado por difracción).

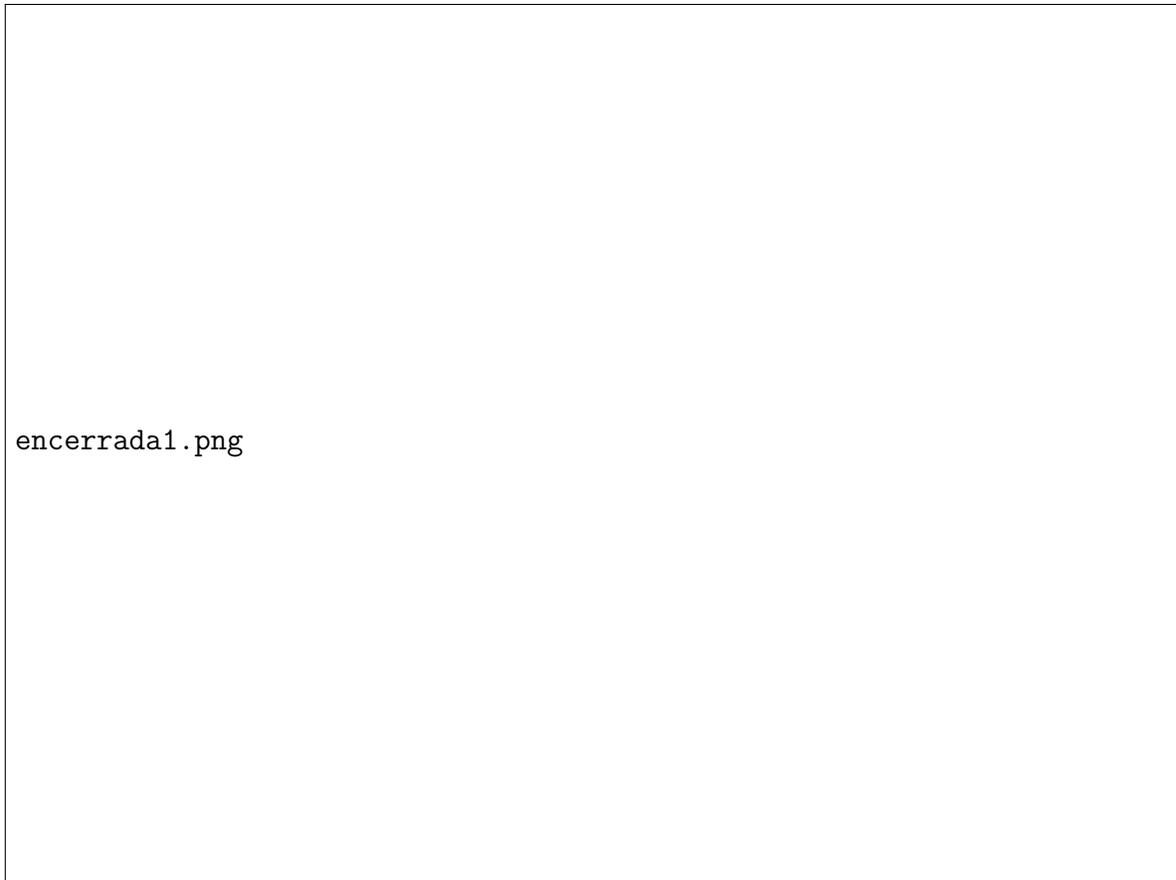


Figura 2.6: Ejemplo de un gráfico de energía encerrada con el eje horizontal a escala micrométrica, donde la magnitud representa el radio del círculo que encierra la energía en un espacio del plano imagen. Cada curva contiene la energía promedio de todas las longitudes de onda y las distintas curvas muestran este comportamiento en otros puntos del campo de visión.

2.6. Función de dispersión de punto o PSF

La función de dispersión de punto o PSF (point spread function) por sus siglas en inglés es una representación gráfica transversal estadística del esparcimiento que un objeto puntual tiene en el plano imagen de un sistema óptico específico (Ver figura 2.7), por consecuencia describe la respuesta de este al impulso, es decir, la capacidad que tiene para resolver un objeto puntual. La PSF nos da información relevante de la calidad de imagen y poder de resolución de un instrumento. Representa la irradiancia relativa respecto a la dimensión longitudinal del esparcimiento, se encuentra en una escala normalizada de 0 a 1 en el eje vertical a la que se conoce como razón de Strehl.

La Razón de Strehl es un parámetro escalar que cuantifica la fracción de iluminación en el centro del disco de Airy de un sistema específico, con el mismo si estuviera libre de aberraciones, siendo un sistema con Razón de Strehl = 1 un sistema óptico ideal o que opera limitado solo por difracción (ver figura 2.8).

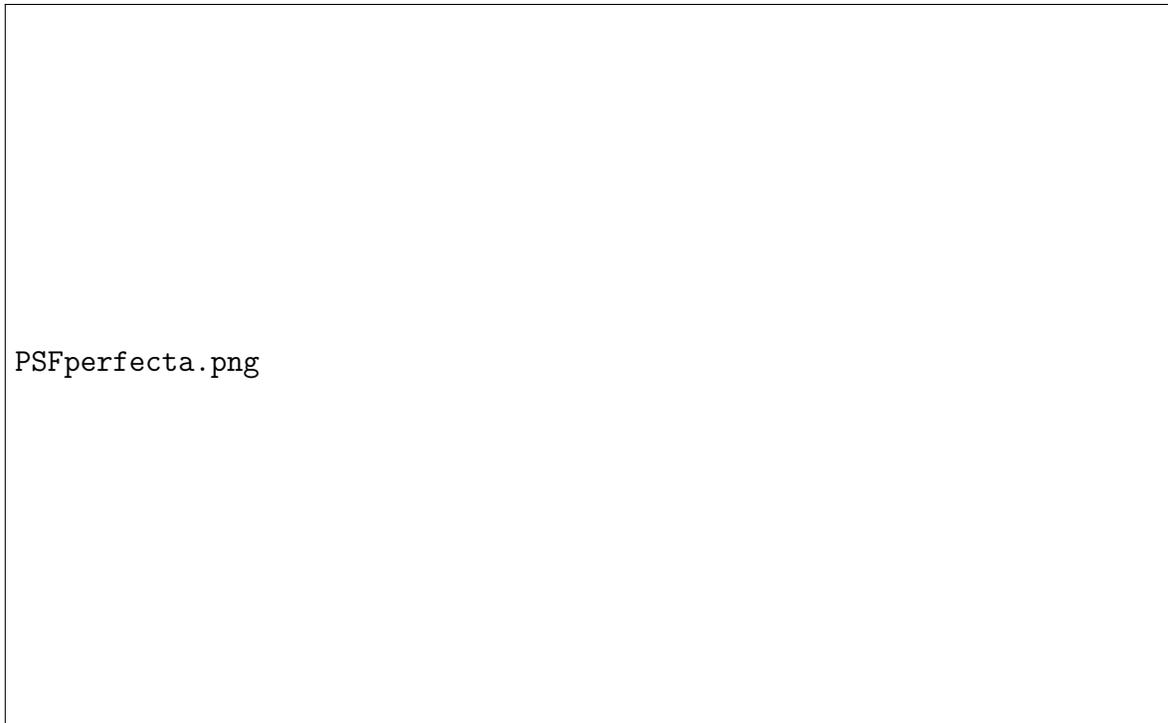


Figura 2.7: PSF de un sistema libre de aberraciones limitado solo por difracción: en la gráfica se puede apreciar que la mayoría de la energía que representa un punto objeto, esta concentrada en un círculo de radio menor a 13.2 micras visto en la escala horizontal del plano imagen.

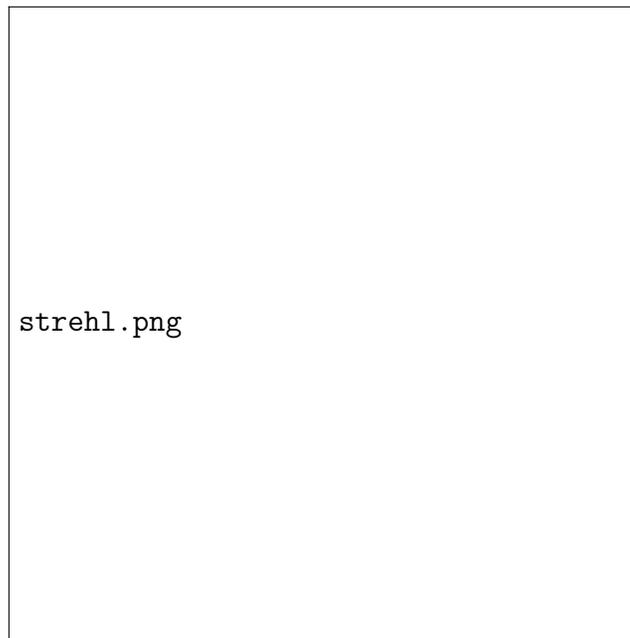


Figura 2.8: Razón de Strehl: gráfica que muestra como este parámetro nos da información del esparcimiento del punto objeto en el plano imagen [28].

Un punto objeto puede ser una fuente de luz policromática por lo que de cada punto objeto salen

rayos de mas de una sola longitud de onda, el programa de diseño tiene la capacidad de mostrar la PSF de todo el rango espectral de operación, pudiendo mostrar la de cada longitud de onda de manera independiente o superpuesta en cualquier posición del campo de visión, esto hace visible tanto las aberraciones monocromáticas como cromáticas del sistema.

2.7. Función de transferencia de modulación o MTF

La MTF o Función de transferencia de modulación es una función tridimensional que expresa la capacidad para transferir el contraste a una resolución particular del objeto a la imagen. Los programas de diseño óptico actuales tienen la capacidad de graficar esta función del comportamiento del sistema.

Idealmente la óptica debe ser capaz de colocar en el plano imagen la misma distribución de mínimos y máximos en la intensidad de cada longitud de onda del plano objeto, esta distribución de intensidades correspondientes se conoce como el contraste de una imagen o modulación. Es útil conocer el nivel de contraste de una imagen y la MTF nos permite visualizar la capacidad de resolución y contraste de todo el campo de observación de nuestro sistema óptico.

Comúnmente se utiliza para entender la MTF un objeto que pasa por el sistema formado por líneas oscuras y blancas con cierto espesor que va disminuyendo cada vez mas (ver figura 2.9), debido a que el color blanco tiene todas las longitudes de onda mientras que el negro no tiene ninguna, un buen nivel de contraste en la imagen mostrará tanto las líneas blancas y negras bien remarcadas, al mismo tiempo de que entre mas pequeño sea el espesor de las líneas llegará el punto en el que el sistema no será capaz de resolverlas con un contraste adecuado, pudiendo obtener el limite de resolución del sistema en términos de líneas por milímetro (ver figura 2.10).

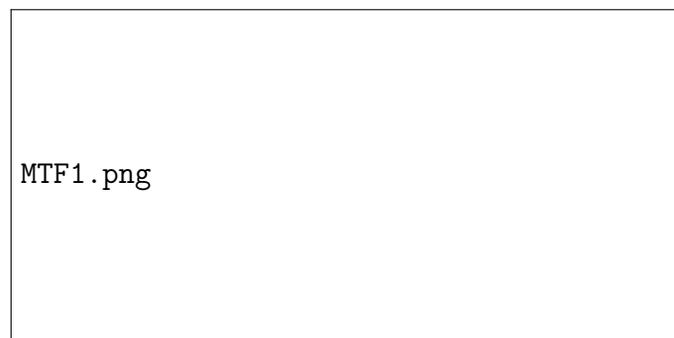


Figura 2.9: Patrón de franjas blancas y oscuras [24].



Figura 2.10: Ejemplo ilustrativo de diseños con distintas capacidades de resolver objetos con cierta resolución y contraste. En la figura vemos como cada vez que se requiere mayor capacidad de resolución la imagen puede ser no resuelta por el sistema óptico. [15].

La MTF que muestra el software nos da información de la capacidad del sistema de transmitir cierto nivel de contraste en cierta resolución espacial, el programa muestra una gráfica bidimensional que tiene en el eje vertical el nivel de contraste porcentual transmitido y en el horizontal la frecuencia espacial específica en términos de ciclos (pares de líneas) por mm a la que se transmite con ese nivel de contraste. Se pueden analizar todas las longitudes de onda superpuestas o de forma individual, las gráficas muestran también las curvas para cada zona del campo que se necesita lo largo del plano sagital y tangencial del sistema óptico. Esto logra mostrar la capacidad de detalle donde la imagen tiene un contraste adecuado para todo el rango espectral y campo de visión de operación.

También se puede superponer en las curvas, una que tenga el comportamiento de ese mismo sistema con resolución y contraste limitado solo por difracción, sin embargo cabe señalar que la necesidad de tener mejor o menor capacidad de resolución y contraste depende de la aplicación y del tamaño del píxel.

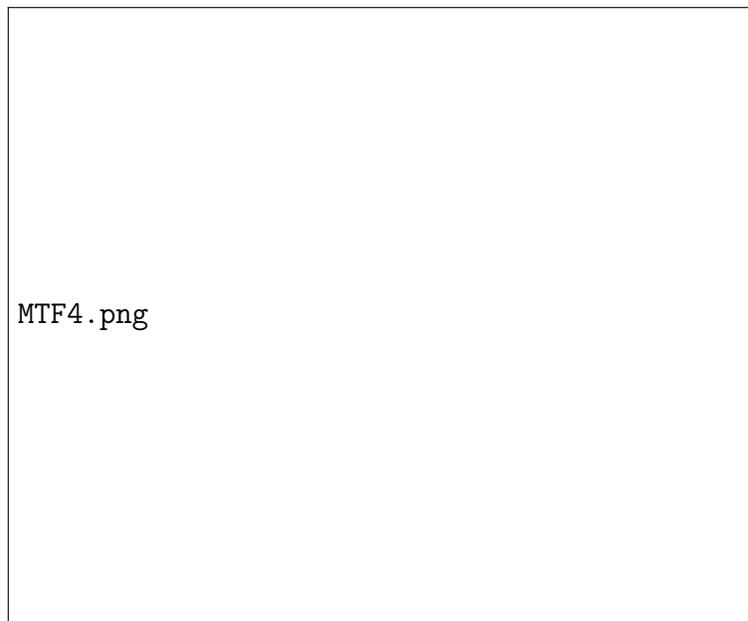


Figura 2.11: Comparación de gráfica de MTF y su interpretación: El eje vertical tiene una escala normalizada de 0 a 1 con el porcentaje de contraste siendo 1 el 100% del contraste y el eje horizontal contiene la frecuencia en términos de ciclos (1 par de líneas). Se puede apreciar que entre mas pequeño sea el tamaño del objeto será mas difícil que el sistema lo pueda resolver con un contraste adecuado [24].

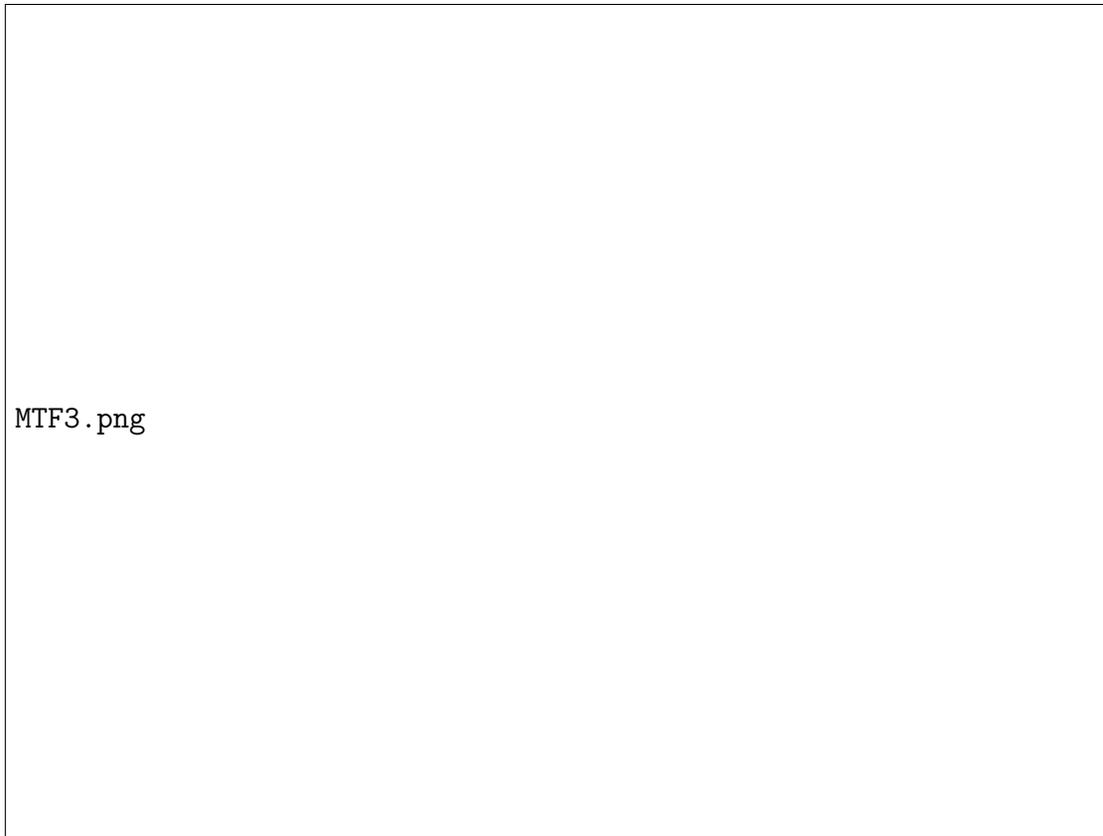


Figura 2.12: Curva de MTF policromática típica del programa de diseño óptico: En el eje vertical se encuentra el porcentaje de contraste que se obtiene del módulo de la función de transferencia óptica y en el eje horizontal la frecuencia espacial en ciclos por mm (que nos da la relación de cuantas líneas de cierto espesor del plano objeto se pueden resolver en el plano imagen). En esta gráfica se muestra la MTF del sistema óptico en distintos puntos y alturas del FOV, diferenciadas con distintos colores según el punto del campo que se quiera analizar.

2.8. Criterios de calidad y eficiencia óptica

El criterio de la calidad y eficiencia para la funcionalidad de un sistema óptico está realmente definido por la aplicación específica, sin embargo, hay criterios en la literatura que son útiles para tomarlos como referencias o limitaciones. Se puede decir que un sistema tiene una eficiencia ideal, óptima y mínima para que el sistema funcione dentro de sus capacidades, siendo la ideal cuando se tiene un nivel de aberraciones muy bajo y se limita solo por el efecto de la difracción de la luz. A estos sistemas se les conoce también como sistemas al límite de resolución, ya que debido a este fenómeno físico es imposible alcanzar un sistema perfecto, de tal forma que hay criterios establecidos para validar sistemas operando en este límite, pero a veces la aplicación no requiere que un sistema sea tan preciso o eficiente porque existen otros aspectos que vuelven innecesaria una gran calidad y eficiencia en el sistema, esto facilita el diseño generando que un sistema sea funcional u óptimo cumpliendo ciertos requisitos mínimos que discutiremos como es el caso de un reductor que su capacidad de resolución esta limitada por el disco de seeing y no por difracción de la luz.

Para validar un sistema óptico que pretende generar una imagen desde un telescopio astronómico terrestre, debemos considerar dos tipos de objetos que el sistema tiene que poder resolver eficientemente, los objetos puntuales como es el caso de las estrellas y objetos extendidos como lo puede ser una galaxia, se puede entonces verificar la eficiencia óptica de un diseño evaluando la calidad de imagen tanto para objetos puntuales como extendidos, con la ayuda de algunos parámetros del mismo como la capacidad de resolución, profundidad de foco, PSF, escala del diagrama de manchas, MTF, escala de placa, entre otros.

2.8.1. Criterios de calidad de imagen de objetos puntuales

En teoría un objeto puntual es una fuente de luz que no tiene un área o tamaño definido por ser muy pequeño, en astronomía se cuenta con abundante cantidad de estos al estar algunos objetos brillantes tan lejos, por ejemplo las estrellas mas cercanas están a mil años luz. Debido a la atmósfera estos objetos puntuales se convierten en una mancha del tamaño del seeing del sitio de observación al atravesarla y aunque la óptica fuera excelente o trabajase en el límite de resolución, el seeing impide que los instrumentos ópticos para telescopios operen en este, o mejor dicho la capacidad de resolución requerida en estos instrumentos está limitada por el seeing mas que por el límite impuesto por difracción.

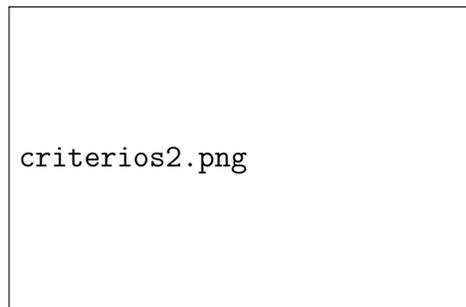


Figura 2.13: Imagen de como la turbulencia atmosférica o seeing determina el tamaño angular en el cielo de un objeto puntual. A) seeing de 0.7 segundos de arco ; B) seeing de 2 segundos de arco.

La escala de placa que cubren los píxeles del detector está definida por la distancia focal efectiva del sistema y el tamaño de píxel

$$EP(mm) = 206265/f(mm)$$

por lo que dependiendo de estos valores el tamaño angular del seeing ocupará cierto espacio en el plano focal del reductor. Si el tamaño de las manchas del sistema es menor a la escala de placa y el seeing es de tamaño mayor a esta última, el sistema tiene capacidad de resolución de sobra para muestrear el seeing y no importa la forma que tenga la mancha, esto porque la mancha es de un tamaño muy inferior al disco de seeing (se puede utilizar como ejemplo el diagrama de manchas

de la figura 2.5).

En el caso de que la mancha sea mayor que la escala de placa pero menor que el disco de seeing en el plano imagen tampoco importa la forma de ésta, pero se prefiere que tenga una forma geométrica circular lo menos distorsionada posible para tener margen de error en tolerancias, ya que las desalineaciones que se presentaran en el ensamble pueden distorsionar la mancha y salirse del borde haciendo visibles defectos en la imagen.

Por último en el caso de que la mancha sea mayor que la escala de placa pero que tenga un tamaño superior al seeing importa mucho su forma, de hecho, la forma de la mancha definirá la forma que tendrá el objeto puntual en el plano imagen y posiblemente no se podrán resolver objetos que se encuentren cerca mostrándolos como uno solo. Se puede establecer entonces que el criterio para garantizar una buena calidad de imagen de objetos astronómicos puntuales con una óptima resolución, es logrando que el tamaño de la mancha sea menor que el espacio ocupado por el mejor disco de seeing del sitio de observación en el detector.

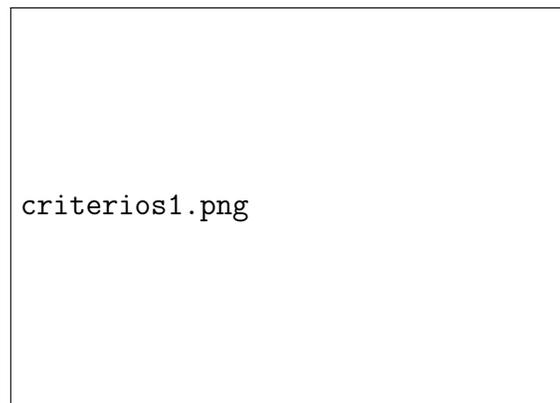


Figura 2.14: A) Imagen de dos objetos no resueltos por un sistema óptico B) Imagen de dos objetos resueltos por un sistema óptico. [24].

Como información extra los criterios que se utilizan para evaluar la calidad de sistemas que operan al límite de resolución y pretenden generar imágenes de objetos puntuales son, que el tamaño de la escala del diagrama de manchas tenga un tamaño cercano al disco central del patrón de Airy, el valor de la razón de Strehl de la PSF sea de al menos 0.8 en todo el campo y que la profundidad de foco en micras donde se mantienen estas especificaciones sea de el cuadrado del valor del número f del sistema. Si se tiene un sistema con estas características se garantiza una calidad de imagen excelente y permite que otras limitantes externas puedan influir de menor manera en la funcionalidad de este, pero a veces es complicado o sobre necesario, de tal forma que se puede apegar solo a los requerimientos mínimos.

2.8.2. Criterios de calidad de imagen de objetos extendidos

Para validar la calidad de imagen de objetos extendidos comúnmente se utiliza la MTF, ya que nos permite conocer la capacidad de transferencia de contraste a una cierta frecuencia espacial en todo el campo de visión de nuestro sistema. La MTF es muy útil puesto que estamos usando un detector en el plano imagen con píxeles de tamaño definido, por tanto usando la MTF podemos

conocer si nuestro sistema aprovecha su capacidad de resolución eficientemente.

El criterio de contraste y resolución generalizado para un sistema con buena calidad de imagen es la regla de 30/50, que establece que debe de haber un contraste de 50 % para una frecuencia espacial de 30 líneas/mm y un contraste de 30 % para una frecuencia de 50 líneas/mm para que la calidad de imagen del sistema sea buena [24], en aplicaciones astronómicas la frecuencia espacial mayor o el nivel de detalle máximo que se quisiera apreciar, esta definido por la capacidad de resolución que tiene el CCD para poder así aprovecharlo al máximo. Por el tamaño de píxel y el limite de muestreo de Nyquist se puede calcular esta frecuencia con la siguiente relación:

$$f[\text{ciclos/mm}] = \frac{1}{2} * \frac{1}{\text{píxelsize[mm]}}$$

Si a esta frecuencia espacial el sistema cumple con la regla de proporción anterior la calidad de imagen es suficientemente buena. Cabe señalar que entre mas pequeño sea el tamaño de píxel se exigirá mayor capacidad de resolución en la óptica, tanto para objetos puntuales como extendidos, pudiendo ser mas tolerable con el porcentaje de contraste mínimo aceptable.

2.9. Optimización de un sistema óptico y modelado inicial de un reductor focal

Una función de mérito es un modelo matemático que puede incluir distintos aspectos de un sistema, como las limitaciones físicas y parámetros que describen su funcionalidad o eficiencia. De acuerdo al valor de esos aspectos la función obtiene otro que determina el rendimiento del sistema con relación a sus alternativas. El programa de diseño crea una función de mérito y tiene la posibilidad de incluir tantos aspectos a evaluar como el diseñador crea conveniente, pudiendo darles el peso a cada uno según su importancia para el sistema. Además, el programa de diseño cuenta con una herramienta poderosa que es la optimización, ésta utiliza algoritmos para encontrar los valores mínimos de la función, estos valores mínimos expresan una mejor relación entre los parámetros del diseño y su funcionalidad.

El programa de diseño parte del valor que arroja la función de mérito de un diseño inicial propuesto por el usuario y hace iteraciones dando valores distintos a algunos parámetros escogidos por el diseñador, como variables que pueden ser tipo de vidrio, curvaturas, separaciones o dimensiones, el software compara entonces el rendimiento hasta que encuentra el mínimo mas próximo de la función. El objetivo es encontrar el mejor valor de la función de mérito para la cual el sistema funciona de manera mas eficiente, por lo que entre mejor sea un diseño inicial mas rápido el programa encontrara el mejor posible para las condiciones impuestas. Se debe de cuidar limitar estas variables en un intervalo mínimo y máximo definido para que el programa de diseño no tome en cuenta parámetros absurdos como espesores negativos.

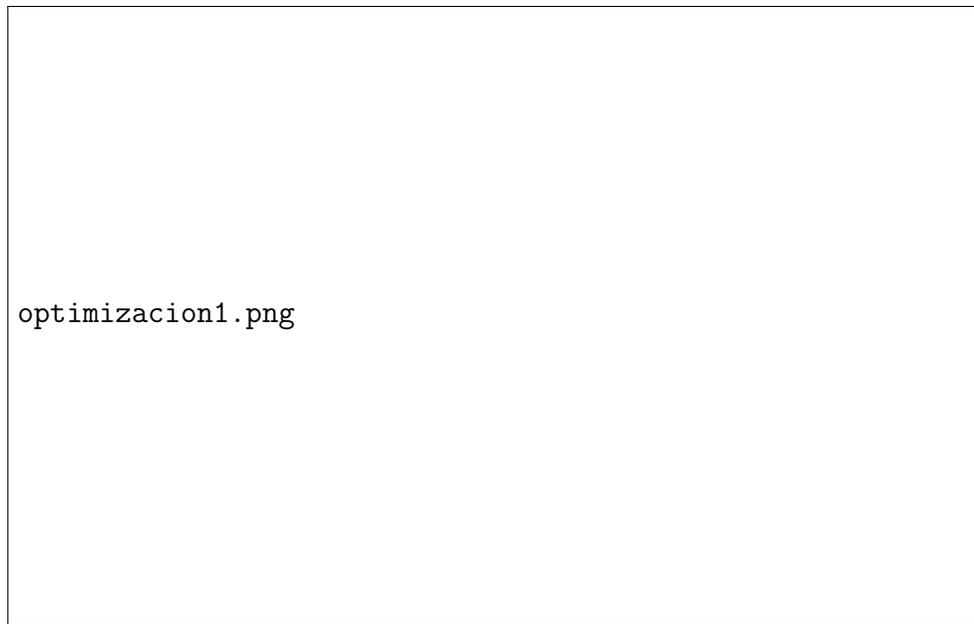


Figura 2.15: Esquema visual de un proceso de optimización random: La gráfica muestra el camino de valores que el algoritmo va obteniendo al variar parámetros de la función. [27].

Para comenzar a modelar un sistema preliminar podemos seguir varias metodologías dependiendo de la experiencia que tenga el diseñador. Una de ellas es utilizando la teoría paraxial tomando en cuenta las restricciones y parámetros ópticos mas elementales discutidos anteriormente como la razón focal, se puede modelar un sistema de lentes delgadas obteniendo la distancia focal efectiva deseada del sistema con la ayuda de la simulación paraxial del programa de diseño.

Posteriormente se puede pasar el modelo paraxial a un modelo de lentes gruesas escogiendo materiales y espesores iniciales modificándolo hasta introducir el campo total de observación que se desea. A partir de ahí se puede buscar optimizarlo hasta que cuente con las características necesarias.

Otra manera de obtener un diseño preliminar es partiendo de algún tipo de diseño hecho para una aplicación similar o parecida y modificarlo de acuerdo a las necesidades, o modelarlo poco a poco desde cero colocando elementos para ir direccionando el rayo. Cualquiera que sea la metodología es útil darle un enfoque técnico y un poco artístico, evitando tener desviaciones bruscas o ángulos de incidencia grandes al refractar los rayos a través de los elementos. De hecho la suavidad de la distribución que tenga las refracciones del rayo a lo largo del sistema o la simetría del mismo definen de gran manera el nivel y tipo de aberraciones que éste contendrá.

La mala distribución de las refracciones se debe a un diseño óptico forzado a condiciones no óptimas para su funcionalidad, como lo puede ser una distancia focal posterior grande para sistemas rápidos, tamaños pequeños de las pupilas de entrada y salida para cubrir un gran campo de visión, insuficiencia en la cantidad de elementos o elección de materiales no adecuados. Diseñar un sistema óptico forzado obliga a necesitar curvaturas y desviaciones del rayo muy pronunciadas que disparen el nivel de aberraciones en las superficies, pudiendo ocasionar que el diseño sea muy sensible a cualquier error en su alineación o tolerancias de manufactura, esto puede volverlo muy difícil de fabricar o montar en una estructura mecánica y que siga siendo eficiente.

Se pueden utilizar muchas técnicas para mejorar un diseño, como aumentar la cantidad de lentes para distribuir de mejor manera las refracciones, utilizar superficies esféricas, cambiar de materiales, variar las separaciones entre componentes, segmentar superficies o agregar dobletes o tripletes donde se encontraban lentes simples hasta encontrar una buena aproximación de diseño final (en [27] hay un capítulo que describe cada una de las técnicas más utilizadas en diseño óptico con su impacto en la corrección de cada tipo de aberraciones). Estas técnicas mencionadas pueden utilizarse de manera simultánea hasta obtener algún modelo que cumpla con lo requerido para el diseño, pero cada una puede presentar una desventaja, por dar algunos ejemplos en el caso de las superficies esféricas su fabricación se vuelve costosa y complicada, al aumentar el número de componentes la absorción de luz del sistema es mayor al existir más material sin mencionar el aumento de precio del mismo y el segmentar superficies puede ocasionar que nuestro sistema sea difícil de alinear, en cualquier caso se debe encontrar un punto medio para que el rendimiento del sistema sea eficiente y no se eleve demasiado el costo del mismo.



optimizacion2.png

Figura 2.16: Ejemplos del impacto en las aberraciones al modificar algunos parámetros en la óptica [27], a) índice de refracción, b) cantidad de elementos, c) combinación de materiales, d) ángulo de incidencia del rayo.

En la figura a mejora el tamaño de las aberraciones del rayo al incluir índices de refracción mayores en el mismo sistema óptico. En la figura b mejora el tamaño de las aberraciones agregando mas elementos opticos en la trayectoria del rayo. En la figura c vemos que se alteran las desviaciones del rayo en funcion del aumento del espesor de los lentes. por último en la figura d vemos como ángulos de incidencia mayores sobre las superficies pueden generar un tipo de aberración

Afortunadamente los reductores focales son sistemas que se han venido utilizando desde hace bastante tiempo, de modo que hay modelos utilizados que pueden ser útiles para estructurar un diseño de acuerdo a las necesidades. El mas extenso cuenta con 3 subsistemas, una lente de campo que tiene el objetivo de reducir un poco el haz de salida del telescopio para no tener que usar componentes de gran tamaño en todo el sistema (para estos últimos se utilizan elementos de alto índice de refracción para doblar lo mas posible el haz de salida del telescopio y reducir el haz de entrada al los siguientes elementos), un colimador que ofrece a la salida un frente de onda plano donde se pueden colocar filtros manteniendo enfocado el plano imagen y un objetivo de cámara que cambia la razón focal del sistema (figura 2.17 a) [3]), otro tiene solo un colimador y un objetivo de cámara (figura 2.17 b) [22]) y el mas simple solo cuenta con el objetivo de cámara (figura 2.17 c,d) [7] [17]). Se puede empezar con un tipo u otro colocando los subsistemas para ir direccionando el rayo.

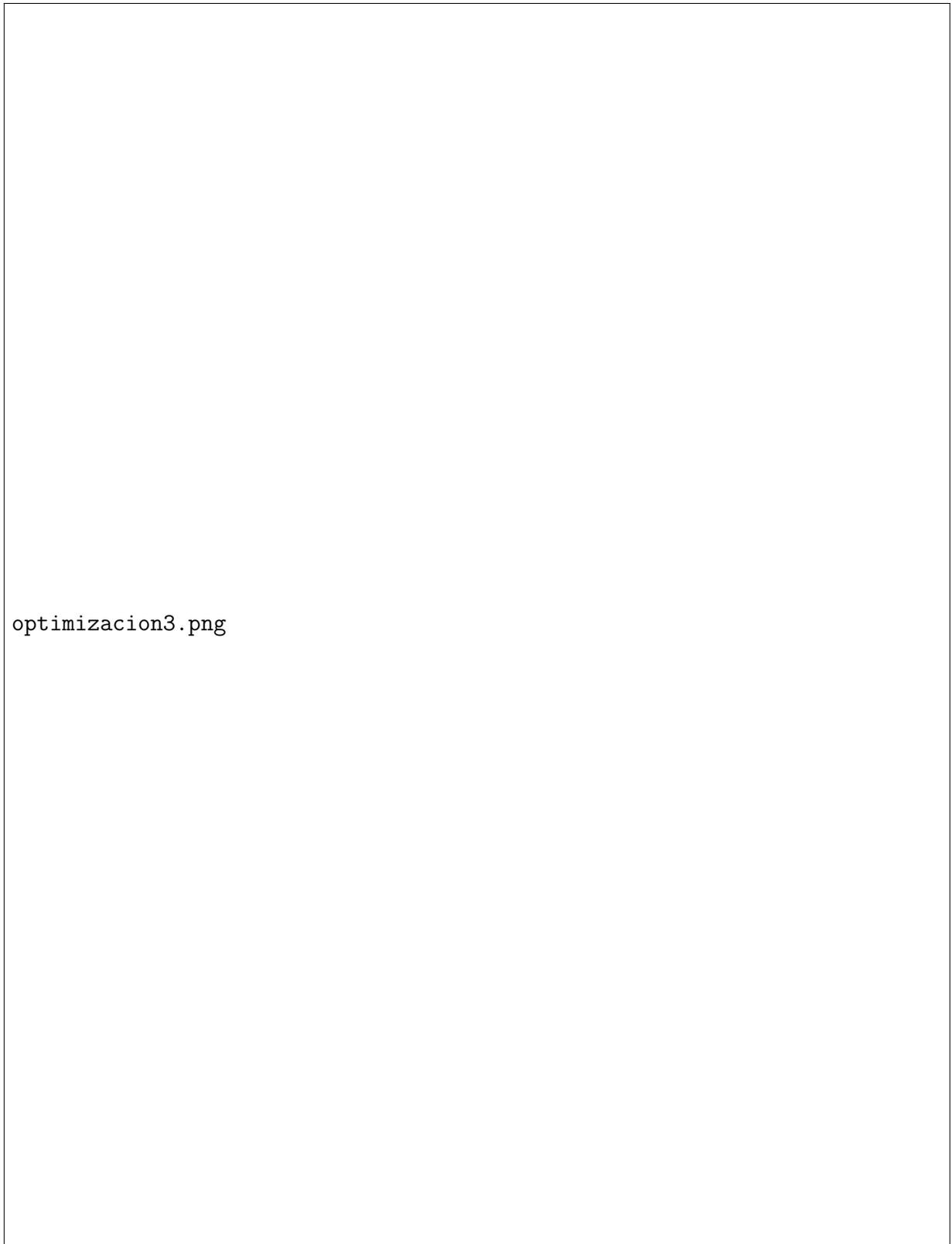


Figura 2.17: Ejemplos de algunos tipos de reductores: a) Reductor focal del Observatorio Michigan-Dartmouth-MIT Telescopio McGraw-Hill de 1.3 metros; b) Reductor focal $f/2.8$ del Telescopio de Vainu Bappu $f/13$ de 2.3 m; c) Reductor focal del Telescopio Nacional Tailandés; d) Reductor focal para CQUEAN del Telescopio Otto Struve de 2.1 m del observatorio McDonald.

[7]

Si se tienen más elementos para el diseño puede ser más fácil distribuir las aberraciones, pero debe valorarse el presupuesto ya que los vidrios ópticos son muy caros, el espacio físico que se tiene para el diseño y la cantidad de throughput necesaria para conservar una buena cantidad de luz a la salida del reductor, ya que los materiales absorben parte de ésta y si se colocan demasiados componentes se puede volver ineficiente la observación de fuentes astronómicas débiles.

Capítulo 3

Consideraciones, análisis y criterios básicos para manufactura óptica y diseño óptomecánico

El diseño óptico de un reductor focal y la validación de su eficiencia óptica realmente representa solo una parte de todo el trabajo que se debe de hacer para pensar en implementar un instrumento como este en un telescopio, las consideraciones de manufactura óptica de los componentes del sistema y las consideraciones optomecánicas para diseñar el acople al telescopio son igual de importantes que las que se toman a la hora de diseñar la parte óptica del sistema, inclusive pueden ser determinantes para evaluar la factibilidad de implementación del diseño óptico. Por lo anterior es preferible que durante la etapa del diseño óptico se mantenga un contacto cercano con el personal del taller de manufactura óptica y mecánica, para discutir detalles durante el mismo estableciendo restricciones que ayuden a evitar el diseñar un sistema óptico imposible de fabricar o implementar.

En esta sección se describen de manera resumida y generalizada algunas consideraciones, análisis y demás aspectos importantes que son previos a la fabricación óptica y al diseño de un sistema optomecánico, con el objetivo de enriquecer el contenido teórico de este trabajo de tesis y facilitar la redacción del desarrollo del mismo en secciones posteriores.

3.1. Análisis de tolerancias ópticas

Cuando se fabrica y ensambla un componente óptico como lo puede ser un lente idealmente se esperaría que este mantuviera las características que presenta en la simulación, pero realmente no es así, este componente presentará irremediamente diferencias respecto a sus parámetros nominales de forma, posición e inclusive del mismo material óptico, ocasionando un degradamiento en la eficiencia final del reductor focal, por ello antes de definir el diseño óptico se deben cuantificar los errores tolerables en sus parámetros para los que sigue funcionando de la manera deseada, a esta cuantificación de los errores tolerables en el diseño se le conoce como análisis de tolerancias.

Este análisis permite conocer el grado de precisión que deben de tener al fabricar los elementos ópticos y mecánicos del sistema, entre menos holgada sea la tolerancia de sus parámetros se dificultará la posibilidad de fabricarlos y de diseñar la mecánica que los sujetará, por lo que hacer

este análisis es indispensable para definir si un sistema es viable para implementarse, si se tiene que ajustar algo en el diseño o cambiar el diseño óptico por completo.

Las tolerancias pueden ser separadas en dos categorías:

- Tolerancias de manufactura óptica
- Tolerancias de ensamble mecánico

3.1.1. Tolerancias de manufactura óptica

Las tolerancias de manufactura óptica determinan el error que deben de tener los parámetros de los componentes ópticos cuando se fabrican, los parámetros mas comunes que se toman en cuenta en el análisis de tolerancias son los siguientes :

- Radio de curvatura
- Espesor central
- Cuña de lente
- Diámetro
- Espesor Sagital
- Centrado de superficies
- irregularidades en superficie
- Tamaño de raya o poro en superficie
- índice de refracción
- Número de Abbe

Nota: Las tolerancias en índice de refracción y número de Abbe si bien no dependen del proceso de fabricación caben en esta categoría porque se debe de escoger el proveedor de vidrio óptico que maneje la tolerancia necesitada, aunque por el alto precio de los vidrios ópticos puede ser mas económico utilizar materiales con una tolerancia estándar y ajustar el diseño para que funcione con éstas si es posible. Existe otro parámetro como la tolerancia de error de las constantes de conicidad en la geometría de una superficie esférica, pero solo se necesitarían considerar si el diseño cuenta con algún elemento con este tipo de superficies, es un tema algo complejo ya que en si el mismo proceso de fabricación de este tipo de superficies es complicado y para el propósito de este trabajo no es relevante por tanto no se abordara.

La capacidad de alcanzar una cierta tolerancia en estos parámetros es diferente en cada taller de manufactura óptica, ya que está limitada en gran parte por las herramientas que se tienen disponibles para fabricar los elementos y medirlos. Para el caso de que no se pueda tener un contacto directo con el personal del taller se pueden utilizar como guía tablas estandarizadas, estas

tablas tienen rangos de tolerancia de manufactura óptica que van desde un nivel bajo o comercial hasta un nivel de alta precisión, la figura 3.1 muestra un ejemplo.

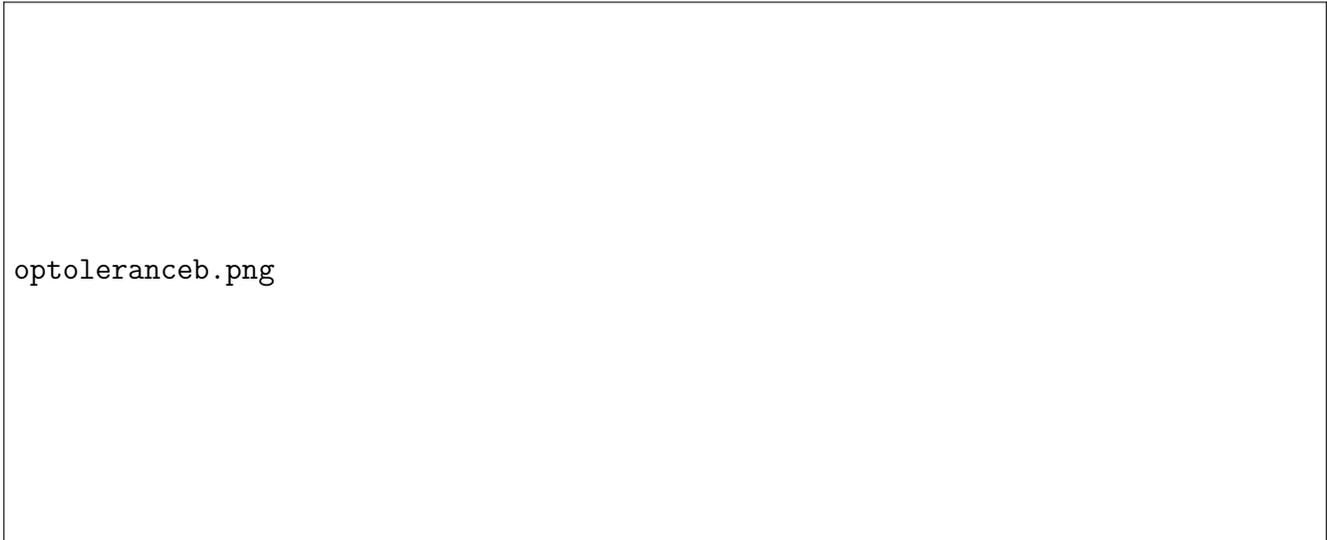


Figura 3.1: Tabla estándar de tolerancias ópticas [29].

Entre mas holgadas sean las tolerancias de los parámetros de un elemento este será mas fácil de fabricar, por lo que hay que escoger las mas holgadas posibles, cuidando mantener un buen desempeño óptico, ya que si se selecciona una tolerancia considerada de alta precisión aumentará mucho el costo y tiempo de fabricación del componente, de hecho puede existir la posibilidad que no sea fabricable, ya que pudiese que los instrumentos disponibles en el taller tengan un grado de incertidumbre mayor a esta tolerancia en sus mediciones.

3.1.2. Tolerancias de ensamble mecánico

Las tolerancias de ensamble tienen que ver con los errores de posición de los componentes dentro del sistema mecánico que los sujetará, estos errores son de espaciamiento, centrado e inclinación (Ver figura 3.2).

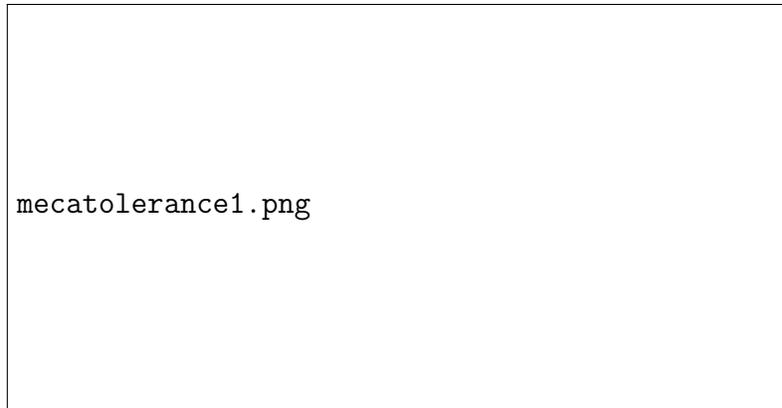


Figura 3.2: Errores de ensamble de un sistema óptico [26].

Nota: La mayoría de los elementos ópticos son rotacionalmente simétricos respecto al eje óptico, por tanto en este caso el error de rotación en ese eje no se toma en cuenta.

Existen tablas en la literatura con criterios que se pueden tomar como base para escoger un grado o nivel de tolerancia necesaria de ensamble (ver figura 3.3) y también se debe de cuidar tener un diseño que no necesite tolerancias muy ajustadas. Las tolerancias de ensamble se controlan con las tolerancias de posición, dimensión y forma de manufactura mecánica de los componentes del sistema de ensamble.

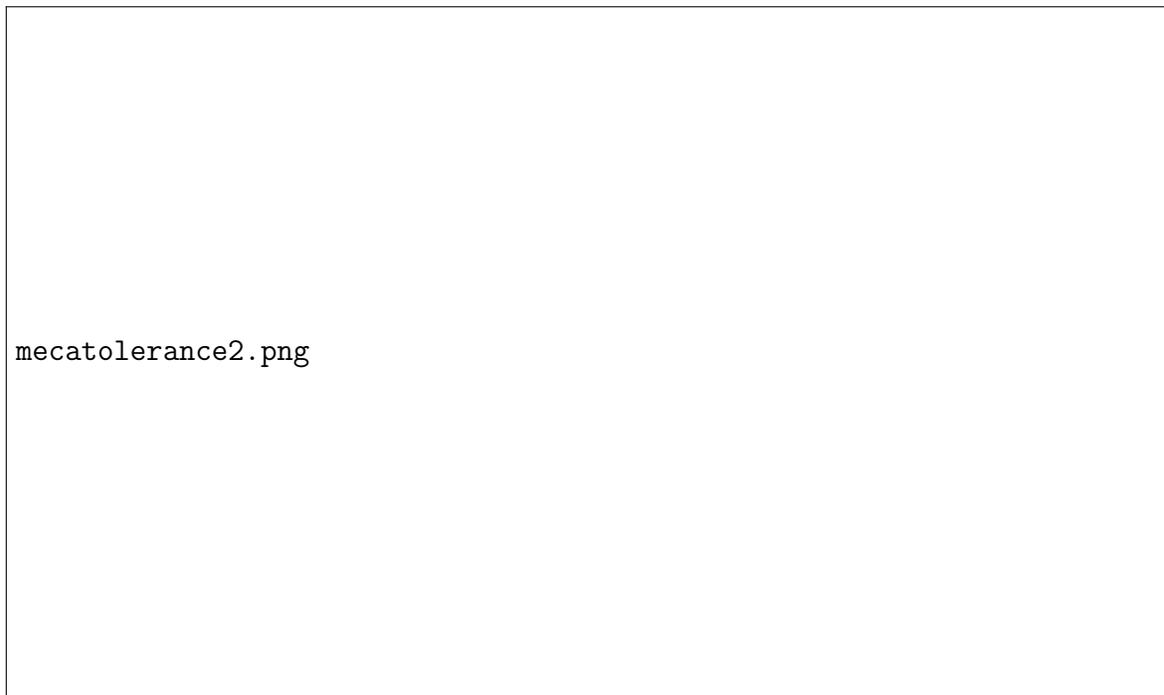


Figura 3.3: Tabla estándar de tolerancias optomecánicas [31].

3.1.3. Tolerancias de manufactura mecánica

De igual manera las partes mecánicas no pueden tener sus especificaciones de manera ideal por el proceso de manufactura, dependiendo de su geometría y ubicación en el ensamble se debe especificar la tolerancia en sus parámetros de manera adecuada para lograr el objetivo del sistema optomecánico. Las tolerancias que deben ser mas críticas son las que involucran el error de posición radial, lateral y de inclinación de los elementos ópticos, las tolerancias de concentricidad, diámetro, circularidad y cilindridad comúnmente definen la posición radial del elemento, las tolerancias de planicidad y paralelismo en el aciento de la lente definen el error de inclinación y las de perpendicularidad y posición la ubicación axial del mismo.

La figura 3.4 muestra la simbología usada para representar en un plano las tolerancias de manufactura mecánica y los tipos en los que se clasifica cada una.



Figura 3.4: Simbología de tolerancias de manufactura mecánica [26].

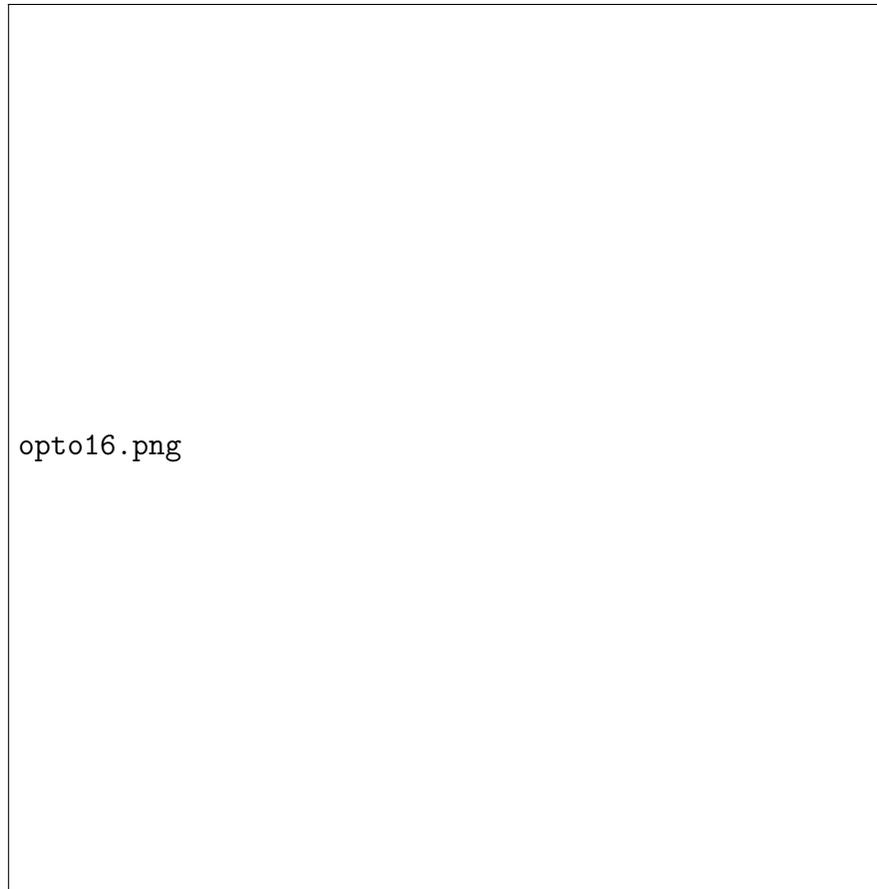


Figura 3.5: Simbología de parámetros mecánicos [26].

Cada punto de contacto entre la referencia de una pieza de un ensamble y los demás elementos del mismo contribuirá en el error total de posición del sistema, esto por causa de las tolerancias individuales de cada elemento en contacto con otro, estos errores no están correlacionados, por tanto se puede usar la siguiente relación para calcular la tolerancia individual que se debería de tener en cada elemento en contacto, para que el error total no sobrepase la tolerancia requerida.

$$T_i = \frac{T_{max}}{\sqrt{N}}$$

T_i = Tolerancia individual de cada elemento en contacto

T_{max} = Tolerancia máxima requerida

N = Número total de contactos

Se puede deducir de la relación anterior que entre menor sea la cantidad de elementos en contacto, la tolerancia individual que estos deben tener será mas holgada, facilitando su fabricación y reduciendo el costo del ensamble.

Otra relación importante es la que nos permite calcular la tolerancia de planicidad requerida en el asiento de la lente para cuidar el error de inclinación del elemento óptico

$$T_p = D_E \tan \theta$$

T_p = Tolerancia de planicidad del asiento de la lente

D_E = Diámetro del elemento óptico

θ = Tolerancia máxima de inclinación en grados

De la misma forma que en la fabricación óptica, la capacidad de fabricar piezas mecánicas con determinadas tolerancias depende de la maquinaria disponible para fabricarlas y medirlas, la figura 3.6 contiene criterios de dificultad de maquinado y la herramienta que se necesita para lograr determinado error en los parámetros de una pieza, pero tampoco se debe tomar como una regla absoluta.

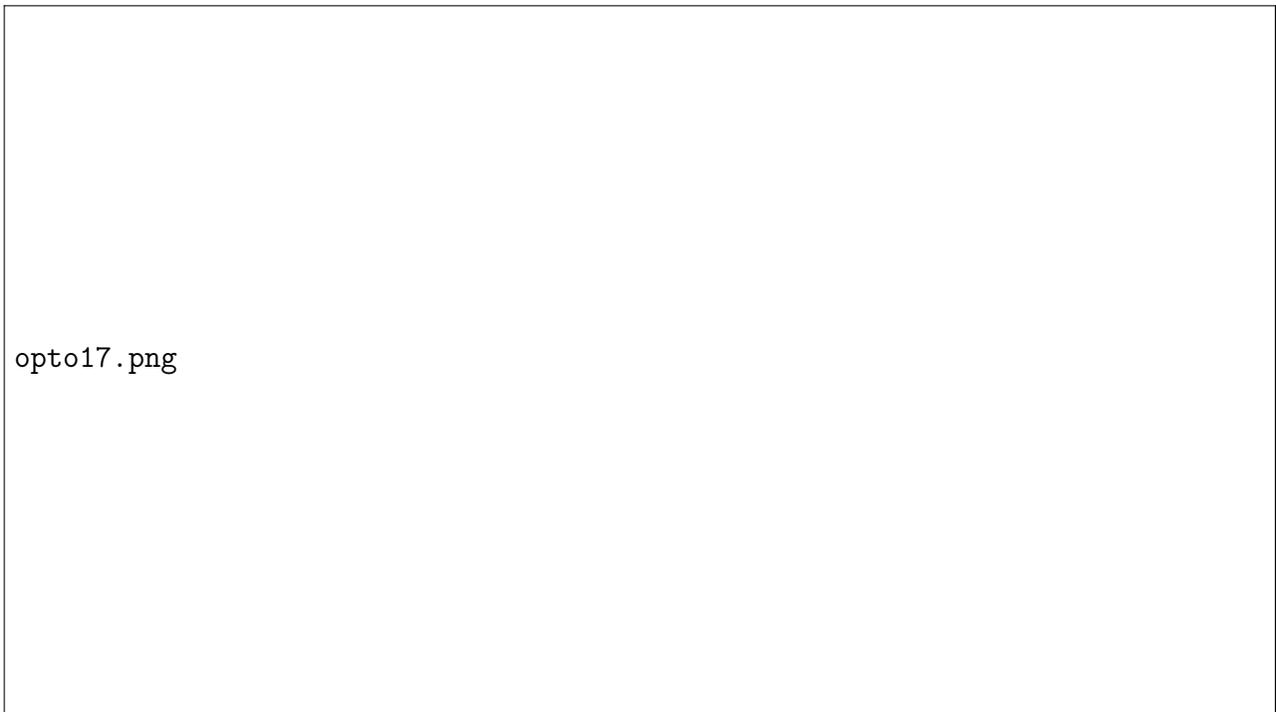


Figura 3.6: Criterios de dificultad de tolerancias de maquinado [26].

3.1.4. Compensadores

Los compensadores son mecanismos que permiten ajustar posiciones e inclinaciones de los elementos del sistema, estos agregan grados de libertad después de haber hecho el ensamble en un rango de movimiento definido por el diseñador, los más utilizados permiten mover axialmente el plano imagen a la salida del reductor focal o el espejo secundario del telescopio para enfocar, pero se

pueden implementar para mover en algún sentido cualquier elemento o cambiar la distancia axial entre algunos componentes. Son muy útiles para compensar los errores de ensamble, disminuir el rango de tolerancia en los parámetros del sistema o inclusive hacer factible un diseño muy sensible a errores.

Dependiendo de cual sea la distribución de las aberraciones en el diseño o el aumento de estas en el plano imagen ocasionadas por las tolerancias escogidas, se puede escoger un criterio de que tipo de movimiento es el que necesita agregarse en algún elemento o parte del sistema, por dar algunos ejemplos, si el sistema presenta mayormente un aumento en la aberración esférica en el plano imagen puede ser conveniente agregar algún movimiento axial sobre el eje óptico, en el caso de que se presente un aumento en alguna aberración como coma o astigmatismo se puede agregar algún movimiento lateral o de inclinación.

La figura 3.7 muestra algunos tipos comunes de elementos utilizados como compensadores con el grado de libertad que generalmente necesita cada uno incluido el nivel de precisión, aunque no es una regla absoluta.

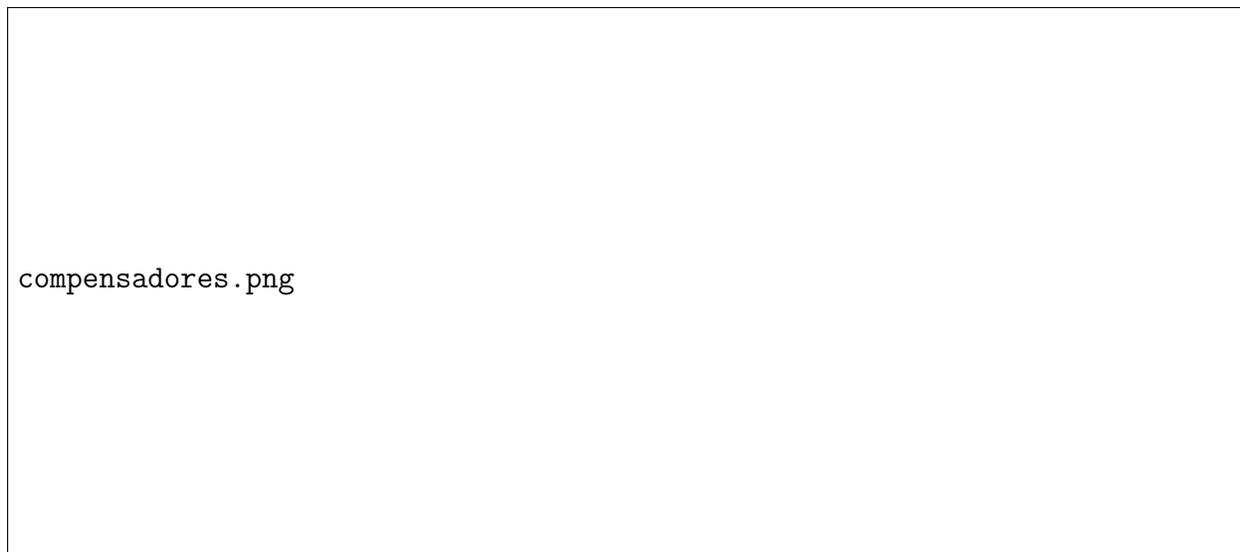


Figura 3.7: Tipos de elementos usados como compensadores con el movimiento de ajuste sugerido [2].

No hay un límite en la cantidad de compensadores que se pueden utilizar pero a diferencia de una prueba de laboratorio donde se utiliza una mesa óptica, en un ensamble es poco práctico contar con muchos elementos con algún grado de libertad, por lo que es preferible utilizar la menor cantidad posible, ya que se puede complicar el criterio para saber cual de los compensadores ajustar de forma individual para lograr el comportamiento óptico deseado del sistema una vez ensamblado.

3.1.5. Análisis de sensibilidad

Dentro del análisis de tolerancias existe un sub análisis llamado análisis de sensibilidad que determina si una tolerancia escogida en algún parámetro es adecuada, ya sea utilizando algún compensador o no, con la ayuda del programa de diseño óptico este análisis muestra la contribución individual a la degradación de la calidad de imagen, debida a los valores extremos del intervalo de tolerancia de cada parámetro que se introduzca.

En el software se escoge el criterio de calidad del sistema, se introducen los valores nominales de los parámetros a analizar, el rango o intervalo de tolerancia escogida en cada parámetro, los compensadores a utilizar y el software muestra la degradación del criterio de calidad escogido por el usuario. El software muestra esta degradación respecto a la nominal del sistema ocasionado por la tolerancia individual de los parámetros, esto permite observar cual tolerancia necesita ser ajustada y cual podría ser relajada, el criterio de calidad para un análisis de tolerancias puede ser el valor de una figura de mérito como el radio rms de la mancha o el error del frente de onda, dependiendo de que es lo que se necesite cuidar en el diseño se escoge uno u otro.

Existe otro análisis conocido como análisis de sensibilidad inverso que hace lo contrario, en éste se especifican los parámetros a evaluar y el criterio de calidad que se quiere mantener, el software busca entonces las tolerancias que mantienen una mínima degradación en este criterio, pero la mayoría de las veces el software escoge unas muy estrictas en los componentes mas sensibles y aunque la idea es buscar las mas holgadas posibles, sirve para ayudar a evaluar si algún componente se puede utilizar como compensador, porque también los componentes mas sensibles se pueden utilizar para esto.

3.1.6. Simulación Montecarlo

Para terminar de definir las tolerancias finales que el sistema requiere, comúnmente se hace una simulación del rendimiento de las tolerancias en el diseño utilizando el método estadístico de Montecarlo, en ésta simulación se hacen tantas iteraciones como se desee y en cada una el software asigna valores aleatorios en todos los parámetros del sistema al mismo tiempo dentro del rango de tolerancia que se escoge en cada uno, en la misma iteración el software busca un valor de posición en el compensador utilizado, en el que el sistema obtiene la mejor respuesta para el criterio de calidad escogido, al final se hace una estadística con el valor obtenido del criterio de calidad en todas las iteraciones permitiendo ver la media y desviación estándar de los datos.

Además el reporte de resultados permite ver de manera individual el comportamiento de cada iteración y se le puede especificar al software que guarde todos los archivos temporales que este crea para cada una, el reporte también muestra el rango real de movimiento de los compensadores resaltando la peor y mejor simulación de las iteraciones hechas.

Esta simulación es muy importante porque muestra el comportamiento de las tolerancias en el sistema de una manera mas realista, esto ayuda a determinar si las tolerancias y compensadores escogidos para el diseño son suficientes para mantener la calidad y eficiencia del sistema o si hay que modificar alguna tolerancia o escoger otro compensador mas eficiente, una vez que se tienen los resultados deseados, las tolerancias tomadas en la simulación son las que el diseño necesita,

entonces se puede validar si esta dentro de lo posible de lograr en la manufactura y ensamble.

Nota: El análisis de sensibilidad es muy útil para escoger de manera objetiva cual tolerancia modificar.

3.2. Análisis térmico de operación

Un análisis importante que se debe hacer previo al diseño optomecánico es el análisis térmico de operación del reductor focal, para este análisis se debe conocer el rango de temperaturas que existe durante las observaciones con el telescopio en cuestión. Los objetivos principales de este análisis son:

- Verificar el comportamiento que tendrá el diseño óptico a distintas temperaturas de operación
- Tener un criterio para escoger los materiales a utilizar en el diseño optomecánico
- Analizar la degradación de la calidad de imagen debido al cambio de posición y forma de los elementos ópticos ocasionado por el coeficiente de expansión térmica (CTE) de los materiales ópticos y mecánicos
- Encontrar soluciones mecánicas que compensen la degradación por efectos térmicos
- Conocer la periodicidad de desenfoques que pueden haber durante toda una noche de observación

Siempre y cuando los cambios de posición y forma de los elementos causados por los efectos térmicos no sobrepasen las tolerancias establecidas, la degradación solo generará un cambio en la posición final del plano imagen lo que se conoce comúnmente como desenfoque y se puede corregir con pequeños movimientos axiales en el sistema.

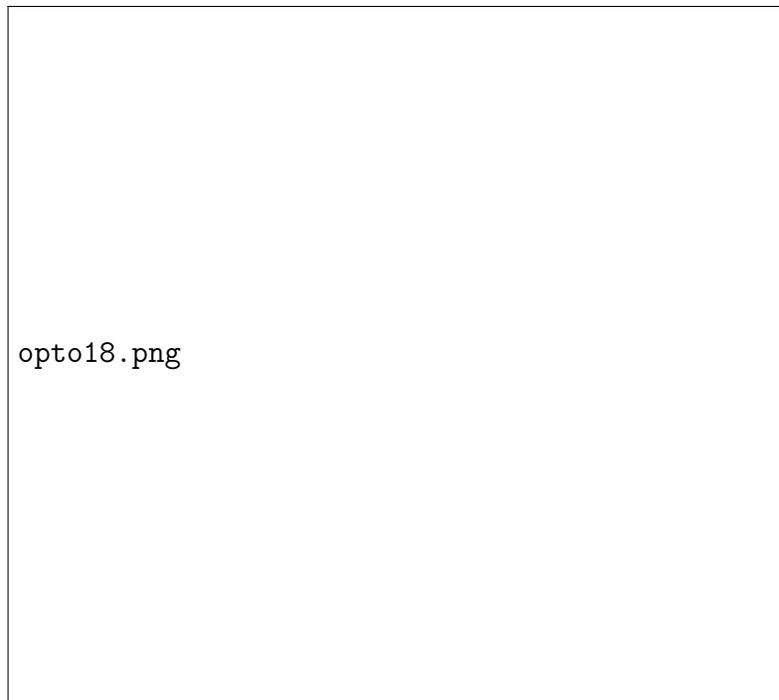


Figura 3.8: Ilustración que muestra el efecto de desenfoque por efectos térmicos en los materiales ópticos y mecánicos del sistema [2].

La mayoría de los telescopios cuentan con un mecanismo de ajuste que permite corregir los desenfoques en la óptica del mismo, esto equivale a mover el plano imagen a la salida del reductor para corregir este problema y ayuda a no complicar demasiado la mecánica de este nuevo sistema.

En el caso que las variaciones en la temperatura durante una noche de observación sean grandes y/o el sistema no se mantenga enfocado por una cantidad de tiempo astronómicamente suficiente para integrar con un detector, resulta impráctico enfocar muchas veces durante las observaciones, para estos casos se puede utilizar algún elemento o separación del sistema donde se pueda implementar un compensador térmico, se pueden utilizar separadores hechos de materiales con un CTE específico que permiten eliminar este desenfoque de manera automática, a esto ultimo se le conoce como atermalización de un diseño óptico.

Nota: Los sistemas que mas se desenfocan considerablemente por un cambio de temperatura en el entorno, son los que tienen una razón focal muy pequeña, siendo estos los que comúnmente necesitan un sistema de atermalización.

3.3. Resumen teórico para diseño optomecánico

La optomecánica es una parte de la ingeniería mecánica que se encarga de diseñar sistemas mecánicos que permiten mantener los elementos de un diseño óptico en su posición, lo anterior para que este tenga el rendimiento requerido conservando su integridad física. Para lograr esto existen consideraciones importantes que se deben de tener, en general están relacionadas con el proceso de manufactura de los elementos y las propiedades intrínsecas de los materiales a utilizar. Afortuna-

damente es un área bien estudiada que cuenta con bastante bibliografía al respecto que ayuda a diseñar este tipo de sistemas de una mejor manera, en estas subsecciones se recopila información útil para el diseño optomecánico de un reductor focal.

3.3.1. Propiedades y efectos físicos relevantes en optomecánica

Al colocar los elementos ópticos en su posición con la ayuda de una sujeción mecánica, existen fuerzas que actúan sobre estos ocasionando **estrés** (σ) y **deformaciones** (ε) en el material óptico, el estrés es cuantificado por la fuerza aplicada dividida entre la sección de área donde se aplica ($\sigma = \frac{F}{A}$) y la deformación por la razón de cambio en las dimensiones del cuerpo bajo estrés respecto a su dimensión original ($\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$). Dependiendo de la geometría que tenga la estructura que sujeta el componente, el estrés y la deformación que puede experimentar el mismo será ocasionado por un esfuerzo de **compresión**, **tensión** o **cortante** la mayoría de las veces, siendo las dos ultimas las que se deben de controlar en mayor medida.

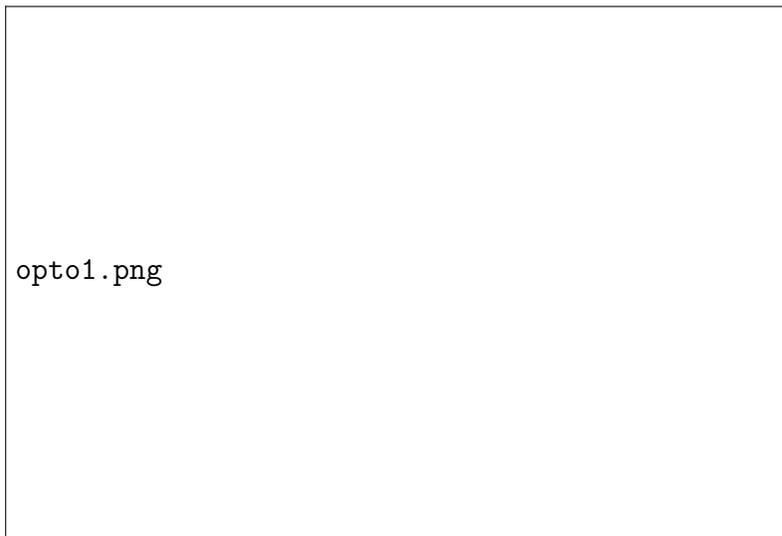


Figura 3.9: Tipos de esfuerzos.

Las propiedades mecánicas mas importantes de los materiales que se deben de considerar en un sistema optomecánico están determinadas por sus **constantes de rigidez elástica**, porque al conocerlas se puede obtener el límite elástico o la resistencia límite entre otros parámetros importantes de los materiales ópticos, esto permite cuantificar los niveles de estrés que puede tener el material dentro del ensamble sin presentar ningún tipo de falla o daño.

Una de estas constantes describe un efecto conocido como **efecto de Poisson** en los materiales, este aparece cuando a un material se le aplica una fuerza de compresión o tensión sobre un eje y este se deforma sobre ese eje y a la vez se expande o comprime en otro, manteniendo su mismo volumen, a esta constante se le llama **razón de Poisson** ($\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}$) y cuantifica la proporción entre estas deformaciones teniendo un valor típico entre 0.25 a 0.35 para materiales rígidos. Otras constantes de rigidez elástica son el **módulo de elasticidad** o **módulo de young** (E), el **módulo de compresibilidad** o **módulo de bulk** (K) y el **módulo de corte** o **módulo de cizalladu-**

ra (G) de los materiales, estas propiedades definen la rigidez de un material, su capacidad de resistir compresión y su capacidad de resistir esfuerzos cortantes respectivamente. Estas ultimas propiedades físicas se relacionan entre si como se puede ver en la figura 3.10.

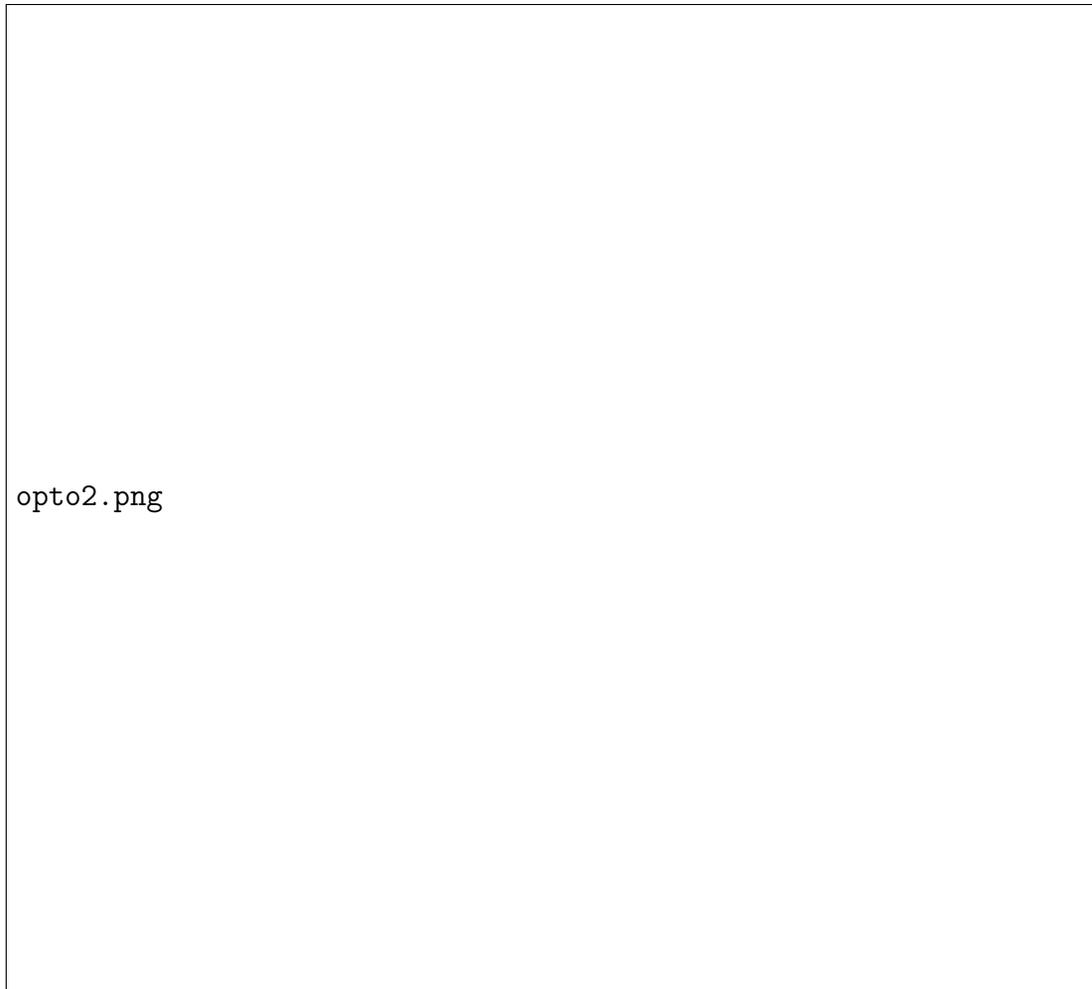


Figura 3.10: Relación entre las constantes de rigidez elástica [26].

Las propiedades térmicas de los materiales también se deben considerar al diseñar un sistema optomecánico, las mas importantes son:

- **CTE** (α)
- **Conductividad térmica** (λ)
- **Difusividad térmica** (D)

El CTE de los materiales ópticos y mecánicos se debe de considerar no solo por la degradación que pueda tener la imagen, si no también por que dependiendo del valor de la diferencia de estos, por el efecto de dilatación térmica, los materiales se expandirán o comprimirán en función de la temperatura, esto agrega estrés adicional en los componentes ópticos pudiendo llegar a dañarlos, por tanto se debe de cuidar en el diseño que los pequeños cambios de posición estén dentro de las

tolerancias de ensamble establecidas en el análisis de tolerancias y que la óptica sobreviva dentro del rango de temperaturas a la que pueda estar expuesto el ensamble.

Dependiendo de la aplicación puede ser mas o menos importante la rapidez con la que se esparce la temperatura en los materiales, por lo que también se debe considerar la difusividad y conductividad térmica, ya que al menos ópticamente la temperatura puede cambiar el índice de refracción del aire que pueda estar entre los materiales ópticos. La figura 3.11 muestra la preferencia técnica que idealmente deberían tener las propiedades de los materiales a utilizar en un sistema optomecánico.

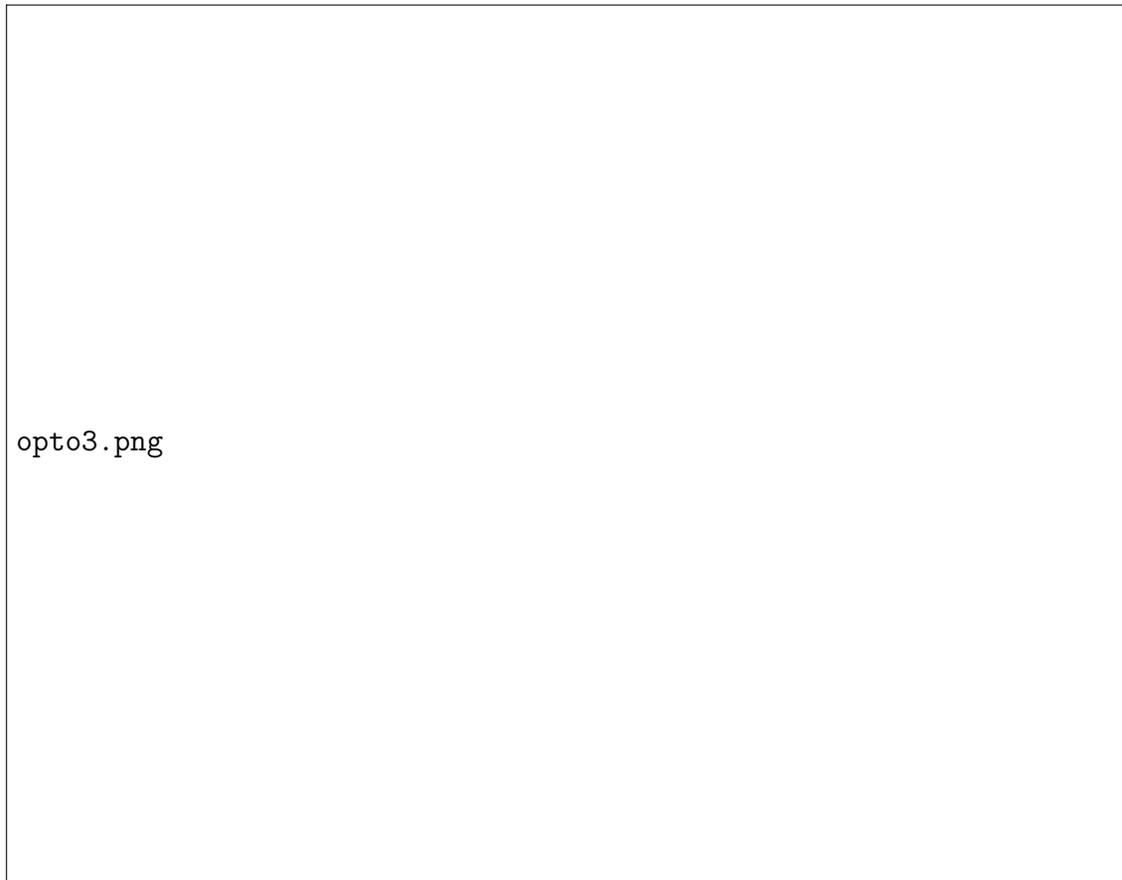


Figura 3.11: Preferencia técnica en propiedades de materiales para diseño optomecánico[26].

Un ultimo fenómeno a tomar en cuenta que aparece en los materiales ópticos bajo estrés es el efecto de **birrefringencia**, este fenómeno no es mas que una diferencia en el índice de refracción del material para luz incidente con polarización paralela o perpendicular al estrés, es expresada en términos de diferencia de camino óptico por longitud de camino recorrido por la luz (nm/cm) y depende del valor de un parámetro del material llamado **coeficiente de estrés óptico** (K_s).

Este parámetro describe la relación entre el estrés aplicado y el resultante cambio en la diferencia de camino óptico, se vuelve muy importante considerarlo para instrumentos astronómicos de alta precisión como polarímetros, pero también en el diseño optomecánico de un reductor focal, porque este fenómeno podría introducir degradaciones en la calidad de imagen al pasar la luz por estas regiones estresadas. La figura 3.12 muestra algunos coeficientes de estrés óptico de algunos

materiales para una longitud de onda y temperatura específica.

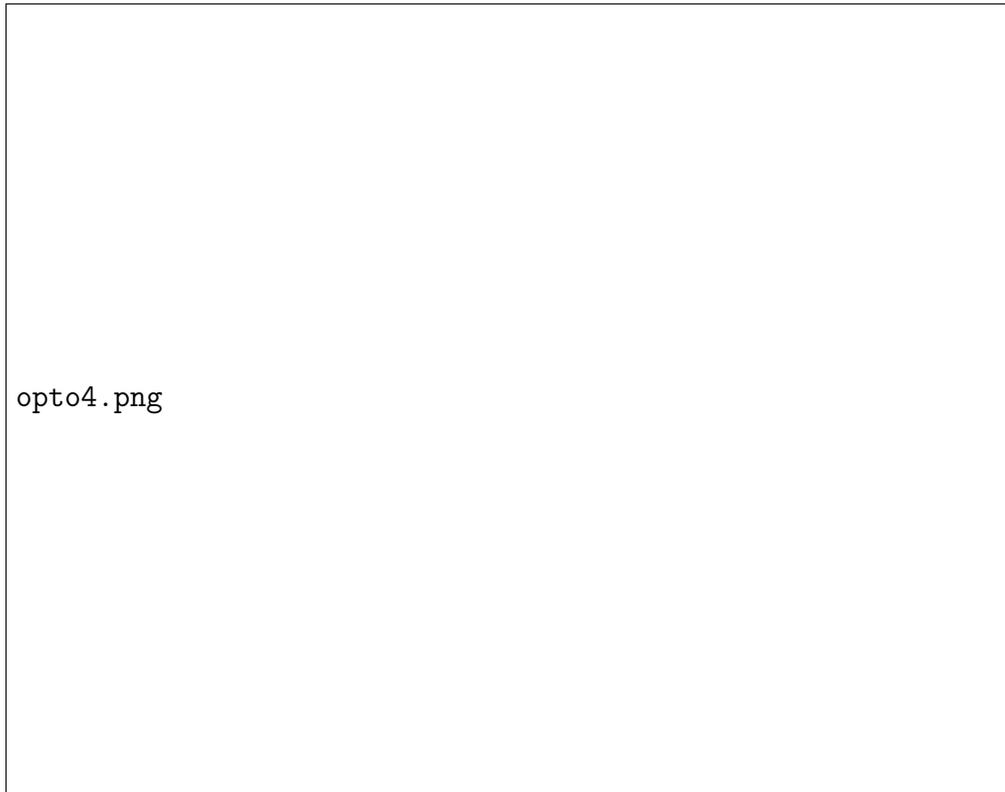


Figura 3.12: Coeficientes de estrés óptico de algunos materiales[26].

3.3.2. Materiales comunes para sistemas optomecánicos

Aunque con lo mencionado anteriormente se puede buscar distintos tipos de materiales que pudieran ser utilizados para el ensamble, hay algunos que se utilizan comúnmente para este tipo de sistemas y se encuentran muy bien caracterizados, estos son el aluminio, el acero inoxidable, el berilio y el titanio.

Aluminio: El aluminio es un material liviano con una densidad aproximada de 2.68 gr/cm^3 y posee una alta facilidad de maquinado, las aleaciones mas utilizadas son la 6061-T6 y 2024-T4, el principal parámetro en contra es su CTE de aproximadamente $24 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$, siendo este material el que tiene el valor mas alto en este parámetro de todos los materiales comúnmente usados en este tipo de aplicaciones, pero al ser menos costoso y por tener una alta conductividad térmica que permite lograr un equilibrio térmico rápidamente, es de los mas utilizados.

Acero inoxidable: Los tipos de acero mas utilizados son el acero inoxidable austenítico (serie 300) y el martensítico-ferrítico (serie 400), son utilizados cuando los requisitos térmicos son estrictos, ya que por ejemplo el acero 416 tiene un CTE de solo $9.90 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ que esta cerca del valor que tienen algunos vidrios ópticos, una ventaja adicional es su buena resistencia a la corrosión pero tiene la desventaja de que es tres veces mas pesado que el aluminio con una densidad de 7.75 gr/cm^3 y es difícil de maquinar. Existe unas aleaciones de acero que cuentan con mas bajo CTE pero son muy

costosas y difíciles de maquinar, una contiene un 36% níquel y posee un CTE de $1.26 \mu m/^{\circ}C$, a la otra se le conoce como super invar y tiene un CTE de $1.08 \mu m/^{\circ}C$.

Berilio: Este material tiene una densidad muy baja de $1.85 gr/cm^3$, una alta rigidez y un aceptable CTE de aproximadamente $11.52 \mu m/^{\circ}C$, pero aunque parezca un material idóneo es muy costoso y aún más difícil de maquinar, ya que el hacerlo pone al operador en riesgo amenos que se cuente con un sistema que mantenga la concentración de polvo de berilio en los límites aceptables.

Titanio: Las aleaciones de titanio son excelentes para este tipo de aplicación, la más utilizada es la Ti-6Al-4V, tiene un CTE muy parecido al de los vidrios ópticos de $8.82 \mu m/^{\circ}C$ con una densidad de $4.54 gr/cm^3$. La desventaja que tiene es su alto costo, su dificultad de maquinado y su baja conductividad térmica que le impide que el material alcance el equilibrio térmico de manera rápida.

3.3.3. Criterios de integridad optomecánica

El estrés que generan los esfuerzos del ensamble optomecánico sobre los componentes ópticos debe ser muy bien cuantificado, para asegurar que estos no presenten algún tipo de daño o falla, ya que debido a que el material óptico es vidrio, este es muy frágil y cualquier falla dentro de la estructura cristalina se traducirá como una fractura del elemento. El estrés ejercido por el ensamble debe estar muy por debajo del límite de ruptura del material, para estos sistemas se utiliza un **factor de seguridad** de 2 a 4, siendo este valor obtenido de la división del estrés permitido por el estrés aplicado. Un dato importante es que el vidrio es un material que resiste en mayor medida un estrés por compresión que por tensión.

“Como una conservativa regla de oro el estrés por tensión que puede resistir un vidrio óptico es de 1,000 psi que equivale a 6.9 MPa, mientras que para el estrés por compresión el material resiste 50,000 psi equivalentes a 345 MPa antes de que existan problemas de falla. Para el estrés por tensión estos límites pueden incrementarse a 2,000 psi (13.8 Mpa) para superficies pulidas y 4,000 psi (27.6 Mpa) para cargas instantáneas” [26].

Un dato técnico importante (obtenido de [5]) a tener en cuenta en lo que respecta al estrés en los componentes ópticos de un ensamble optomecánico, es cuidar que el troque con el que se ensamblan las tapas de sujeción axial de dichos componentes sea moderado, lo que se traduce como que debe estar oscilando en valores de 50 a 80 inch-lbs, esto para evitar que la presión sea suficiente para causar alguna distorsión en el frente de onda entrante o daño al elemento óptico.

No todos los materiales ópticos tienen las mismas propiedades físicas sin mencionar las diferentes curvaturas, espesores y acabados que estos puedan tener en un diseño, así que para saber exactamente cuánto estrés soporta se tendría que caracterizar cada elemento, aunque también podría calcularse teóricamente si el fabricante del material proporciona las especificaciones suficientes. Se puede hacer también una relación de proporción utilizando las propiedades de un cierto vidrio ya caracterizado y extrapolándolas al material con el que se cuenta.

Cabe mencionar que cuando se realiza el ensamble de la óptica es crucial cuidar que los componentes no presenten ningún tipo de estrés significativo, ya sea por el mismo peso de los elementos o

los soportes axiales y radiales utilizados para sujetar el componente óptico en su posición, porque que el mayor estrés debe ser causado por la dilatación térmica de los materiales.

Algo que puede ayudar a conservar la integridad de un elemento óptico bajo estrés por tensión, es teniendo una buena calidad en el acabado de la superficie, puesto que “para un estrés dado el material fallará si un defecto excede la **profundidad crítica de falla**” [26]. Se debe especificar entonces en la norma 5 de la ISO del plano de fabricación un acabado de buena calidad, ya sea de 60/40 o 40/20 de ser posible, ya que esta norma especifica la dimensión en micras de los defectos de raya y poro sobre la superficie pulida respectivamente.

$$a_c = \left(\frac{K_c}{2\sigma_0} \right)^2$$

a_c = Profundidad crítica de falla

K_c = Resistencia del vidrio a fractura (propiedad de material)

σ_0 = Estrés de tensión aplicado

Por ultimo está el criterio para cuidar que un material óptico no presente birrefringencia por estrés, de igual manera depende del material pero se puede establecer que el limite de presión que se le debe ejercer a un vidrio óptico, para que este no presente efectos de birrefringencia en el área de estrés, es de 500 lb/in^2 equivalentes a 3.5 MPa [5]. Este valor de estrés es bajo y puede no estar presente en el área efectiva de la óptica, por tanto mientras esta área se mantenga exenta de cantidades de estrés superiores a este límite durante las observaciones, se puede considerar este estrés como insuficiente para causar birrefringencia.

Si no es posible evitar el estrés por completo en el área efectiva y debe de conocerse exactamente el efecto de birrefringencia por un determinado estrés, puede utilizarse una relación para calcular el valor aproximado del retardo del frente de onda entre los estados de polarización de la luz (ΔW_p) al pasar por una superficie estresada

$$\Delta W_p = \sigma t / \lambda$$

ΔW_p = Retardo del frente de onda entre los estados de polarización de la luz expresado en ondas

σ = Estrés de tensión o compresión

t = espesor (Longitud de camino óptico)

λ = longitud de onda

Dependiendo la aplicación con ayuda de esta relación se puede derivar la diferencia de camino óptico (OPD) de ambos estados de polarización, para definir si el estrés permitido es aceptable o no (ver figura 3.13).

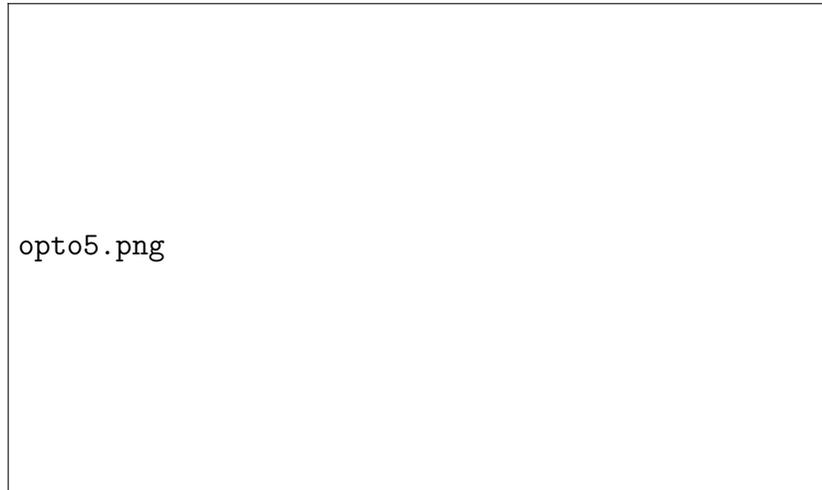


Figura 3.13: Criterios de error en OPD permitidos para distintas aplicaciones [26].

3.3.4. Tipos de ensamble óptico

El diseño del ensamble optomecánico debe contener los soportes y restricciones, tanto radiales como axiales para fijar al elemento óptico en su posición. El ensamble debe garantizar la respectiva tolerancia definida, garantizando el centrado del elemento óptico y la ubicación lateral del mismo.

Existen tres tipos comunes de montaje para restringir radialmente a un elemento óptico dentro del ensamble:

- Montaje Duro
- Montaje Empotrado
- Montaje Elastométrico

El Montaje duro consiste en diseñar un barril mecanizado con su diámetro interno un poco mas grande que el diámetro externo del componente óptico, para generar un espacio vacío entre los elementos, este espacio vacío no debe superar la tolerancia definida y se debe de evitar que la diferencia de dilatación térmica de los materiales genere estrés al componente, presionándolo y que este se rompa[2]. Se puede generar también utilizando tolerancias distintas en el diámetro externo del componente óptico y el diámetro interno del barril mecánico pero deben tenerse las mismas consideraciones de los efectos térmicos.

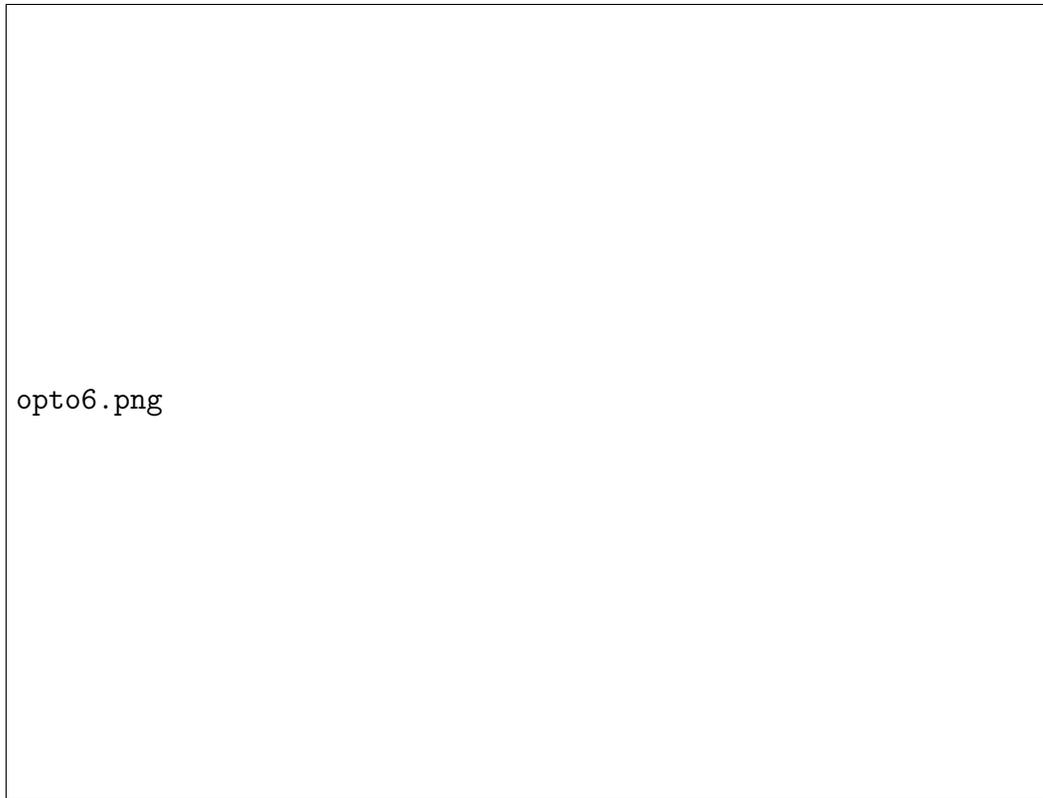


Figura 3.14: Ejemplo ilustrativo de un montaje duro [2].

El montaje empotrado consiste en colocar un anillo como interfaz entre el componente óptico y el barril mecánico, este anillo tiene contactos superficiales con estos componentes y su diseño debe permitir amortiguar el estrés por compresión y tensión en el vidrio óptico. Este tipo de ensamble facilita hacer un centrado mas preciso en el elemento y darle un soporte radial al componente óptico, sin embargo, agrega puntos de contactos que obligan a generar elementos mas precisos para garantizar que el componente quede en su posición con su respectiva tolerancia, pero dependiendo de las dimensiones del elemento y los materiales a utilizar lograr el estrés permitido puede no ser tan sencillo.

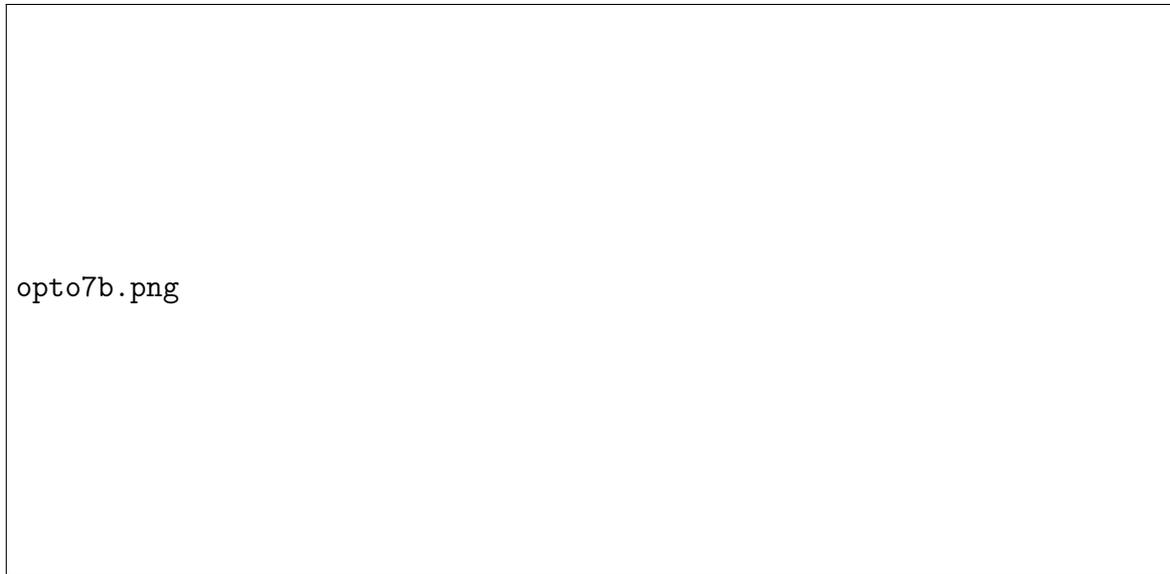


Figura 3.15: Ejemplo ilustrativo de un montaje empotrado [32].

El montaje elastométrico es un montaje que contiene un espacio vacío entre el barril y el componente óptico, pero de una dimensión mayor que la del ensamble duro, en este montaje se deben de utilizar sistemas de precisión como auto colimadores para garantizar el centrado del elemento. Una vez logrado se inyecta un aditamento adhesivo especial conocido como epóxico que actuará como soporte radial, este aditamento amortigua el efecto de compresión y tensión que pudiese presentarse pero es una técnica que dificulta el desensamble.

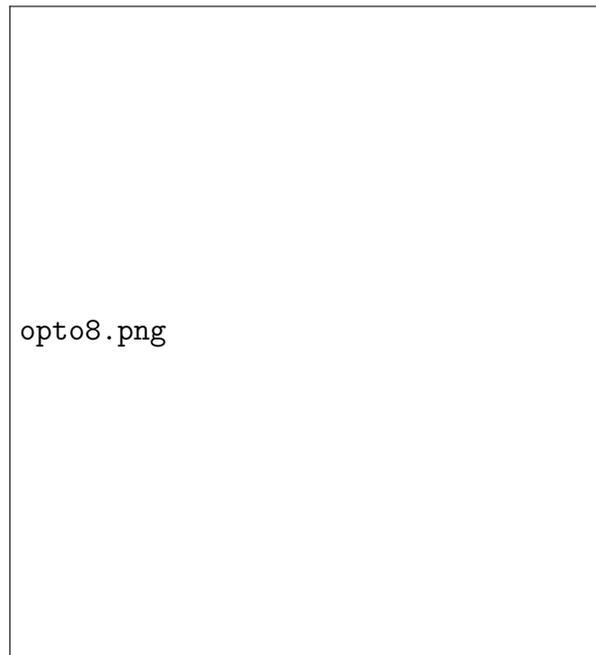


Figura 3.16: Ejemplo ilustrativo de un montaje elastométrico [26].

Para el caso de las restricciones axiales se pueden colocar espaciadores en el barril o generar es-

calones dentro del mismo, en cualquiera de los dos casos debe de cuidarse el tipo de contacto por la presión axial ejercida en el componente óptico para sujetarlo. El estrés es ocasionado al agregar una tapa o componente de sujeción axial que puede ser un anillo roscado, por ello es preferible colocar un elemento amortiguador como veremos mas adelante.

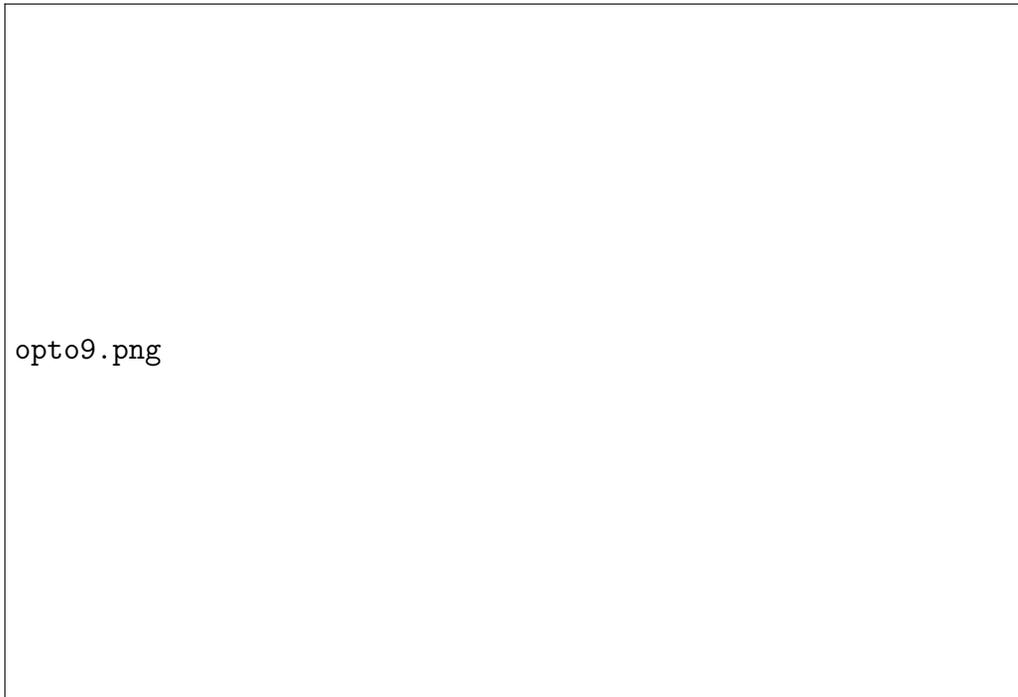


Figura 3.17: a) Barril con espaciadores b) Barril con escalones internos [26].

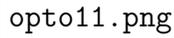
El primer contacto que tiene la lente en el ensamble es donde se asienta para posteriormente colocar un anillo o tapa de sujeción, los contactos de la lente pueden tener una forma plana, cuadrada, con cierto ángulo de inclinación, con un radio controlado (toroidal) o el mismo radio de curvatura del elemento óptico, dependiendo de su geometría y el nivel de estrés que se necesite, se puede escoger uno u otro.



opto10.png

Figura 3.18: Geometrías de contacto entre la superficie óptica y la retención axial: a) Contacto cuadrado b) Contacto tangente c) Contacto a 135 grados d) Contacto toroidal) e) Contacto con misma curvatura f) Contacto plano [2].

Los elementos de sujeción es preferible que tengan un contacto suave o amortiguado con el elemento óptico, ya sea que se utilicen anillos roscados o tapas atornilladas, el propósito de esta sujeción es generar solo un poco de estrés para sostener la lente axialmente, los elementos mas comúnmente utilizados son flexores, O-rings o resortes ondulados.



opto11.png

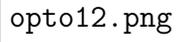
Figura 3.19: Ejemplos ilustrativos de ensambles con elementos de sujeción axial suave: a) Retención con flexor b) Retención con O-ring c) Retención con Resorte ondulado [32].

3.3.5. Mecanismos de Ajuste

Para realizar los ajustes en los elementos a utilizar como compensadores existen varios tipos de mecanismos, estos se pueden utilizar dependiendo del grado de libertad requerido y el nivel de precisión del ajuste, estos mecanismos deben contener:

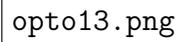
1. Una interfaz entre el componente a ajustar y la estructura fija
2. Un actuador para ajustar el movimiento relativo del elemento respecto a la estructura fija
3. Un dispositivo de acople entre el elemento a ajustar y el actuador
4. Un dispositivo de precarga para evitar algún juego o soltura en el mecanismo
5. Un elemento de bloqueo para retener la posición ajustada

Para cada grado de libertad puede ser mas eficiente usar algún tipo de mecanismo, las figuras 3.20, 3.21 y 3.22 muestran distintos elementos para cada tipo de ajuste.



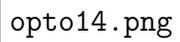
opto12.png

Figura 3.20: Componentes para ajustes lineales [2].



opto13.png

Figura 3.21: Componentes para ajustes de inclinación [2].



opto14.png

Figura 3.22: Componentes para ajustes rotatorios [2].

Capítulo 4

Diseño óptico

4.1. Metodología y obtención del diseño óptico

4.1.1. Necesidades del diseño óptico

Tal y como se menciona en el marco teórico de secciones anteriores, se pueden englobar en 4 los parámetros que deben tomarse en cuenta para comenzar un diseño de reductor focal, estos son los siguientes:

1. Campo de visión ó FOV.
2. Rango espectral de operación y líneas espectrales mas importantes dentro del rango.
3. Razón focal.
4. Escala de placa.

En el caso de este reductor focal que será utilizado para tratar de acoplar diferentes instrumentos, es importante definir estas necesidades específicas del reductor focal desde el inicio, esto porque los objetos astronómicos en el cielo tienen un tamaño angular aparente variado pudiendo abarcar un FOV de 6 x 4 minutos de arco (M1) o inclusive un FOV de 90 x 40 minutos de arco (M8), sin mencionar que dependiendo del fenómeno físico por observar algunas longitudes de onda del espectro visible se vuelven mas relevantes que otras para analizar dicho fenómeno.

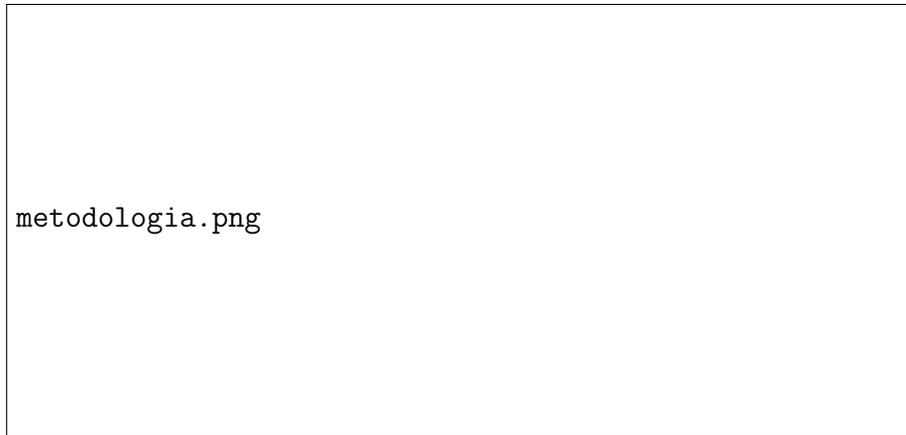


Figura 4.1: Imágenes astronómicas de la: a) Remanente de supernova M1 [23] b) Nebulosa de la laguna M8 [30].

En lo que respecta al campo de visión, el telescopio de OAGH tiene la capacidad de observar un campo de 30 minutos de arco y debido a su escala de placa, el espacio lineal de este campo abarca una dimensión total de 220 mm de diámetro en el plano focal. Aunque podría pensarse que ese debería ser el campo máximo de observación que el reductor focal debería ser capaz de resolver, debe tomarse en cuenta que el tipo de telescopio que tiene el OAGH es relativamente pequeño y no cuenta con un foco Nasmyth con una base para colocar los instrumentos, así que los instrumentos que se le pudieran montar a la estructura cubriendo ese campo serían demasiado robustos, pesados e imposibles de implementar, sin mencionar que la óptica del telescopio presenta aberraciones considerables después de los 12 minutos de arco (dato obtenido del equipo técnico del OAGH), que serían muy difíciles de corregir para un campo de ese tamaño.

Por todo lo anterior establecimos que el sistema debía aceptar un campo de 10 a 12 minutos de arco, sin embargo debido a que el proyecto tiene recursos limitados y uno de ellos son los blanks para fabricar los componentes ópticos, se tenía la tolerancia de al menos diseñar un sistema que cubra un mínimo de 6 minutos de arco.

Si observamos la curva de eficiencia cuántica del detector en la figura 1.10, vemos que el CCD tiene aproximadamente una eficiencia de al menos 50% en todo el espectro visible, con la mayor eficiencia cerca de los 600 nm. Para aprovechar al máximo el sistema, se decidió establecer que el reductor focal debería ser capaz de operar de buena manera en todo el espectro visible de la luz donde el CCD tiene al menos 50% de eficiencia (400 nm - 900 nm).

Como el software permite incluir en el modelo óptico solo un muestreo con longitudes de onda específicas de luz y no un rango completo para analizarlo, el rango fue centrado en la línea de 656.3 nm que corresponde a una línea de emisión del hidrógeno conocida también como $H\alpha$, esto debido a que es una línea astronómica muy importante para muchos estudios. Cabe señalar que el programa por default sugiere como líneas para el muestreo del espectro visible las líneas de 486.1 nm ($H\beta$) y 587.5 nm (He), debido a que también estas líneas son de interés científico se incluyeron en el muestreo de todas las frecuencias seleccionadas dentro del intervalo.

Para lograr introducir el seeing de un segundo de arco en una matriz de 2x2 píxeles del CCD

ANDOR, se requiere una escala de placa a la salida del reductor de 38.46 segundos de arco por mm (0.5 segundos de arco por pixel de 13 micras), siendo un $f/2.5$ la razón focal a la que se debe convertir el sistema (haciendo los cálculos con las ecuaciones citadas en la sección 2). Con este número f y escala de placa el CCD puede cubrir un campo cuadrado de casi 9 minutos de arco por lado, el cual es bastante aceptable, no obstante se debe tener en cuenta que para diseñar un sistema con una baja razón focal con capacidad de cubrir un gran campo de visión, necesita tener algunas características como una distancia focal posterior pequeña y tamaños de pupilas suficientes, ya que el campo de visión limitará el tamaño mínimo de pupila requerido” [1]. A continuación se reproduce la tabla 1.2.

Parámetros	Valores propuestos para el instrumento
Campo de visión	6 a 12 minutos de arco
Rango espectral de operación	400 nm - 900 nm
Escala de placa	0.5 segundos de arco por píxel (para un seeing = 1 segundo de arco)
Razón focal	2.5

Tabla 4.1: Parámetros elementales del reductor focal con su respectivo valor que debería tener en el diseño.

Para validar la capacidad de resolución y eficiencia del sistema, el criterio que se decidió utilizar fue la escala del diagrama de manchas, debido a que estamos limitados en resolución por el seeing del sitio de observación, las manchas no deben de exceder el tamaño que tendría el mejor disco de seeing del sitio de observación (1 segundo de arco) en el plano imagen del reductor focal, independientemente de la razón focal que se logre obtener.

4.1.2. Limitaciones y restricciones para el diseño

Para el diseño del reductor focal se contaban con vidrios ópticos adquiridos para un proyecto previo, afortunadamente los vidrios eran de los tipos crown y flint con una gran diferencia entre su número de Abbe, que es lo que los diferencia, además de que el flint es relativamente de alto índice de refracción. Por tanto facilita la eliminación de las aberraciones cromáticas, permitiendo buenas refracciones en las superficies sin la utilización de curvaturas muy pronunciadas, además, permite no necesitar muchos elementos para distribuir de buena manera la trayectoria del rayo, pero como solo se tienen dos blanks con un tamaño relativamente grande, se tuvo que limitar la configuración del diseño a dos subsistemas, usando un colimador y un objetivo de cámara (figura 2.17 b) [22]).



metodologia1.png

Figura 4.2: Especificaciones de los vidrios ópticos disponibles para el diseño del reductor focal.

Para el diseño óptico de un espectrógrafo de campo llamado MEGARA se utilizó una configuración de diseño con un colimador y un objetivo de cámara, empíricamente se tomó como criterio en el diseño que para cubrir un campo de 4KX4K píxeles con un tamaño de píxel de 15 micras, se necesita un mínimo de 160 mm en el tamaño de la pupila, para poder distribuir y controlar las aberraciones en la óptica a lo largo del FOV [1]. Como en nuestro caso se tiene un detector de 1KX1K con píxeles de 13 micras, si se utiliza el mismo criterio se puede aproximar la necesidad de tener una pupila de al menos 40 mm en la entrada de la cámara, esto para controlar las aberraciones del sistema al menos en el campo que cubre el detector.

Los blanks para la cámara tienen un tamaño promedio de 50 mm por lo que esto último es una restricción muy importante para el diseño, debido a que 40 mm es un valor cercano al diámetro disponible y se debe dejar algo de vidrio sobrante para la fabricación y montaje de los elementos. La distancia desde la última lente hasta la posición del CCD también es importante a tener en cuenta porque se pretende obtener un sistema rápido, en nuestro caso el CCD tiene una montura estándar tipo C con una profundidad de 17.45 mm, además un diafragma a la entrada del CCD de 25 mm de diámetro, lo anterior también complica el diseño de un sistema rápido porque deja poco espacio de margen para el acople mecánico del sistema con el detector.



Figura 4.3: Vista de corte del ensamble que muestra la distancia entre el ultimo lente y el CCD ANDOR.

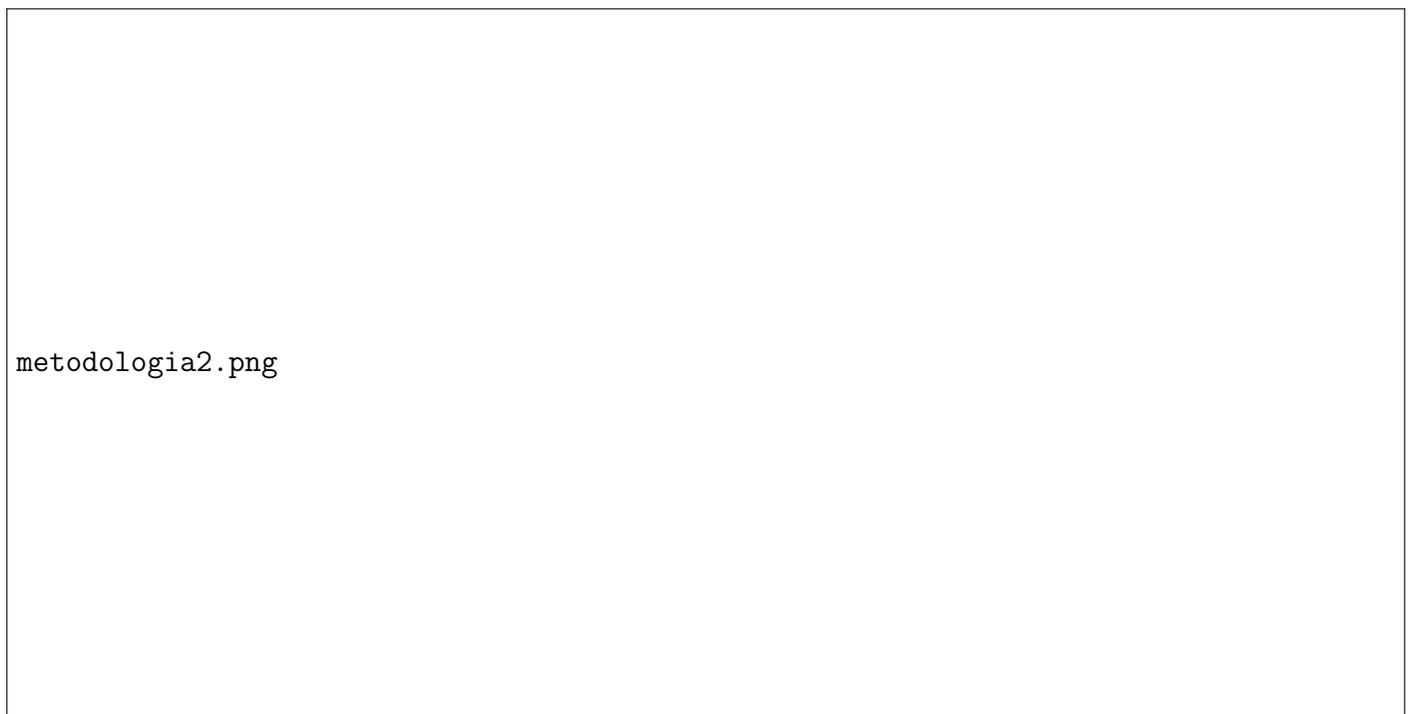


Figura 4.4: Tipo de montura y dimensiones de la estructura del CCD ANDOR.

Las restricciones de manufactura también juegan un rol importante para diseñar el sistema, por ello, se consultó con el personal del taller de manufactura óptica del instituto y se establecieron

limitaciones físicas en los elementos.

En el caso de la curvatura de las superficies, se estableció el no utilizar curvaturas con un radio cercano al radio del blank de vidrio, para no complicar la generación de ésta, ni utilizar curvaturas mayores a 900 mm para facilitar su medición en el interferómetro de prueba. En dado caso que se necesitara una superficie con una curvatura muy grande, se intentaría sustituirla en el diseño con una superficie plana, ya que además de facilitar su medición ahorra mucho proceso de manufactura.

El espesor central mínimo que se podría manejar sería de un 10 % del diámetro total del elemento, pero como uno de los dos tipos de vidrios ópticos disponibles era de CAF2, se prefirió tomar un par de milímetros por encima de este valor para los componentes de este material, lo anterior para no correr riesgos de fractura durante el proceso de fabricación, ya que este material es frágil. Para el caso del espesor central máximo se decidió no dejar menos de un milímetro de vidrio sobrante por cara de cada superficie, cuidando que el espesor sagital no sobrepase las dimensiones de los blanks, lo ultimo referido a superficies cóncavas.

Sabiendo que se necesitaría cubrir el mayor campo posible y que las dimensiones de los blanks para la cámara serían la mayor limitante, se estableció una dimensión de diámetro máximo de 49.5 mm para estos elementos, aunque este valor complica la fabricación de estos componentes, se puede lograr y se prefirió aprovechar esta capacidad de manufactura en el taller.

Resumidamente se encuentran 3 limitaciones importantes que restringen la posibilidad de alcanzar las necesidades más ambiciosas del proyecto:

1. Cantidad de elementos ópticos de gran tamaño que limita la configuración del diseño
2. Dimensiones limitadas en los componentes que limita el campo de visión
3. La profundidad a la que se encuentra el detector de su montura que condiciona la distancia focal posterior del sistema óptico y su razón focal
4. Limitaciones de manufactura

4.1.3. Técnicas y proceso de diseño

Al empezar a diseñar se intentó obtener la razón focal ($f/2.5$) y el FOV más exigente posible, colocando las figuras de mérito y las restricciones que se tenían en el software de diseño óptico, se comenzó con un campo propuesto de 10 minutos de arco, utilizando 8 elementos con los tipos de materiales intercalados para controlar las aberraciones cromáticas que se pudieran presentar, el modelo inicial tenía un doblete acromático en el colimador y para la cámara un triplete seguido de un doblete y un lente de acople para el haz en el detector, colocando el filtro en un haz convergente, sin embargo, no se tuvieron buenos resultados en las primeras simulaciones porque el campo era demasiado grande para controlar las aberraciones y para cubrirlo se necesitaba un diámetro de componentes en la cámara un poco mayor al límite establecido (ver figuras 4.5, 4.6 y 4.7).

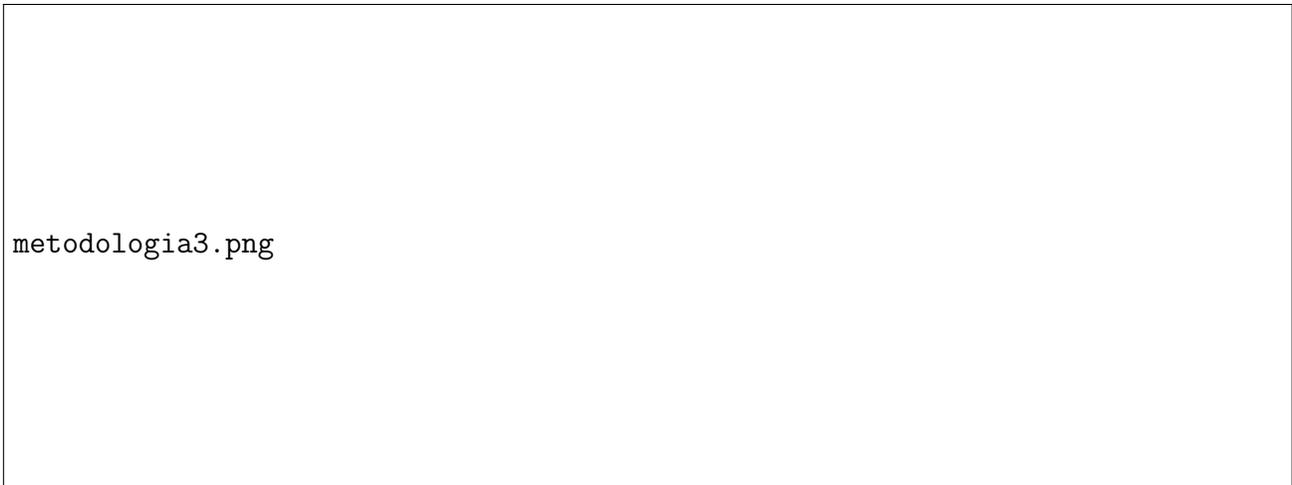
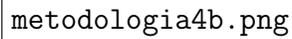


Figura 4.5: Diagrama de rayos del diseño $f/2.5$ y 10 minutos de arco. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.



metodologia4.png

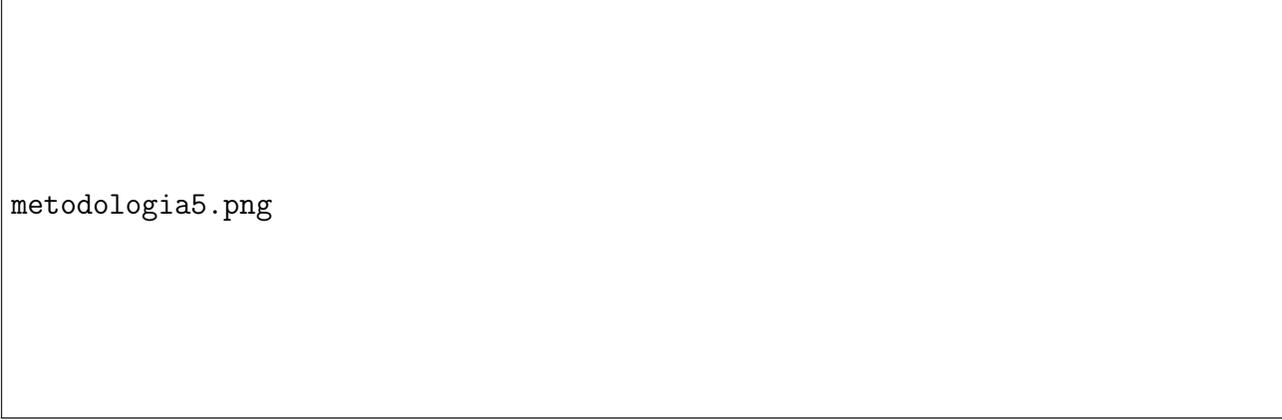
Figura 4.6: Diagrama de manchas estándar del diseño $f/2.5$ y 10 minutos de arco..



metodologia4b.png

Figura 4.7: Diagrama de manchas extendido del diseño $f/2.5$ y 10 minutos de arco, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.

Para facilitar la optimización del diseño, se retiró del modelo el filtro óptico para colocarlo una vez que se tuviera un diseño eficiente, aunque los resultados mejoraron el diseño seguía sin alcanzar los requerimientos. Se procedió entonces a disminuir el campo de visión a 8 minutos de arco y aumentar el número f de la cámara a 3.2, con un nuevo modelo en la cámara del sistema con 4 lentes cementados seguido de dos lentes, no obstante seguían sin obtenerse los resultados requeridos (ver figuras 4.8, 4.9 y 4.10).



metodologia5.png

Figura 4.8: Diagrama de rayos del primer modelo de diseño $f/3.2$ y 8 minutos de arco. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.

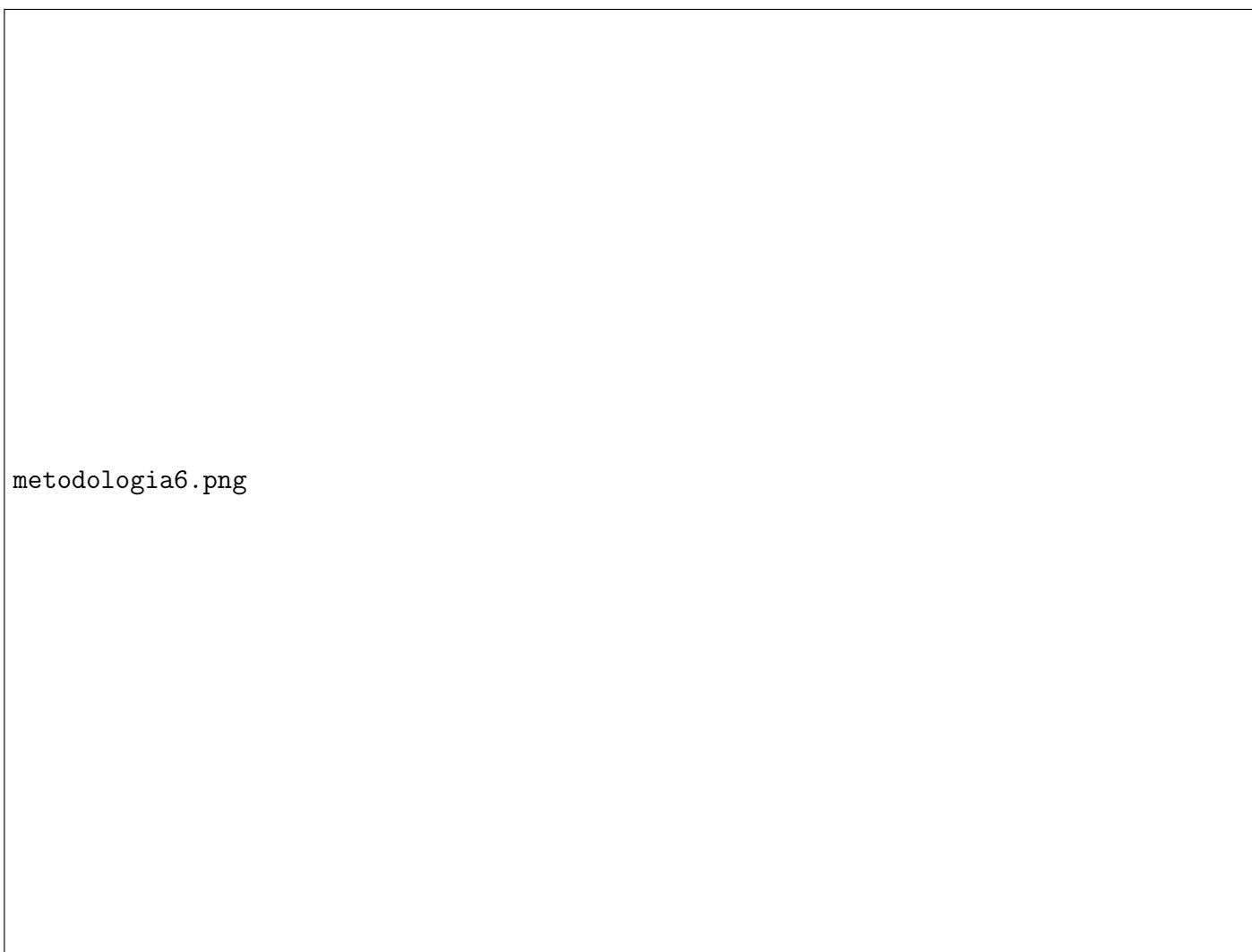


Figura 4.9: Diagrama de manchas estándar del primer modelo de diseño $f/3.2$ y 8 minutos de arco.

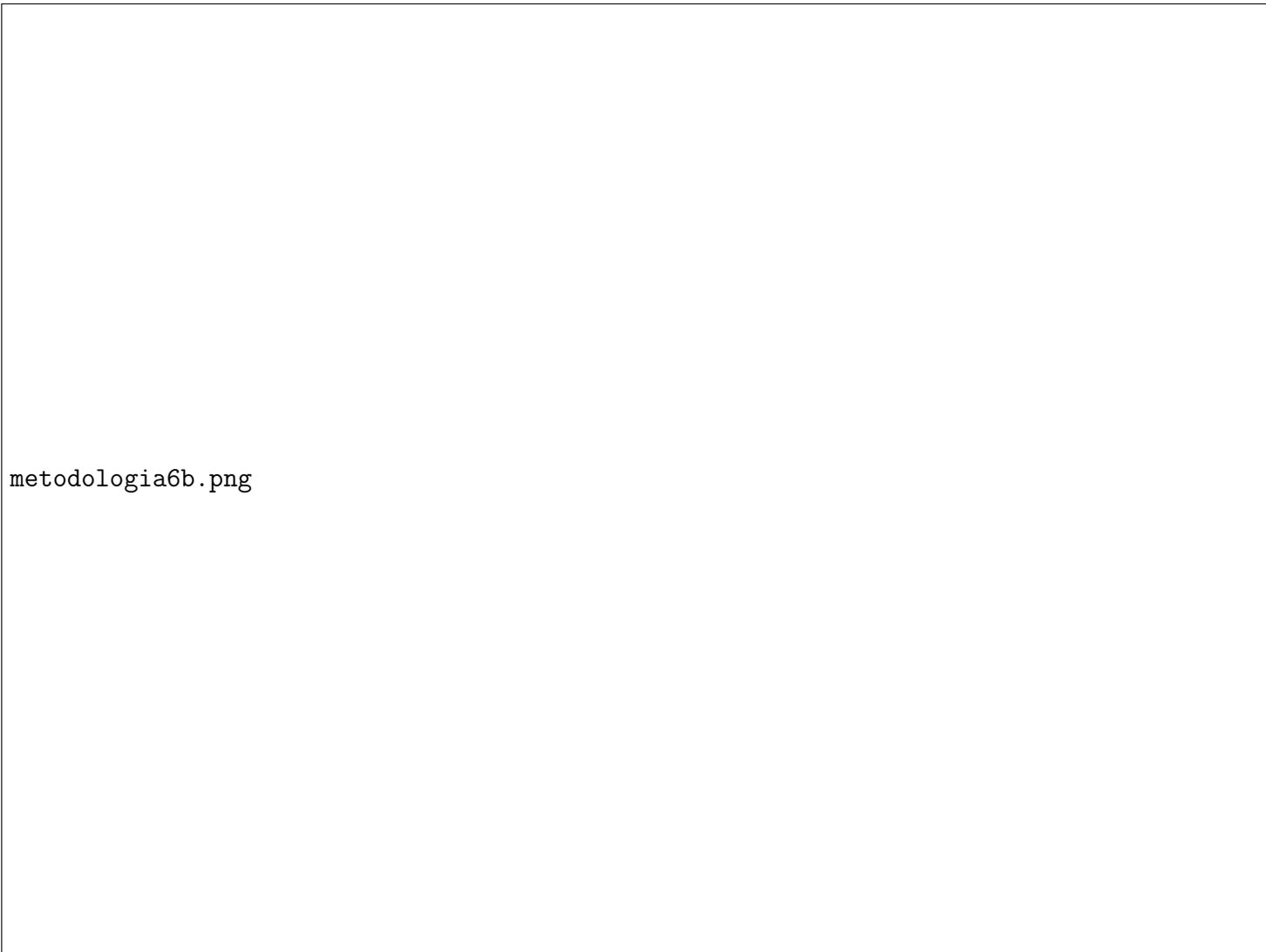
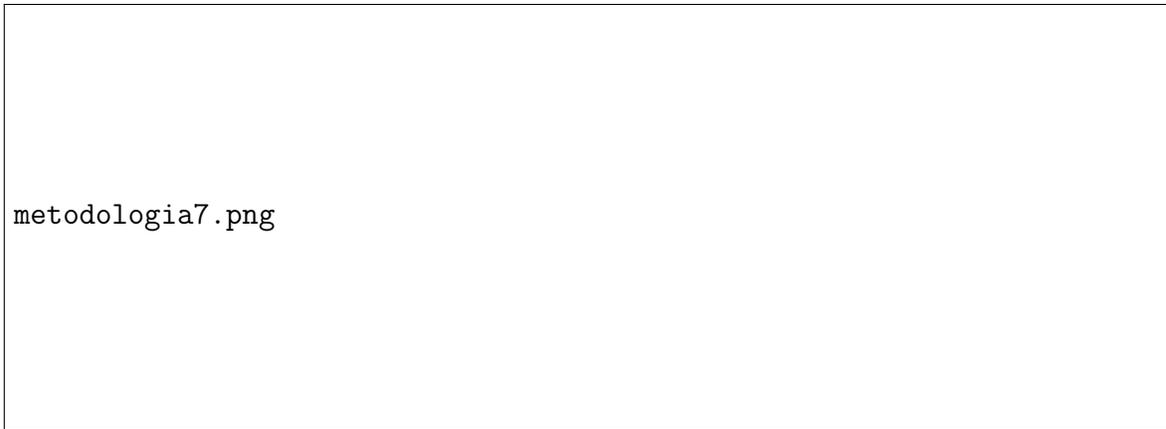


Figura 4.10: Diagrama de manchas extendido del primer modelo de diseño $f/3.2$ y 8 minutos de arco, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.

Los materiales de los vidrios ópticos comúnmente tienen una mayor eficiencia de transmisión en longitudes de onda mas cercanas al rojo en el espectro visible, se hizo la prueba con algunas simulaciones disminuyendo el rango espectral de optimización y la escala del diagrama de manchas se acercaba considerablemente a los valores deseados, por tanto se adoptó la metodología de acortar el rango espectral de optimización desde 450 hasta 800 nm para obtener el diseño y posteriormente correr el sistema en el azul y rojo, lo anterior para observar como se comportaba en frecuencias extremas, validando su capacidad de rango espectral de operación de esta manera.

Aplicando esta metodología se volvió a la configuración inicial del diseño pero el sistema aun necesitaba seguir optimizándose para lograr los objetivos del diseño, (ver figuras 4.11, 4.12 y 4.13).



metodologia7.png

Figura 4.11: Diagrama de rayos del segundo modelo de diseño $f/3.2$ y 8 minutos de arco con rango espectral reducido. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.

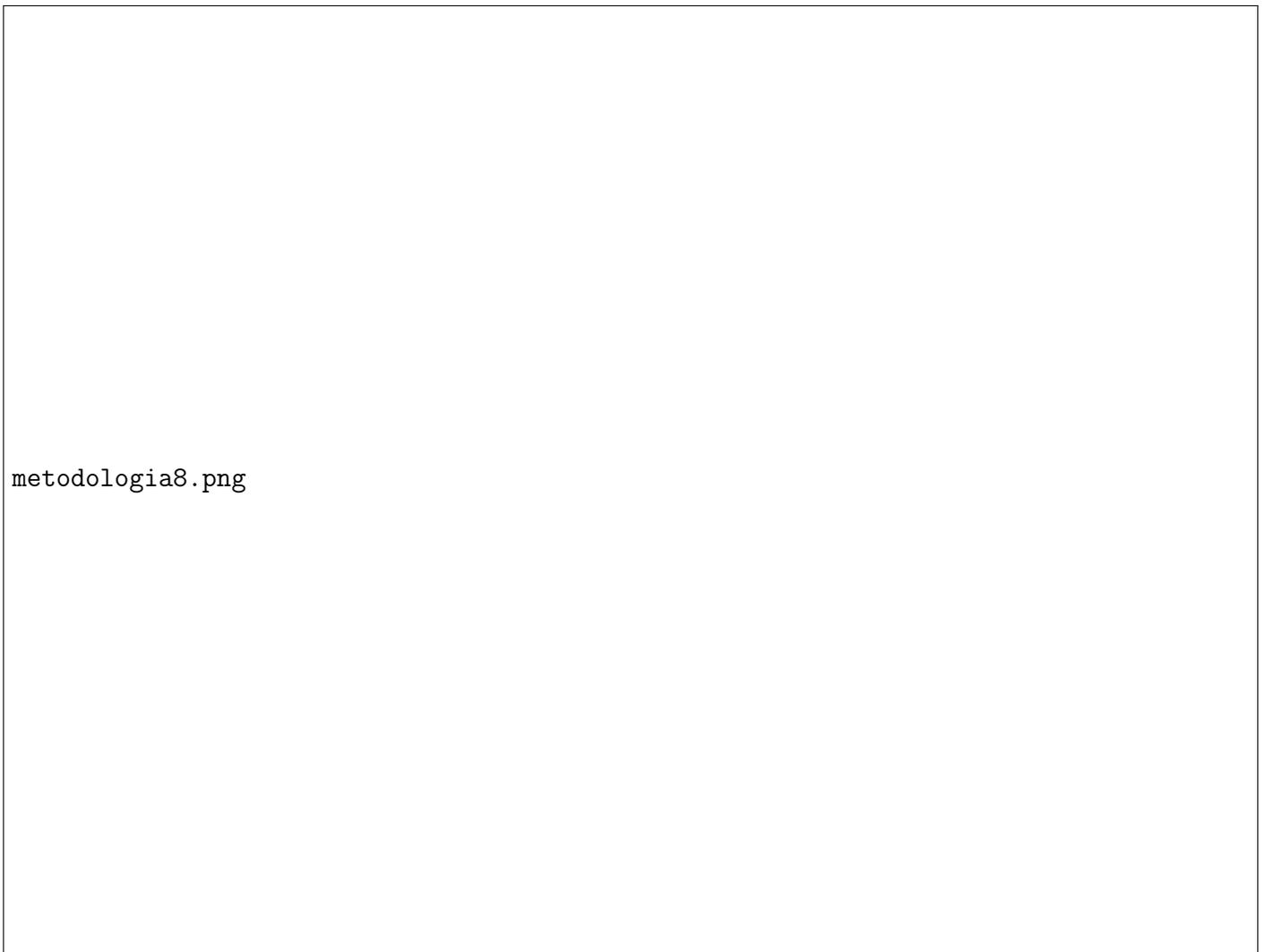


Figura 4.12: Diagrama de manchas estándar del segundo modelo de diseño $f/3.2$ y 8 minutos de arco con rango espectral reducido.

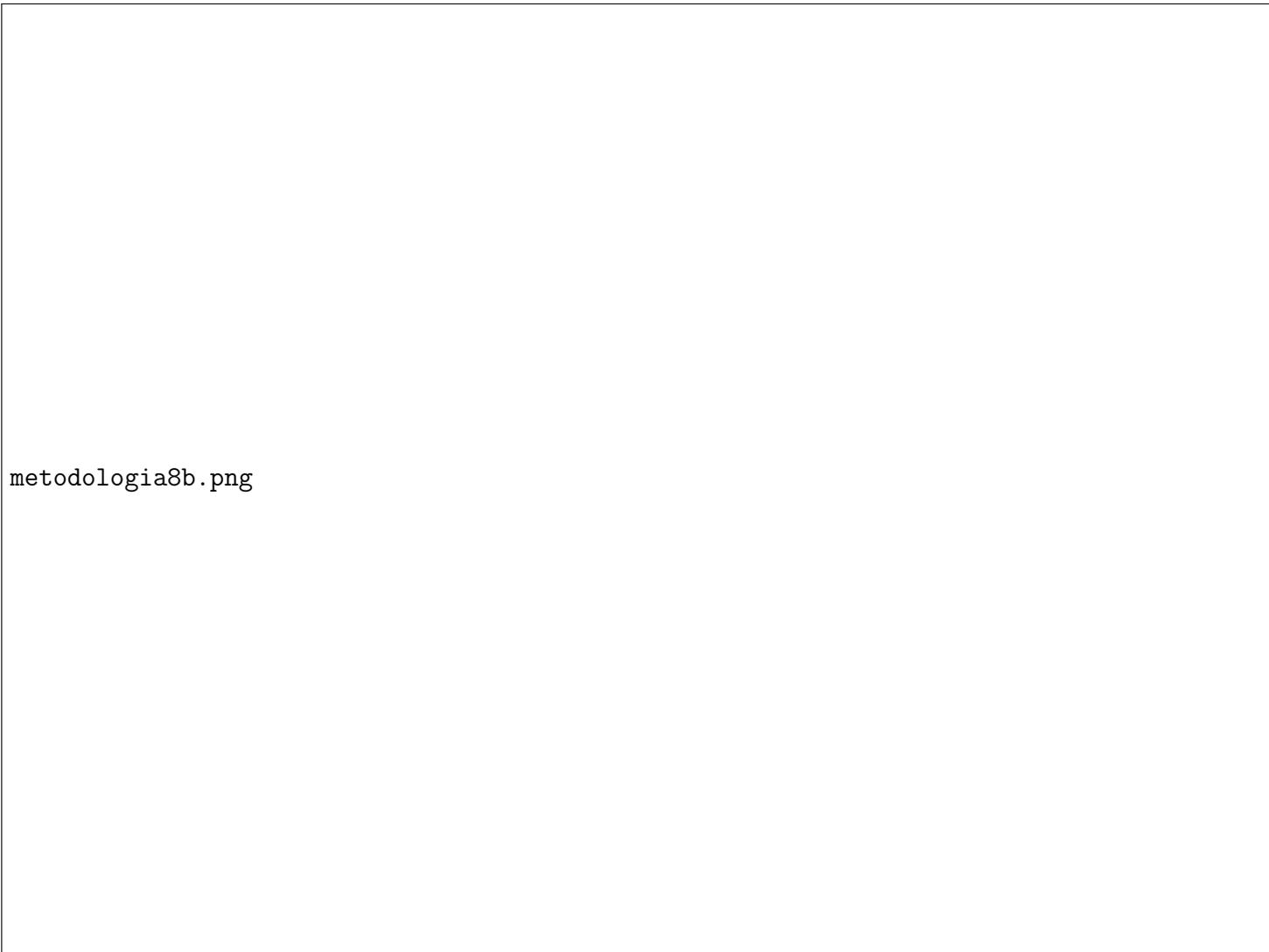


Figura 4.13: Diagrama de manchas extendido del segundo modelo de diseño $f/3.2$ y 8 minutos de arco, con rango espectral reducido y con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.

En la figura 4.13 del diagrama de rayos, se puede notar que el campo de observación introducido en los componentes no deja ningún espacio libre en algunos elementos para una sujeción mecánica, por lo que fue necesario reducir más el campo de observación del sistema en el límite inferior permitido de 6 minutos de arco, para este campo de visión la razón focal del sistema solo requiere ser de 5.1 para que el campo cubra por completo el detector.

No obstante la escala de placa resultante de este sistema sería de 0.250 segundos de arco por píxel con ese número f y parte de ese campo no caería dentro del mismo, por ello, se decidió obtener una razón focal suficiente para colocar este campo de visión de una forma circunscrita en el CCD ($f/3.6$), esto para tener la mayor escala de placa y poder de resolución del instrumento, de esta manera se aprovecha todo el campo que se introduzca en el reductor focal, pero las orillas del CCD quedaran sin recibir luz del reductor (ver figuras 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17).

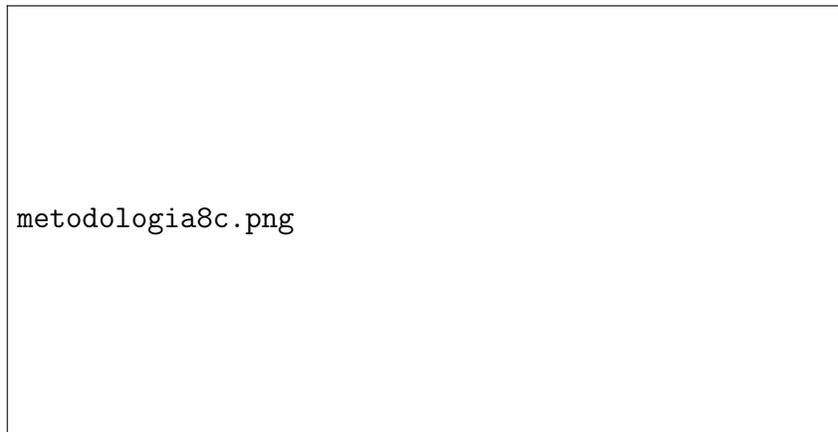


Figura 4.14: Ilustración que muestra como distinta razón focal coloca un mismo campo de visión en el plano imagen del detector.

Finalmente de esta manera se pudo establecer la razón focal y campo de visión final que tendría el sistema, pudiendo enfocarnos en la mejora del diseño de mejor manera al tener el modelo que sera el punto de partida para obtener el diseño final. El espacio en el plano imagen necesario para colocar el disco de seeing de 1 segundo de arco con esta razón focal es de $36.647 \mu\text{m}$, porque la escala de placa en el reductor a la salida es de 0.355 segundos de arco por píxel, aunque este tamaño de campo de visión y escala de placa si bien son parámetros alejados a los ideales, aún son aceptables para los intereses científicos del proyecto.

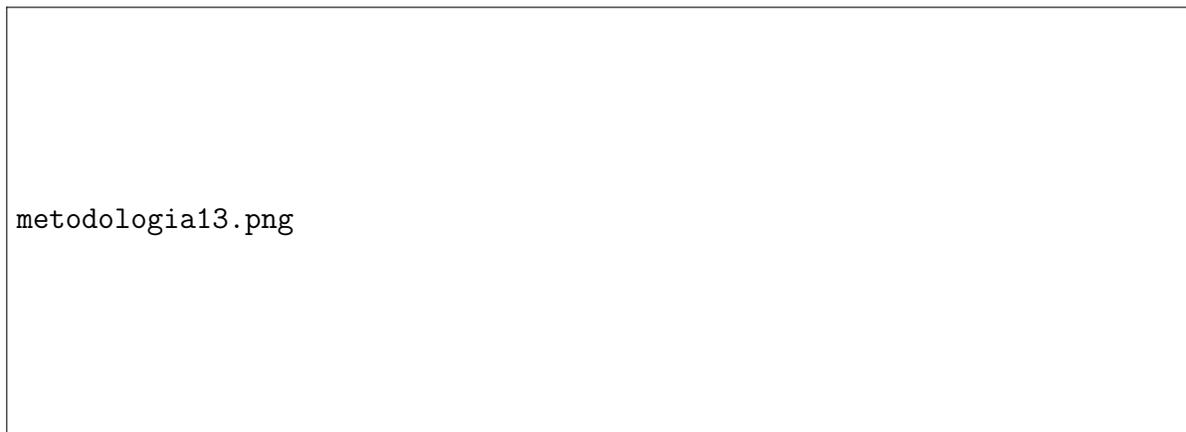


Figura 4.15: Diagrama de rayos del diseño inicial $f/3.6$ y 6 minutos de arco. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.

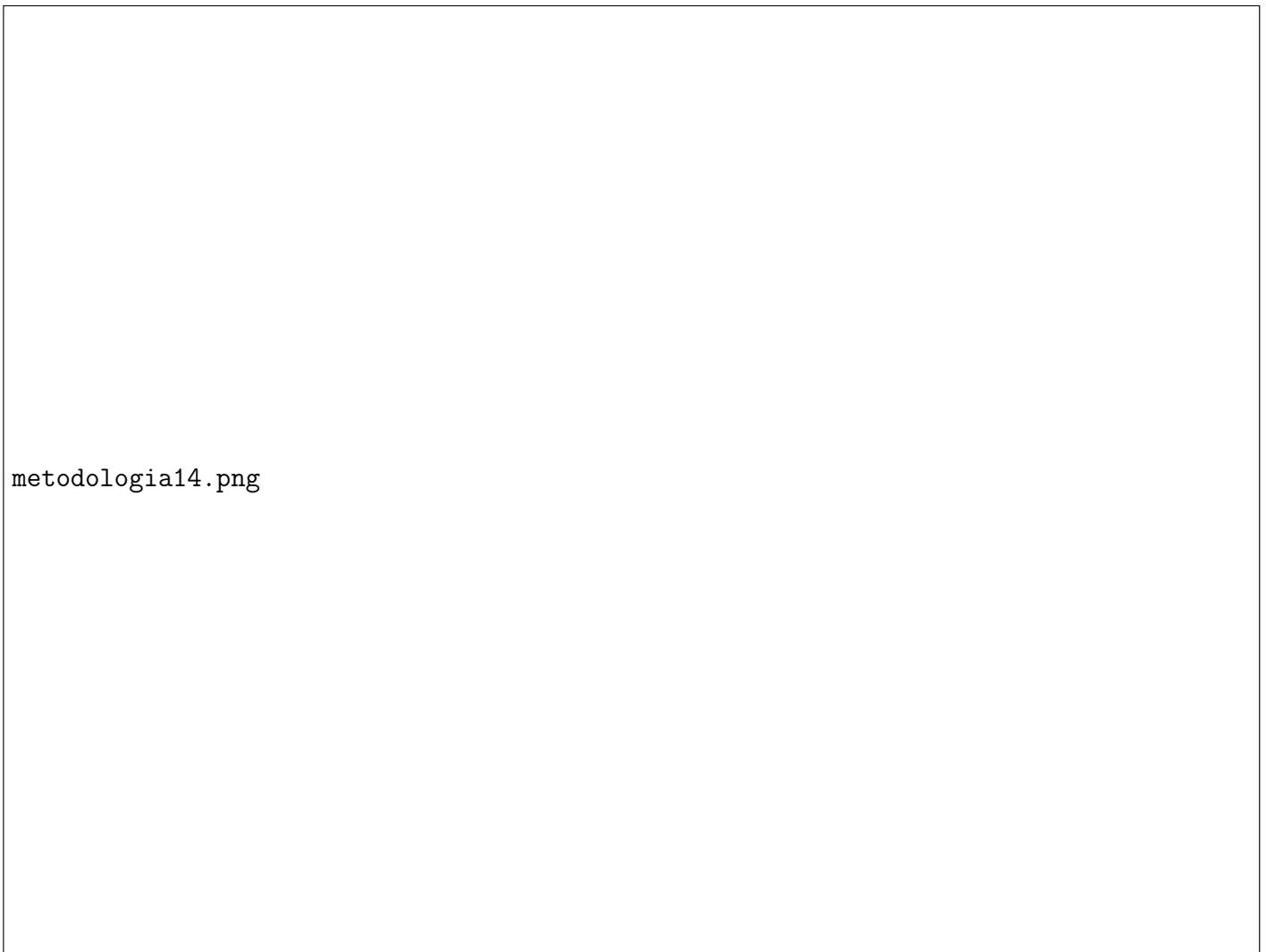
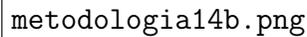


Figura 4.16: Diagrama de manchas estándar de diseño inicial f/3.6 y 6 minutos de arco.

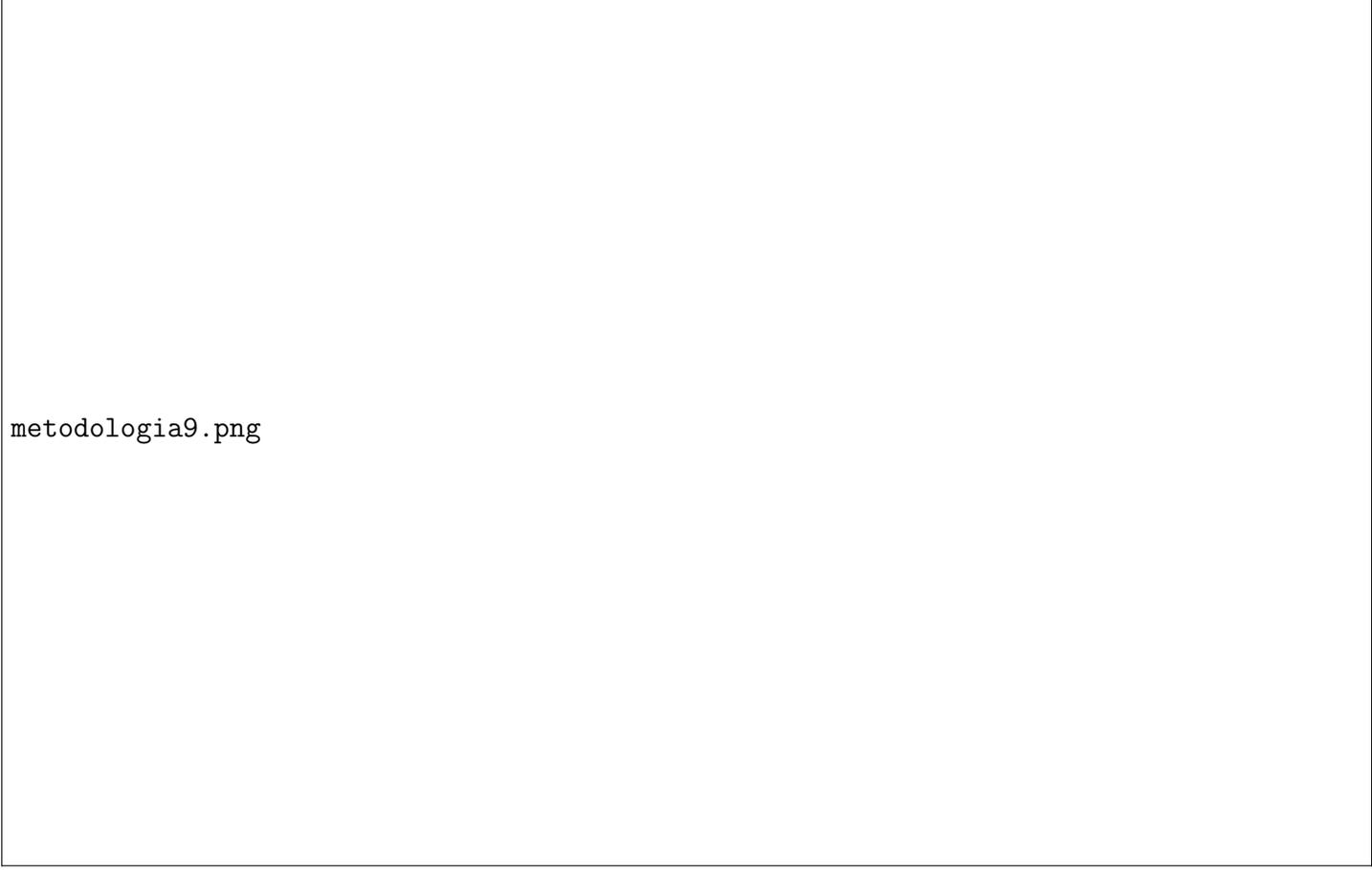


metodologia14b.png

Figura 4.17: Diagrama de manchas extendido de diseño inicial $f/3.6$ y 6 minutos de arco con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.

Aunque se podría pensar que el último modelo ya cumple con las características para su función, es preferible disminuir un poco el tamaño de las manchas para contar con un mejor margen de error, para que los defectos de alineación y fabricación que se presentaran no perjudiquen significativamente al sistema, puesto que algunas longitudes de onda están cerca de no cumplir con lo necesario en lo que respecta a capacidad de resolución, además de que es obvio que a frecuencias mas allá de este intervalo reducido el sistema tendrá un peor desempeño que en las frecuencias optimizadas.

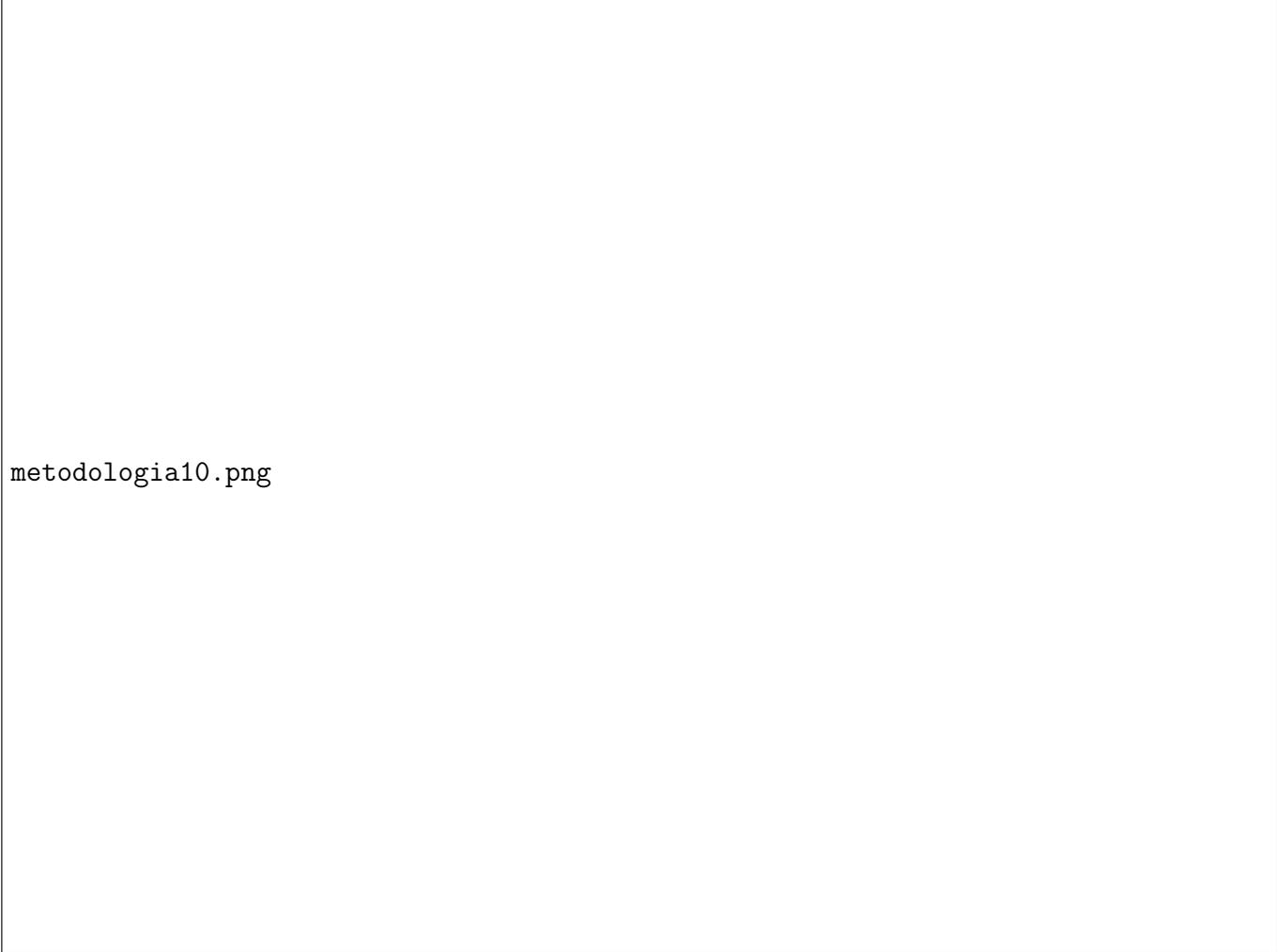
Para reducir el tamaño de las manchas del diagrama al valor deseado es necesario reducir aun mas las aberraciones del sistema, en la figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se logra observar cuales son las superficies que contribuyen en mayor medida a las aberraciones del mismo, analizando los coeficientes de Seidel de las aberraciones del modelo.



metodologia9.png

Figura 4.18: Coeficientes de Seidel del diseño inicial $f/3.6$ con 6 minutos de arco.

En la figura 4.18 se puede observar los coeficientes de seidel de cada superficie óptica del sistema, resaltando el mayor valor de estos en las superficies 10,11,12 y 13, que corresponden al lente que se encuentra en medio del triplete de la cámara.



metodologia10.png

Figura 4.19: Diagrama de Seidel del diseño inicial $f/3.6$ con 6 minutos de arco.

En la figura anterior se muestran los mismos coeficientes de Seidel vistos de una manera gráfica, este diagrama facilita observar estos coeficientes que a su vez pueden darnos una orientación para tomar decisiones en el proceso de diseño óptico.

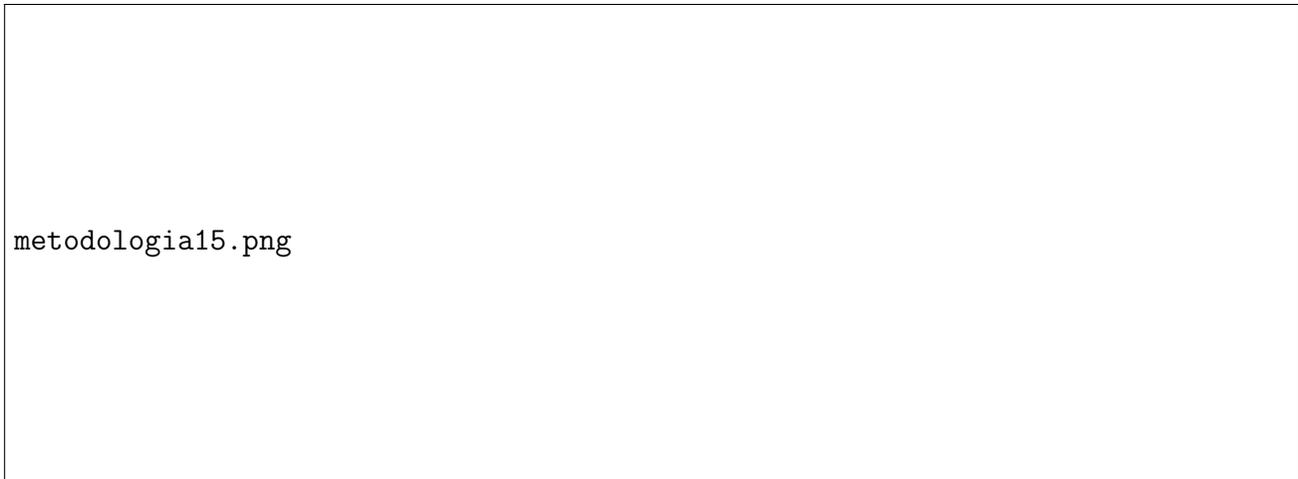
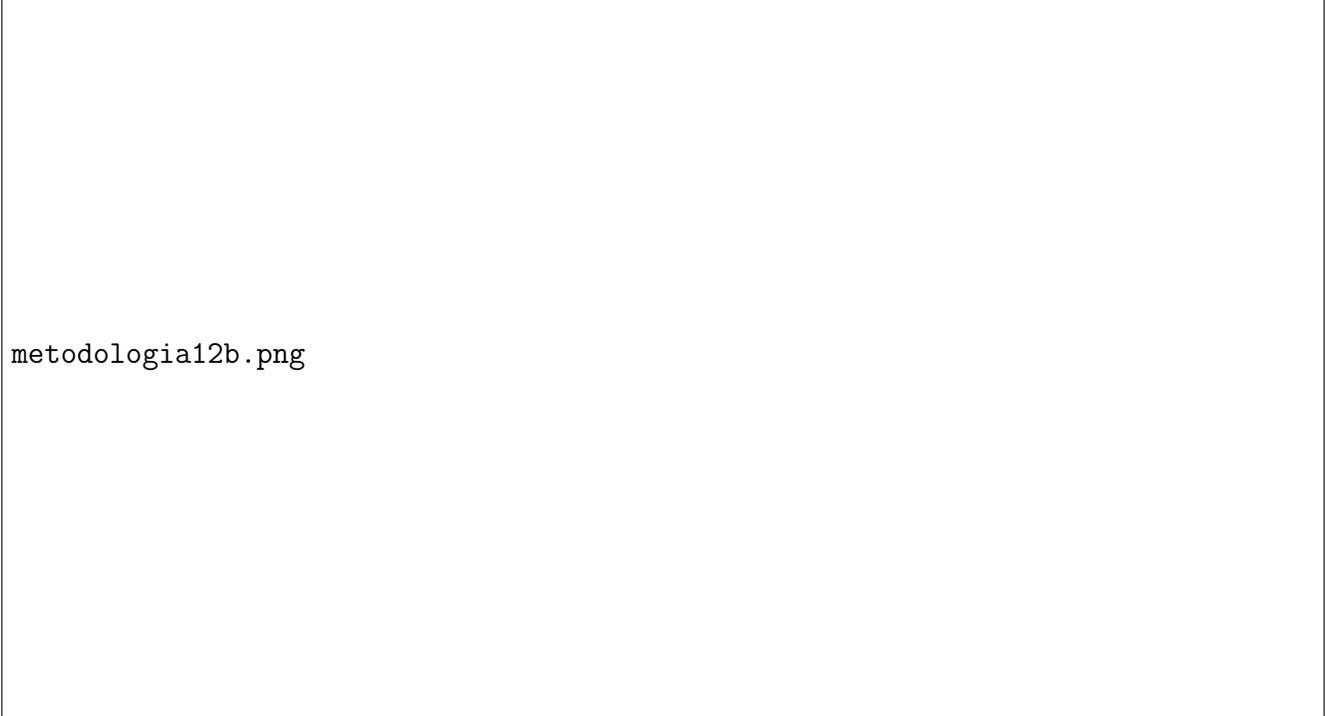


Figura 4.20: Superficies con mayor grado de aberración del diseño inicial $f/3.6$ con 6 minutos de arco.

En la figura 4.21 se pueden observar algunas técnicas para corregir aberraciones en superficies con un alto grado en ellas, como es fácil notar una de las formas más eficientes es el uso de superficies con constantes de conicidad, sin embargo, estas son muy difíciles de fabricar y validar en un taller de manufactura óptica, usando técnicas convencionales para el grado de precisión que se necesitaría, de modo que la otra opción más accesible es segmentando (separando) superficies, ya que el espacio de aire sobrante entre éstas desvía el rayo y agrega refracciones adicionales en su trayectoria sin utilizar más elementos ópticos.

Se puede observar en las gráficas de la figura 4.21 la aberración esférica longitudinal (gráficas de color rojo) y la aberración esférica transversal (gráficas de color verde) en función del tamaño de la apertura relativa de un sistema óptico ($f=100$ mm, apertura $f/5$) en una escala normalizada. Además de que en la zona de apertura se aprecia una aberración esférica residual. Sin embargo esto no es relevante para nuestro caso ya que para corregir este tipo de aberración es necesario tomar en cuenta aberraciones de orden superior y esta es una imagen utilizada para mostrar un ejemplo en el que el segmentar superficies puede ayudar a corregir algunas aberraciones de nuestro sistema.



metodologia12b.png

Figura 4.21: Comparación de mejora en el nivel de aberraciones con el uso de constantes de conicidad y de la segmentación de superficies de un doblete acromático[27].

Tanto las superficies 12 y 13 señaladas en la figura 4.20 como el doblete siguiente, tuvieron que ser segmentados para disminuir las aberraciones en el plano imagen del reductor, no obstante la distancia focal posterior era demasiado grande para la razón focal en la que se estaba optimizando el sistema, por lo que los resultados necesitados finalmente se obtuvieron cuando se acertó lo mas posible la distancia focal posterior del reductor focal.

Para entender esta última afirmación nos podemos apoyar de la relación paraxial que relaciona la apertura de un sistema óptico, el campo de visión y su distancia focal.

$$y = f \tan A$$
$$A = \arctan (y/f)$$

Donde y es la mitad de la altura o apertura del sistema, A el ángulo de la mitad del campo de visión entrante y f la distancia focal del sistema.

Esta relación paraxial limita la distancia focal, por tanto el número f que un sistema debe tener idealmente para cierta apertura y campo de visión. Además, también nos permite observar de una manera ilustrativa el por qué es necesario acercar el plano imagen para un sistema rápido con

aperturas pequeñas.

Para entender esto nos ayudaremos de la figura 4.22 b) donde la línea azul representa el plano imagen, como podemos ver el dibujo de la parte de arriba describe un sistema rápido con una apertura grande y cierta distancia focal posterior, en nuestro caso contamos con una apertura mas chica lo que obliga a nuestro sistema a volverse mas lento para seguir cumpliendo con esta relación como vemos en la figura de en medio.

Si acercamos el plano imagen podemos notar que se puede lograr un número f rápido, aunque lógicamente no introduce la misma cantidad de luz ni mantiene el alcance en campo de visión que tendría una apertura mayor por el tamaño pequeño de la pupila de entrada (Ver figura 4.22 a)), por lo que no precisamente el acercar el plano imagen nos permite tener mayor campo de visión, si no que es posible controlar de una mejor manera las aberraciones de sistemas rápidos con aperturas pequeñas que es nuestro caso.

Se pudo justificar este análisis gracias a los resultados obtenidos, porque las aberraciones se compensaron de mejor manera cuando se hizo esta modificación en la distancia focal posterior.



metodologia16.png

Figura 4.22: Ilustración de apoyo: a) Ilustración de como el tamaño de la pupila de entrada de un sistema limita el campo de visión que el mismo puede resolver; b) Ilustración de sistemas que cumplen la relación paraxial descrita anteriormente.

Con estas últimas técnicas utilizadas se logró una buena aproximación de diseño final, que sería evaluado en el análisis de tolerancias y ajustado para el diseño mecánico de su ensamble, en las figuras 4.23, 4.25 y 4.26 se muestran algunas características del modelo final que se obtuvo para el diseño.

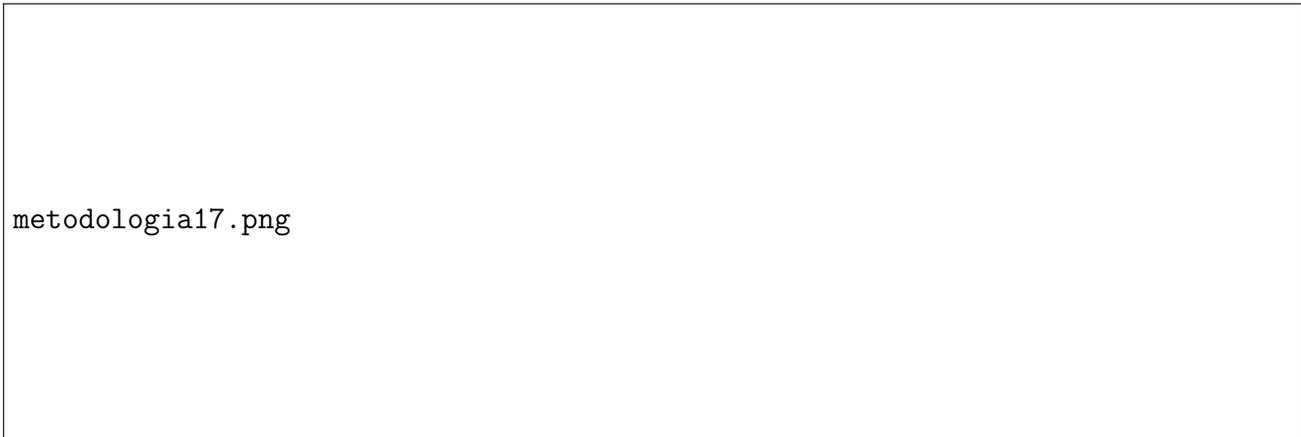


Figura 4.23: Diagrama de rayos del diseño final preliminar $f/3.6$ con 6 minutos de arco. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.

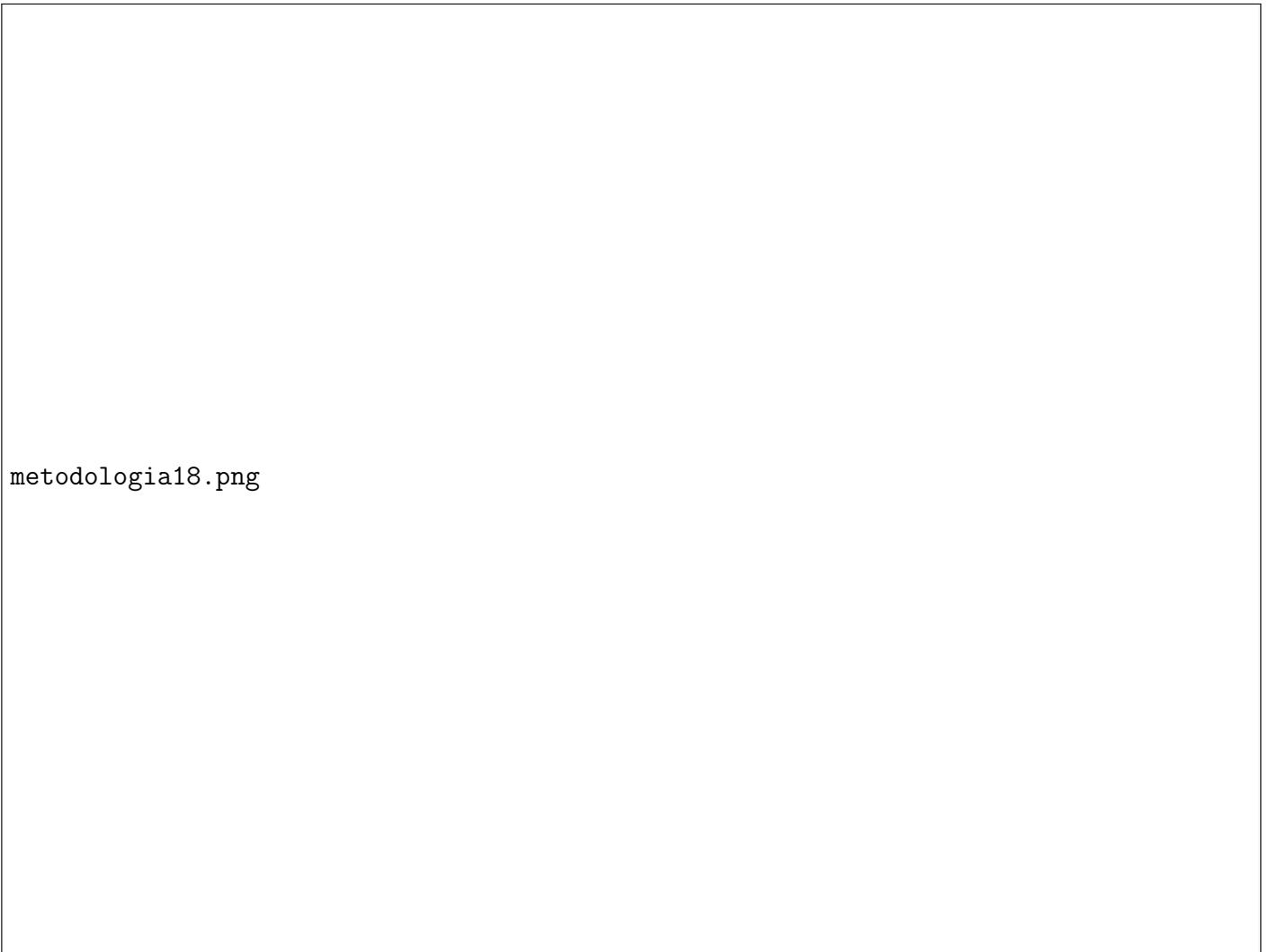


Figura 4.24: Diagrama de manchas estándar del diseño final preliminar $f/3.6$ con 6 minutos de arco.

En el diagrama de manchas anterior se puede observar que la escala del diagrama de manchas es óptima ya que la mancha está encerrada en un cuadrado de 13 micras por lado, que es el tamaño de un píxel de nuestro detector a utilizar.

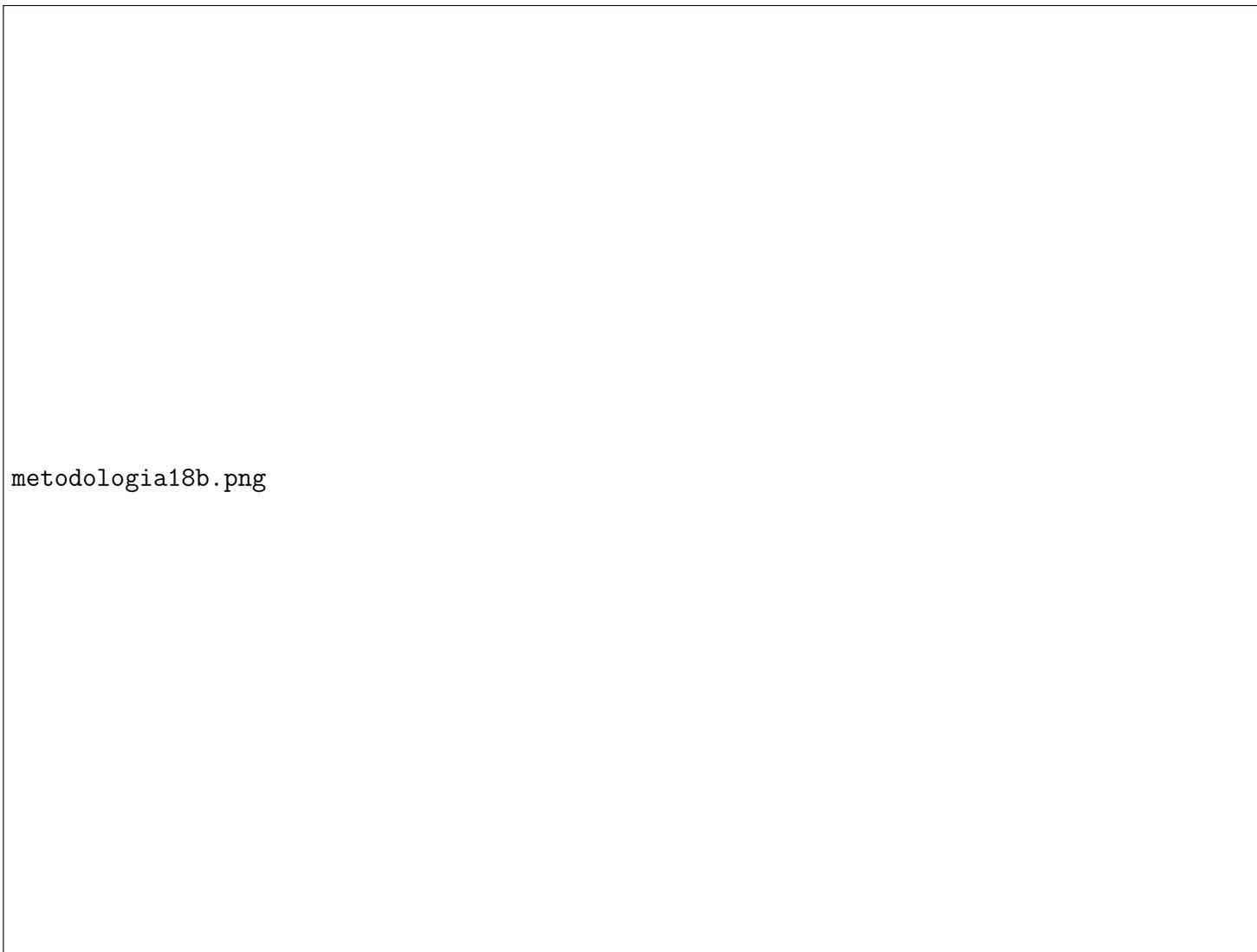


Figura 4.25: Diagrama de manchas extendido del diseño final preliminar $f/3.6$ con 6 minutos de arco, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.

En la figura anterior podemos observar el comportamiento de la mancha de manera independiente en cada longitud de onda, pudiendo observar que cumple con los criterios de calidad necesarios para su uso, ya que las manchas tienen un tamaño significativamente menor a un disco de seeing de 1.4 segundos de arco en nuestro plano imagen.



Figura 4.26: Diagrama de Seidel del diseño final a evaluar en el análisis tolerancias. Se puede observar la mejora en el coeficiente de Seidel para la aberración esférica del sistema debido a la segmentación de superficies.

La longitud de este último modelo preliminar de reductor focal medía aproximadamente 1.20 m, esta longitud vuelve complicada la implementación y operación en el telescopio a la hora de hacer observaciones, pero es consecuencia de la configuración colimador-cámara del sistema, por tanto se optó por colocar un espejo plano entre el colimador y la cámara para evitar estos problemas en una posición piloto, aunque la posición exacta sería definida a la par del diseño de la estructura mecánica para encontrar su mejor posición, de tal modo que el sistema soporte las flexiones y esté balanceado.



Figura 4.27: Diagrama de rayos del diseño final a evaluar en el análisis tolerancias con espejo inclinado 45 grados en posición piloto.

Se optó por colocar la rueda de filtros en el haz convergente entre el espejo primario del telescopio y su plano imagen, utilizando la estructura que se tenía para la cámara directa en una posición piloto, al igual que el espejo inclinado, esto porque la rueda de filtros es pesada y robusta lo que puede ocasionar complicaciones para su adaptación, sin mencionar que reduce considerablemente el costo del proyecto.

Si bien el colocar la rueda de filtros en esa posición desenfoca el plano imagen del telescopio cada vez que se cambie de filtro, estos desenfoques son mínimos (al rededor de una decena de micras) y pueden compensarse aprovechando la libertad de movimiento axial del espejo secundario del telescopio.

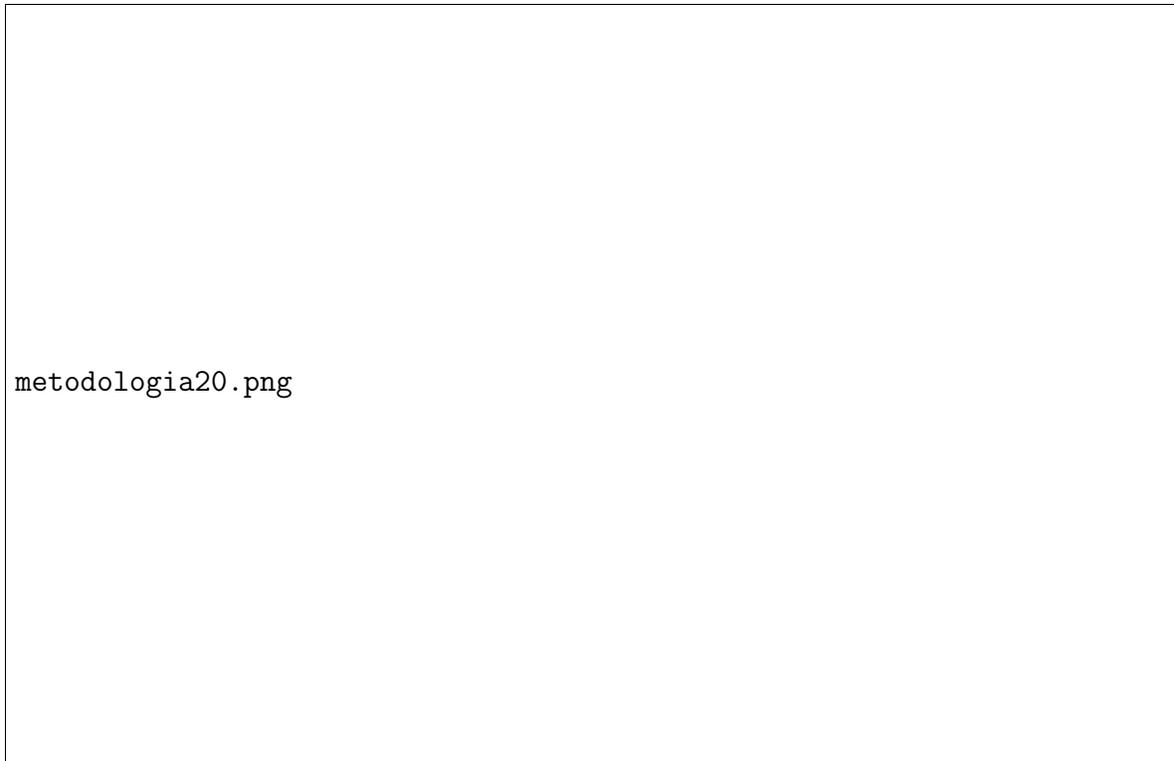


Figura 4.28: Diagrama de rayos del diseño final a evaluar en el análisis tolerancias con espejo inclinado 45 grados y filtro astronómico en posiciones piloto.

4.2. Análisis de tolerancias

4.2.1. Elección de parámetros y tolerancias máximas

Los parámetros para el análisis fueron escogidos en función de la posibilidad del programa de diseño óptico para incluirlos en la simulación, en la tabla 4.2 se pueden ver los parámetros a tomar en cuenta para el análisis con la tolerancia límite mas estricta establecida para éstos.

Parámetros	Tolerancia límite mas estricta establecida
Radio de curvatura	+/- 0.1 % del valor nominal
Espesor central	+/- 0.050 mm
Cuña de material	+/- 1 minuto de arco
Superficie descentrada	+/- 0.005 mm
Índice de refracción	+/- 0.0003
Número de abbe	+/- 0.5 %
Espaciamiento	+/- 0.050 mm
Centrado	+/- 0.050 mm
Inclinación	+/- 2 minutos de arco

Tabla 4.2: Tolerancias límite establecidas para los errores de manufactura y ensamble óptico del reductor focal.

Estos límites fueron establecidos durante el proceso del análisis de tolerancias discutiendo con el personal de los talleres de manufactura óptica y maquinado, para el caso único del índice de refracción y número de Abbe de los materiales ópticos, la tolerancia estaba definida por el fabricante de estos elementos (OHARA). Cualquier tolerancia más holgada en alguno de estos parámetros facilitaría la fabricación de la óptica e implementación del sistema optomecánico de ensamble.

4.2.2. Compensadores a utilizar

Como el espejo secundario tiene la posibilidad de ajustar su posición axial en pasos de hasta 10 micras, se decidió usarlo como compensador para corregir los errores de desenfoque que se pudieran presentar, ya que este movimiento genera los mismos resultados que si se moviera axialmente el plano imagen a la salida del reductor focal.

Para los errores simétricos o asimétricos se tenía contemplado utilizar algún elemento óptico como compensador si fuese necesario, agregándole grados de libertad de movimiento al mismo. Del diagrama de aberraciones de la figura 4.26 podemos notar cuáles son los elementos más sensibles a alguna mala alineación, ocasionados por el alto grado de aberración en comparación con los demás elementos, en este caso son los primeros 4 elementos de la cámara.

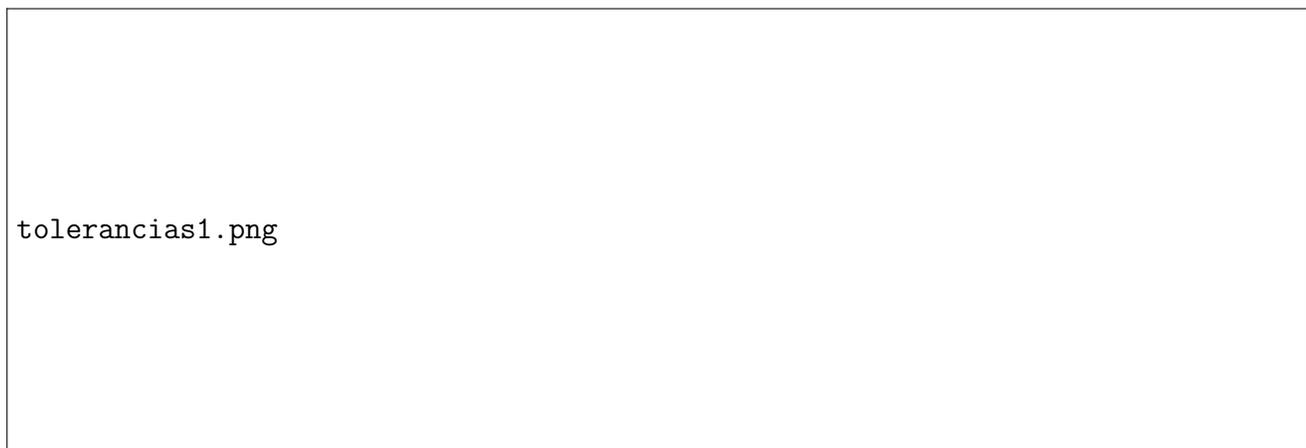


Figura 4.29: Elementos más críticos en su alineación porque sus superficies generan las mayores aberraciones dentro del sistema óptico.

Es evidente que si se utilizan todos estos elementos como compensadores agregándoles algún grado de libertad, el sistema podría corregir todos los defectos de manera idónea, pero para no complicar la mecánica de ensamble ni hacer imprácticas las primeras pruebas con el telescopio al ajustar estos elementos, se optó por escoger el mejor compensador comparando los resultados en las simulaciones.

Para este análisis se intercalaron los distintos componentes y grados de libertad en ellos, aunque se tenía claro el intentar no utilizar movimientos de rotación porque los sistemas mecánicos para este tipo de ajustes son complicados y voluminosos.

4.2.3. Resultados del análisis de sensibilidad y simulación Montecarlo

Para el análisis de tolerancias se escogió el valor de la figura de mérito que representa el radio rms del tamaño del diagrama de manchas, se utilizó como parámetro para evaluar la degradación de la calidad de imagen del sistema.

Se hicieron un total de 500 iteraciones por simulación para tener una buena cantidad de muestras y no necesitar demasiado tiempo para que el programa de diseño ejecutara el análisis. Se utilizó el modelo que contenía el espejo inclinado a 45 grados y la rueda de filtros en posiciones piloto, estas posiciones podrían cambiar un poco durante el diseño optomecánico del ensamble, pero aun si cambiaran conservarían la misma tolerancia encontrada, puesto que tanto la rueda de filtros como el espejo contienen superficies planas.

El elemento que mostró mejores resultados en las simulaciones actuando como compensador fue el doblote de la cámara al agregarle un movimiento lateral. Este compensador sumado al movimiento axial del espejo secundario del telescopio compensa de buena manera los errores de manufactura óptica y ensamble mecánico con las tolerancias propuestas.

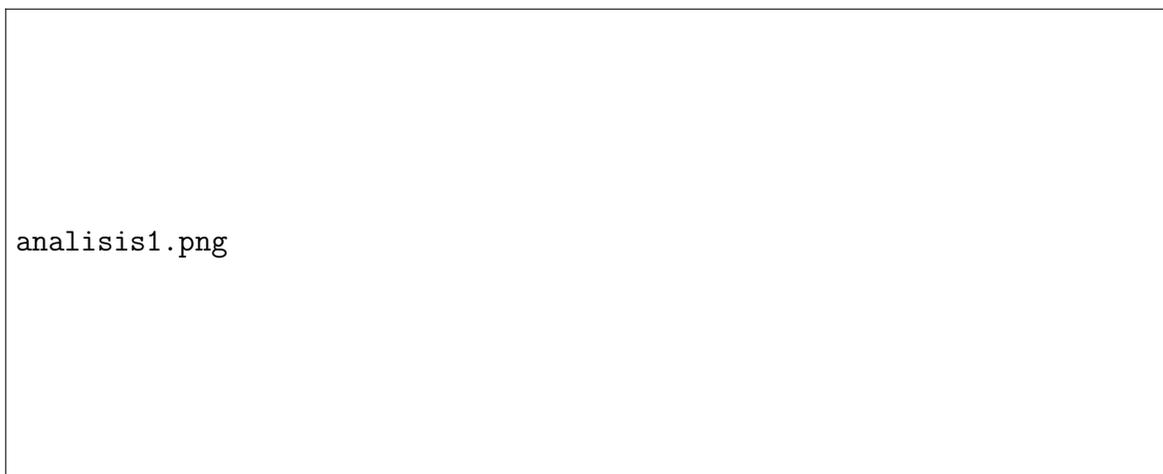


Figura 4.30: Movimientos utilizados en los elementos para compensar los errores de manufactura óptica y ensamble mecánico.

En los resultados del análisis de sensibilidad donde se muestran los parámetros que mas contribuyen a la degradación de la figura de mérito (ver figura 4.31), podemos observar que los que contribuyen en mayor medida a ésta afectan en casi la misma proporción que la tolerancia de número de Abbe en los materiales ópticos de algunos componentes, es posible afirmar entonces que no hay necesidad de ajustar algún parámetro de fabricación o alineación del sistema, puesto que hacerlo no mejorará significativamente el nivel de la degradación total del mismo, porque se seguirá manteniendo a causa de una tolerancia que no es posible de ajustar, sin mencionar que es preferible manejar las tolerancias mas holgadas posibles en cualquier parámetro posible.

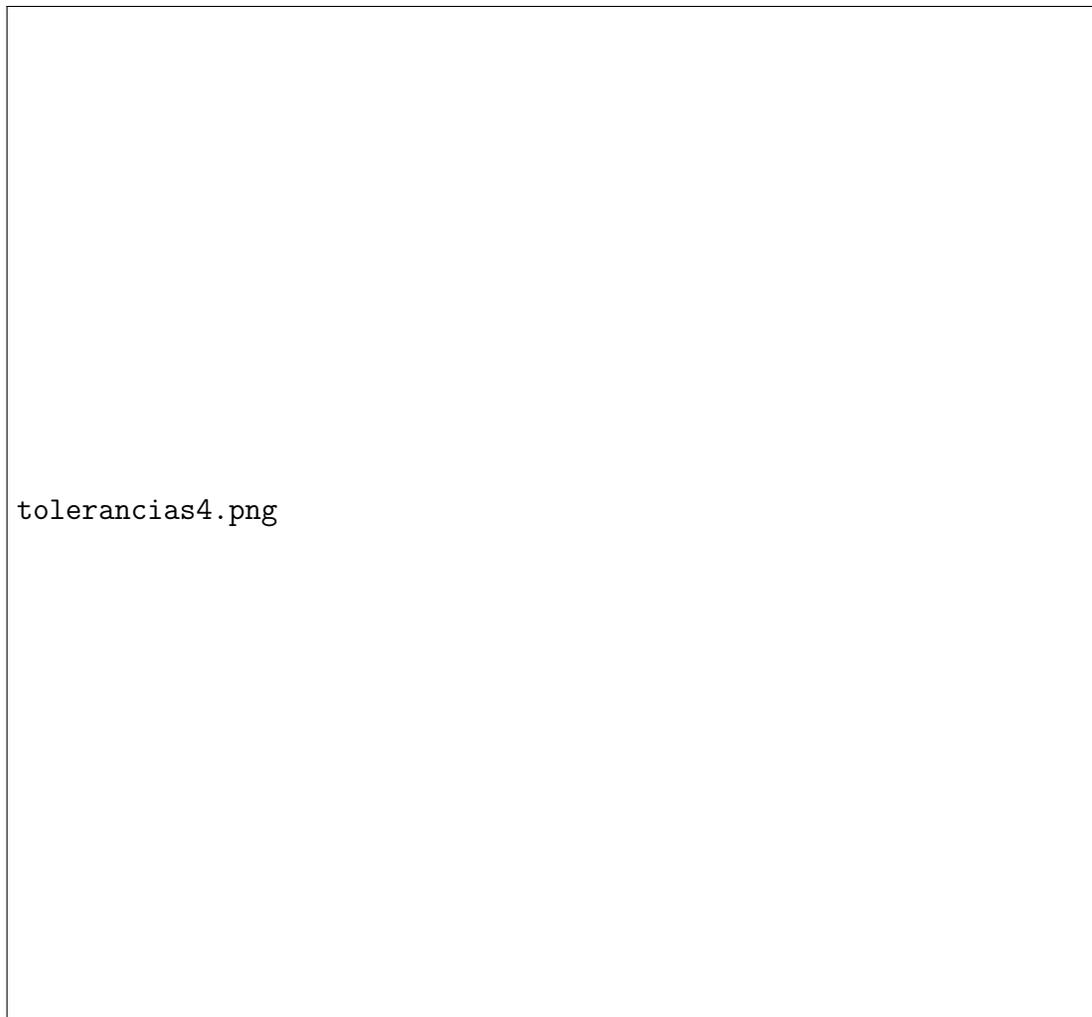


Figura 4.31: Resultados del análisis de sensibilidad con los 14 parámetros del sistema que mayor aportación provocan a la degradación de la calidad del mismo donde se muestra el parámetro analizado, la superficie donde se encuentra cada parámetro, el valor de la tolerancia máxima de cada parámetro, el valor degradado de la figura de mérito utilizado como criterio para hacer el análisis (radio RMS de la mancha [mm]) y el cambio del valor original de esta función

En la figura 4.32 se muestra la estadística de los resultados del valor RMS del radio de las manchas en la simulación Montecarlo, en la que se puede visualizar el peor, el mejor y la media de las iteraciones de la simulación, así como el valor de la desviación estándar de la distribución normal de la estadística y los movimientos hechos por los compensadores.

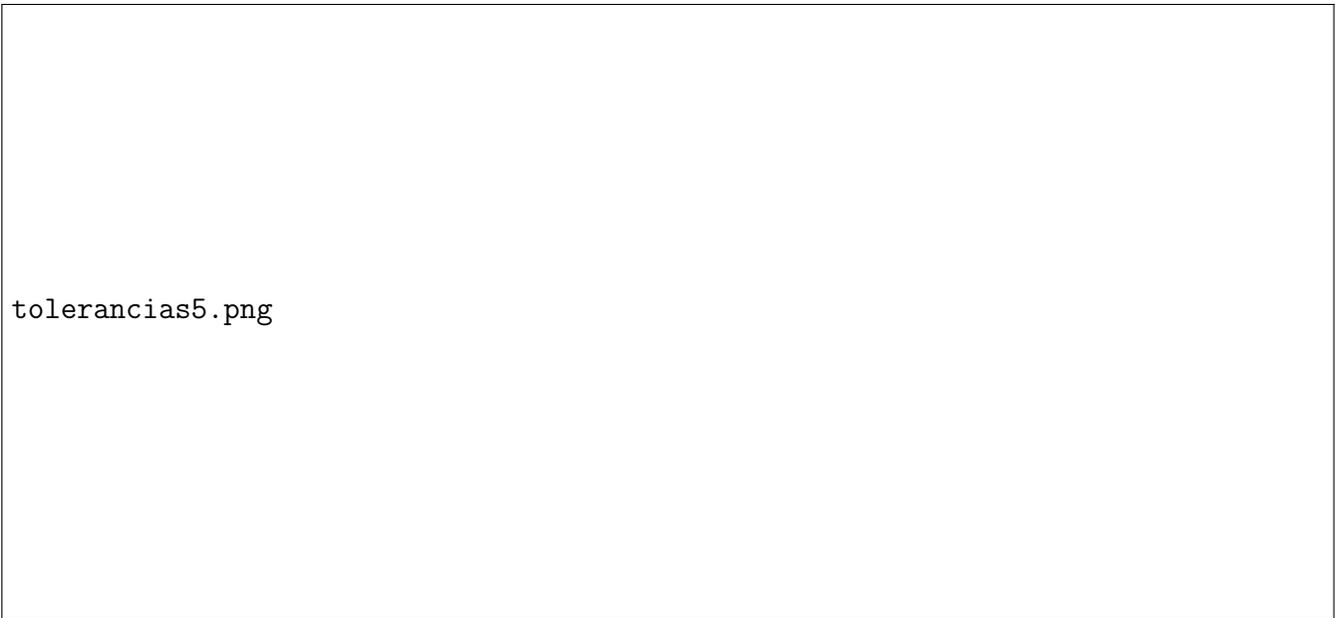


Figura 4.32: Resultados de la estadística de la simulación Montecarlo del análisis de tolerancias [mm].

En las figuras 4.33, 4.34, 4.35 y 4.36 podemos ver los diagramas de manchas para los casos del valor medio al que tendía la figura de mérito en las simulaciones y el valor de ésta a una separación de 3 sigmas de esta media en la estadística, además, se muestran los diagramas de manchas del sistema en frecuencias corridas hacia los extremos del rango espectral optimizado.

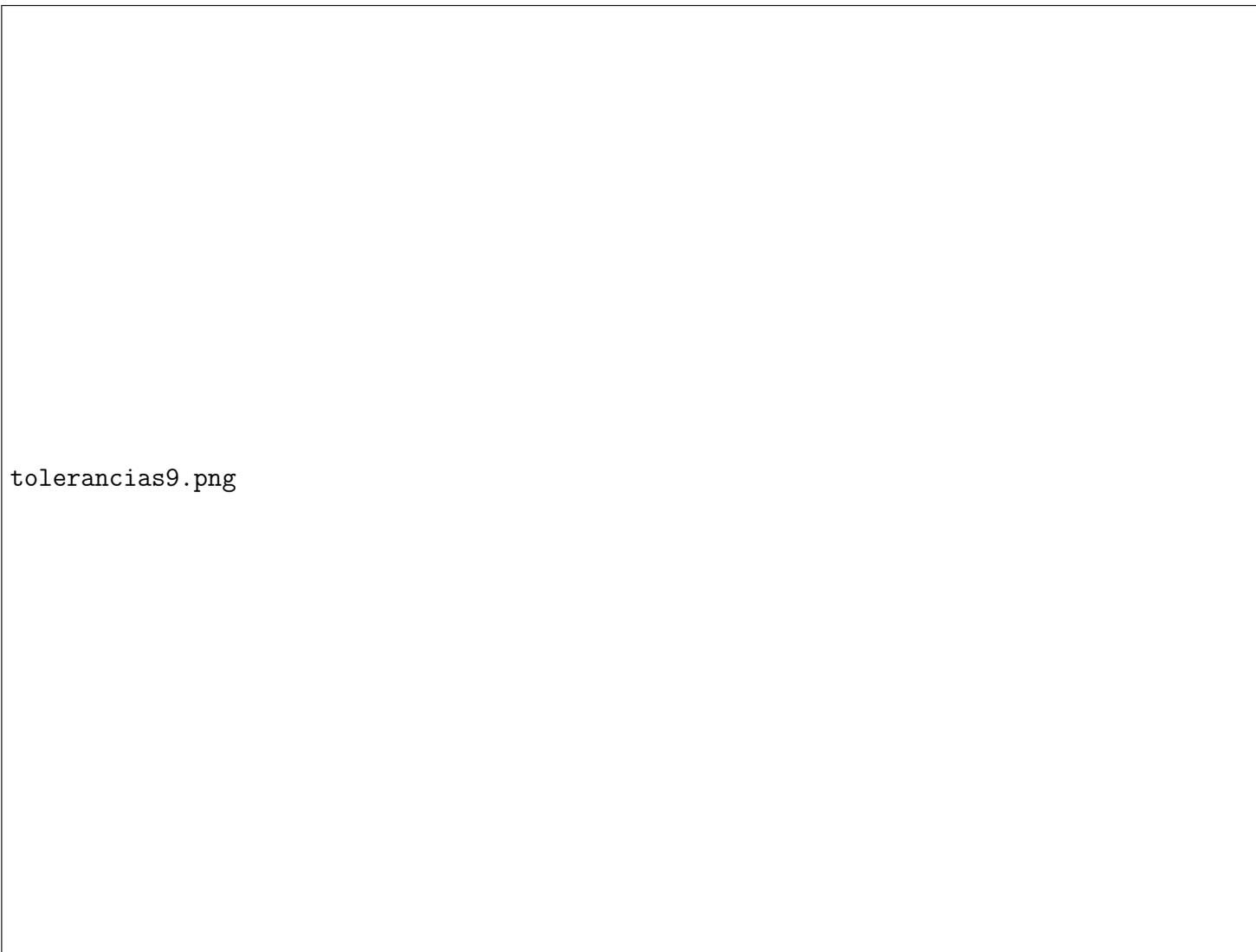


Figura 4.33: Diagrama de manchas extendido del archivo con el valor promedio de la figura de mérito en los resultados de la simulación Montecarlo, con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama.

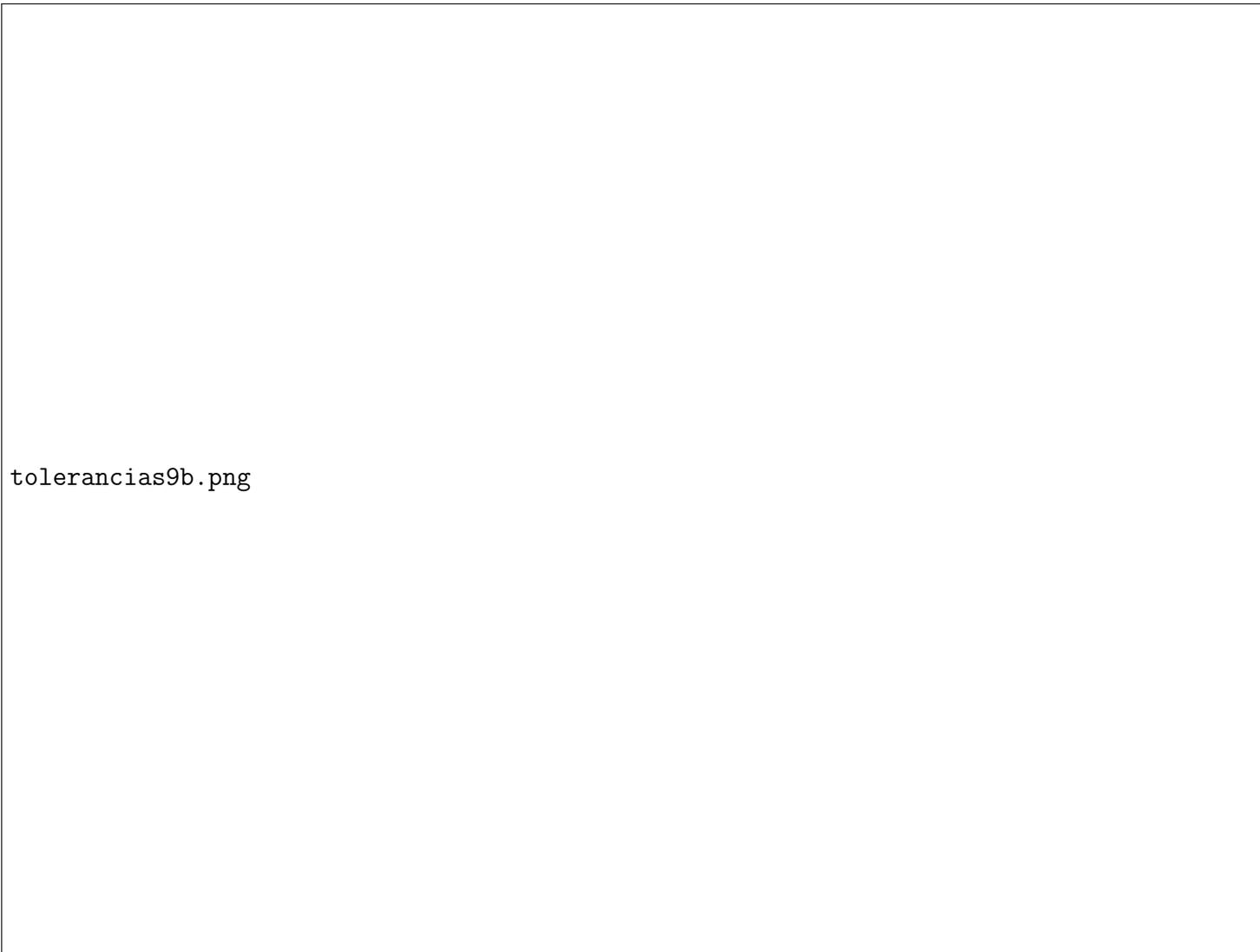


Figura 4.34: Diagrama de manchas extendido con frecuencias corridas hacia los extremos del rango espectral optimizado, del archivo con el valor promedio de la figura de mérito en los resultados de la simulación Montecarlo, con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama.

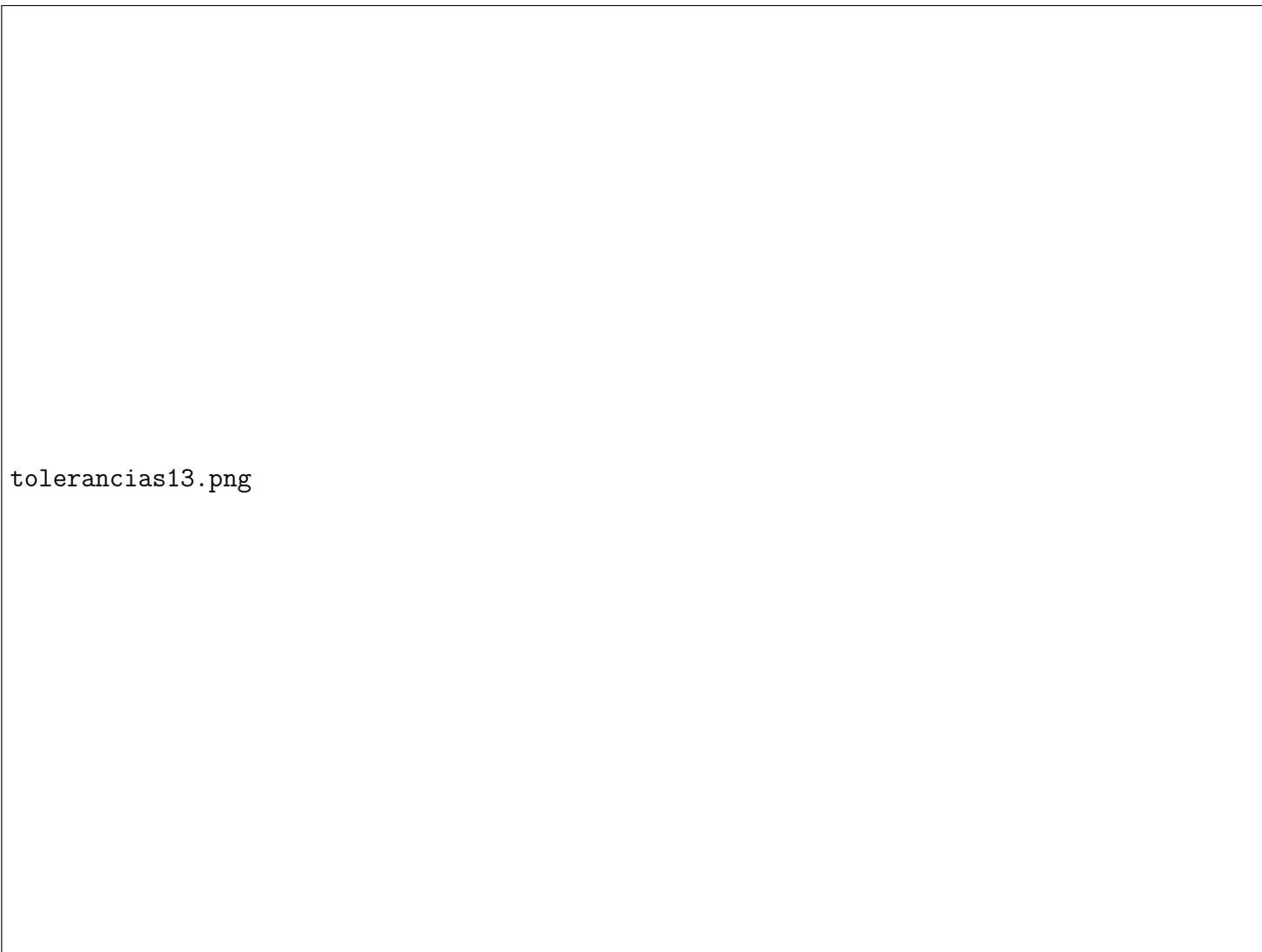
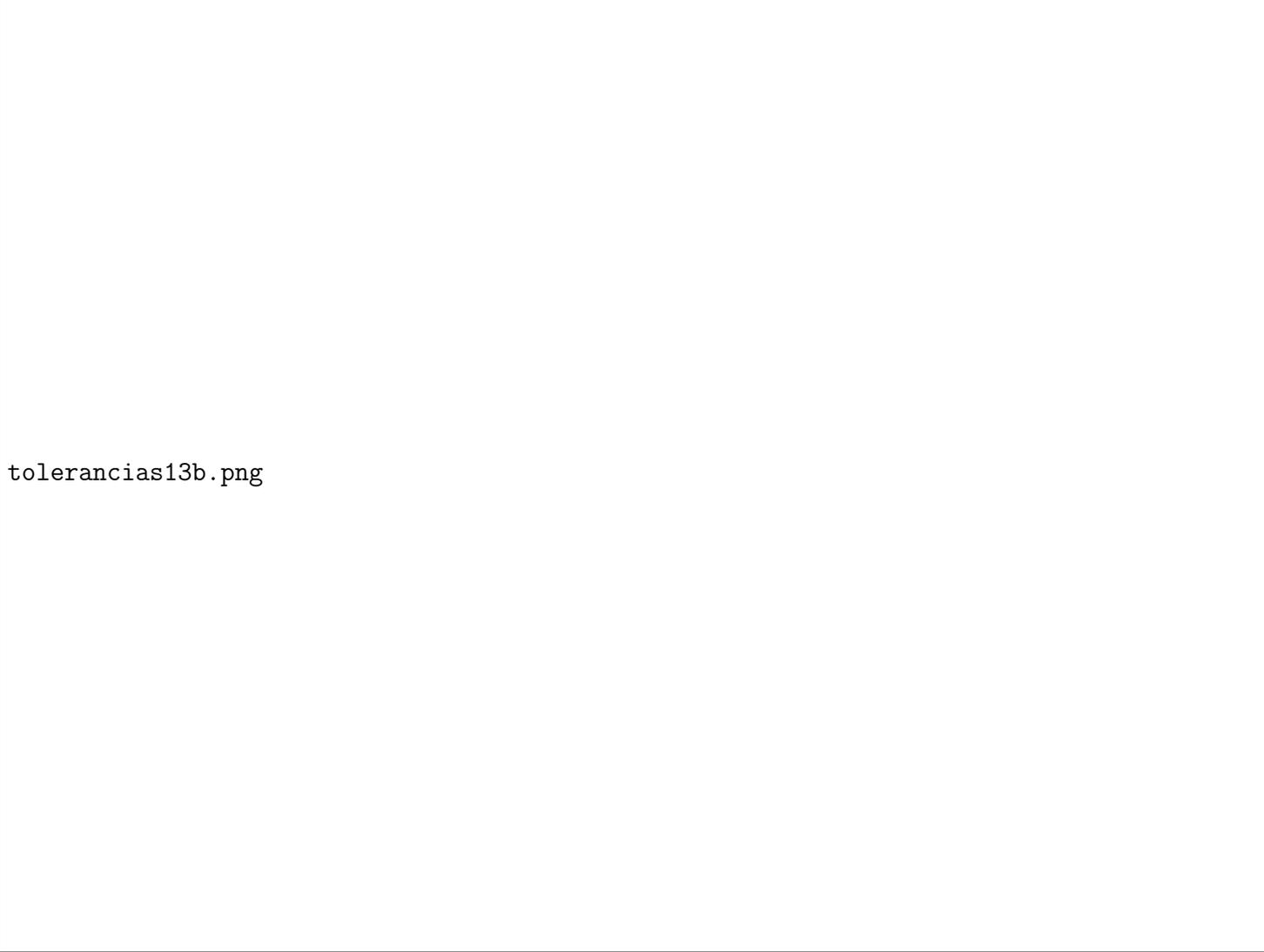


Figura 4.35: Diagrama de manchas extendido del archivo con un valor de 3 sigmas alejado del valor promedio en la distribución estadística de la figura de mérito, en los resultados de la simulación Montecarlo, con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama.



tolerancias13b.png

Figura 4.36: Diagrama de manchas extendido con frecuencias corridas hacia los extremos del rango espectral optimizado, del archivo con un valor de 3 sigmas alejado del valor promedio en la distribución estadística de la figura de mérito en los resultados de la simulación Montecarlo, con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama.

Como información adicional se muestra el diagrama de manchas del archivo con el peor resultado de la figura de mérito en la simulación Montecarlo, éste contiene los errores que se etiquetaron como desconocidos porque no son posibles de conocer durante la fabricación y ensamble del sistema.

Estos errores son causados por la incertidumbre de los instrumentos de medición, en estos se incluye el error de medición del interferómetro usado para medir el radio de curvatura (± 10 micras), el error del instrumento que obtiene la medida del espesor (± 10 micras), el error del palpador mecánico usado para medir la cuña de material (± 1 micra), el error de posición en x,y,z de los componentes ocasionado por la incertidumbre en la medición de la mecánica (propuesta como \pm

10 micras) y la incertidumbre en la medición de planicidad en el asiento del lente que ocasiona el error de inclinación (propuesta como ± 1 micra).

Como se puede apreciar en la figura 4.37 la degradación del sistema ocasionada por los errores desconocidos es insignificante y debido a que actúan como errores no correlacionados en la distribución de probabilidad, al ser muy pequeños sumándose cuadráticamente no afectan significativamente el error total.

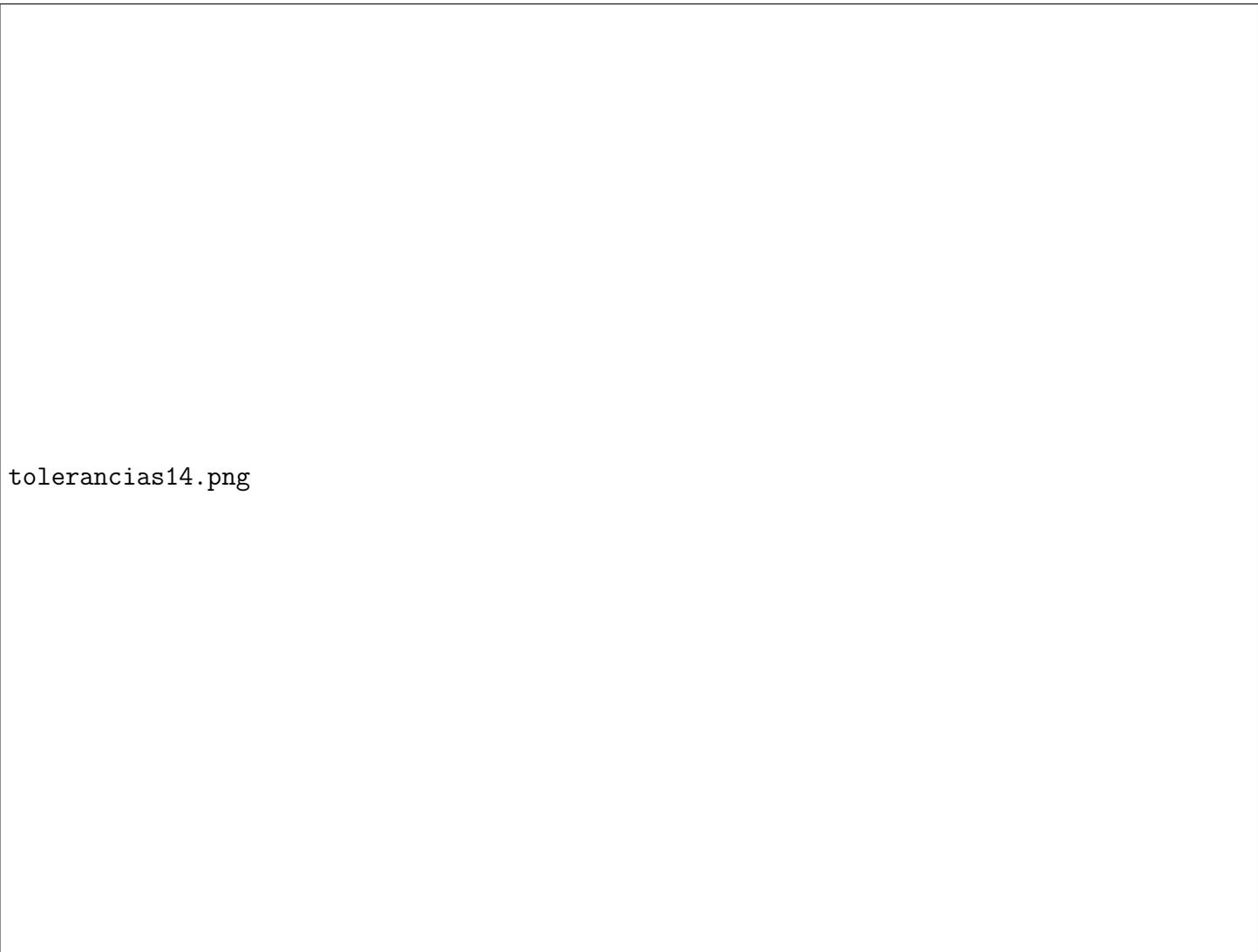


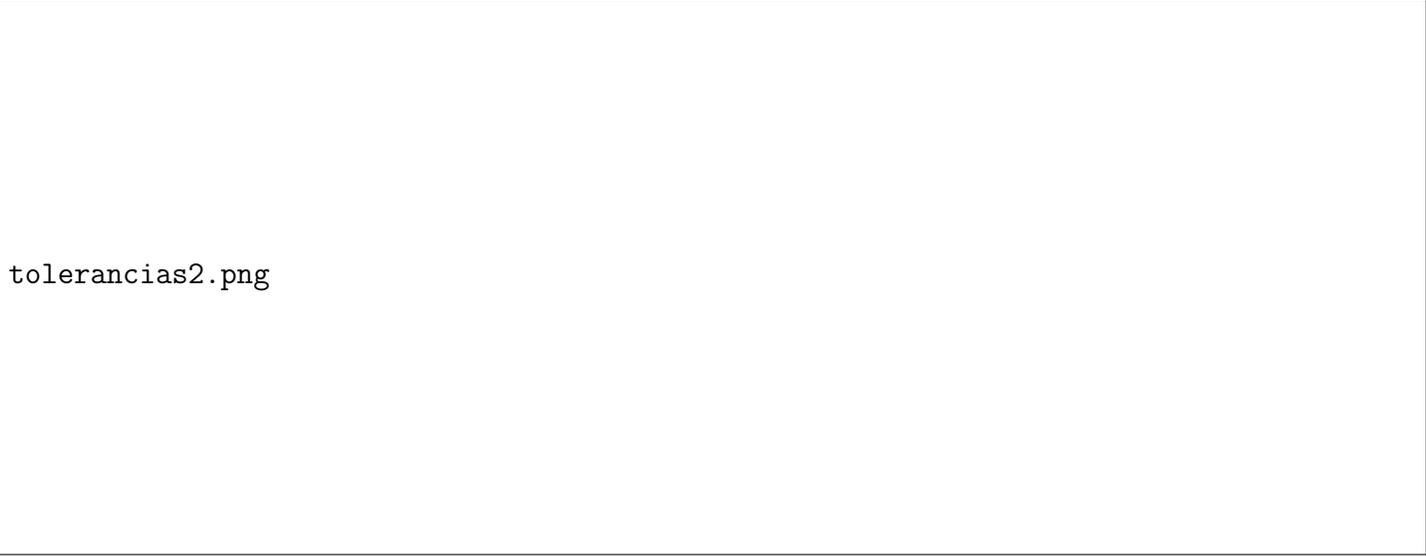
Figura 4.37: Diagrama de manchas extendido del archivo con el peor valor de la figura de mérito en la simulación Montecarlo de los errores desconocidos, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.

Finalmente solo se hicieron algunos ajustes mínimos en el diseño para facilitar su ensamble cambiando solo algunos detalles técnicos, como las dimensiones de los biseles de las superficies cóncavas, entre otros.

4.2.4. Tolerancias de manufactura óptica y ensamble mecánico establecidas para el diseño

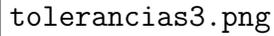
Las tolerancias finalmente definidas para la manufactura y ensamble de los elementos del sistema están expuestas en las figuras 4.38 y 4.39 respectivamente, podemos notar que la mayoría no son tolerancias demasiado estrictas, de tal manera que el sistema se puede implementar, los elementos que presentan mas sensibilidad fueron los componentes de la cámara, ya que requerían que su error de centrado individual en el ensamble no fuera mayor a ± 50 micras y aunque es una tolerancia de precisión es alcanzable. Los únicos elementos que necesitaron un parámetro de manufactura con una tolerancia de alta precisión de 10 micras en su diámetro fueron los del doblete de la cámara, siendo escogida así para que estos tuvieran un mínimo error de centrado al cementarlos.

Aunque para alcanzar esta tolerancia se tiene que tener especial cuidado en su fabricación se puede lograr y fue necesaria, porque el cemento típico que probablemente se utilizará para pegar el doblete tiene un índice de refracción propio (1.56), este índice de refracción difiere de ambos vidrios y al simular con valores mas holgados en la unión del doblete se disminuía considerablemente la calidad de imagen.



tolerancias2.png

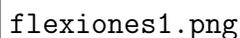
Figura 4.38: Tolerancias de manufactura del diseño óptico final.



tolerancias3.png

Figura 4.39: Tolerancias de ensamble del diseño óptico final.

Cabe mencionar que las tolerancias de ensamble mostradas en la figura 4.39 son individuales para cada elemento, tomando como referencia el eje óptico, si los componentes del objetivo de cámara se encuentran centrados con su respectiva tolerancia en un barril mecánico, la tolerancia de centrado de este conjunto para el acople con el resto del sistema es idéntica a la del colimador. Además, por cuestión de las flexiones que se pudiesen presentar en el sistema montado en el telescopio, se estableció una tolerancia de inclinación de todo el sistema de 2 minutos de arco respecto al sistema guiador del telescopio y una inclinación máxima de solo el barril de la cámara de 1 minuto de arco.



flexiones1.png

Figura 4.40: Ilustración de las posibles flexiones mas relevantes en el sistema. La figura de la izquierda muestra la dirección de las posibles flexiones que tendrá el ensamble como conjunto y la de la derecha las flexiones que se presentaran en esa parte del ensamble que contendrá los elementos de la cámara.

Elemento flexionado	Inclinación máxima permitida
Sistema completo	2 minutos de arco
Barril de la cámara	1 minuto de arco

Tabla 4.3: Tolerancias de flexiones en la estructura.

Nota: es necesario mencionar que estos valores en inclinación y centrado dichos en este párrafo anterior, fueron incluidos estando presentes en las simulaciones hechas en el análisis de tolerancias mostradas en esta tesis.

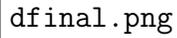
4.3. Características del diseño óptico final

El diseño finalmente definido es un sistema que convierte al telescopio de OAGH de un sistema $f/12$ a $f/3.6$, las ampliaciones de la óptica del reductor modifican la escala de placa a 0.355 segundos de arco por píxel, permitiendo colocar un seeing de hasta 1.4 arco segundos en una matriz de 4X4 píxeles y cubrir un campo de visión de 6 minutos de arco.

Parámetros	Especificaciones
Razón focal de OAGH	12
Escala de placa OAGH	8.185 arcsec/mm
Razón focal con reductor	3.6
Escala de placa con reductor	0.355 arcsec/pix
Tamaño de píxel del CCD	13 μm
Píxeles activos en el CCD	1024 x 1024
Campo de visión en el CCD	6 minutos de arco

Tabla 4.4: Especificaciones del telescopio de 2.1 m del OAGH y del reductor focal.

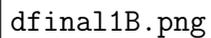
El diseño consta de un colimador formado por un doblete cementado seguido de una cámara compuesta por 6 lentes. Por la posición definida para colocar los filtros se tiene la ventaja de limitar la entrada de luz parásita, porque la estructura que los sujeta actúa como un filtro espacial y aunque el colocar o cambiar de filtro genera un pequeño desenfoque se puede compensar con el ajuste de la posición del espejo secundario del telescopio.



dfinal.png

Figura 4.41: Diagrama de rayos del diseño final con filtro astronómico. En la parte superior se muestra el diseño completo y en la parte inferior un zoom de los componentes de la cámara.

El diseño cuenta con un espejo plano entre el colimador y la cámara que desvía el haz en 90 grados para facilitar su montaje en el telescopio, su operación y el acople de mas instrumentos. El espejo plano debe ser de 90 mm de diámetro, tener 12 mm de espesor, una área efectiva del 95 % y será hecho de material Fused Silica SK1300 del catálogo de OHARA en el taller óptico del instituto. El espesor se escogió de tal manera que se use poca cantidad de material para abaratar costos y que no agregue peso innecesariamente, en el caso de su diámetro se escogió por el tamaño del haz que tiene que reflejar hacia la cámara.



dfinal1B.png

Figura 4.42: Tolerancias de manufactura del espejo plano.

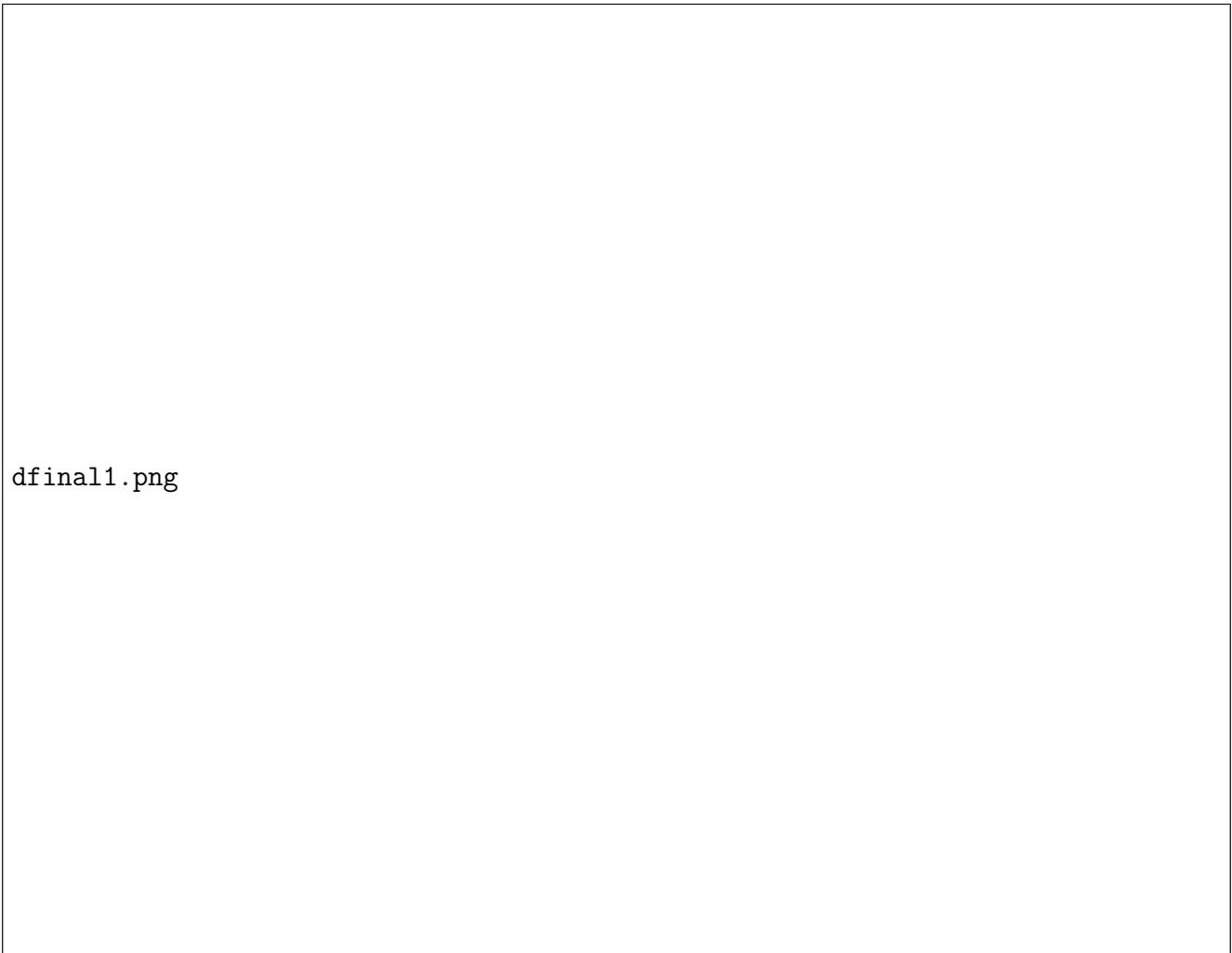


Figura 4.43: Diagrama de rayos del diseño final con espejo inclinado y filtro astronómico que incluye todas las separaciones centrales entre elementos y los diámetros [mm]. Los números azules son los diámetros del eje central de los elementos ópticos y los negros la separación entre el vértice de los componentes.

En la figura 4.44 se puede ver el diagrama de manchas estándar del diseño con un cuadrado como escala que representa el tamaño de un píxel de 13 micras, mientras que en la figura 6.2 se muestra el diagrama de manchas extendido, encerrando las manchas en un círculo con el tamaño que tendría un seeing de 1 arco segundo en el plano imagen del reductor. Se puede observar el comportamiento de las manchas para cada longitud de onda del rango espectral en el que se optimizó el diseño a lo largo del FOV.

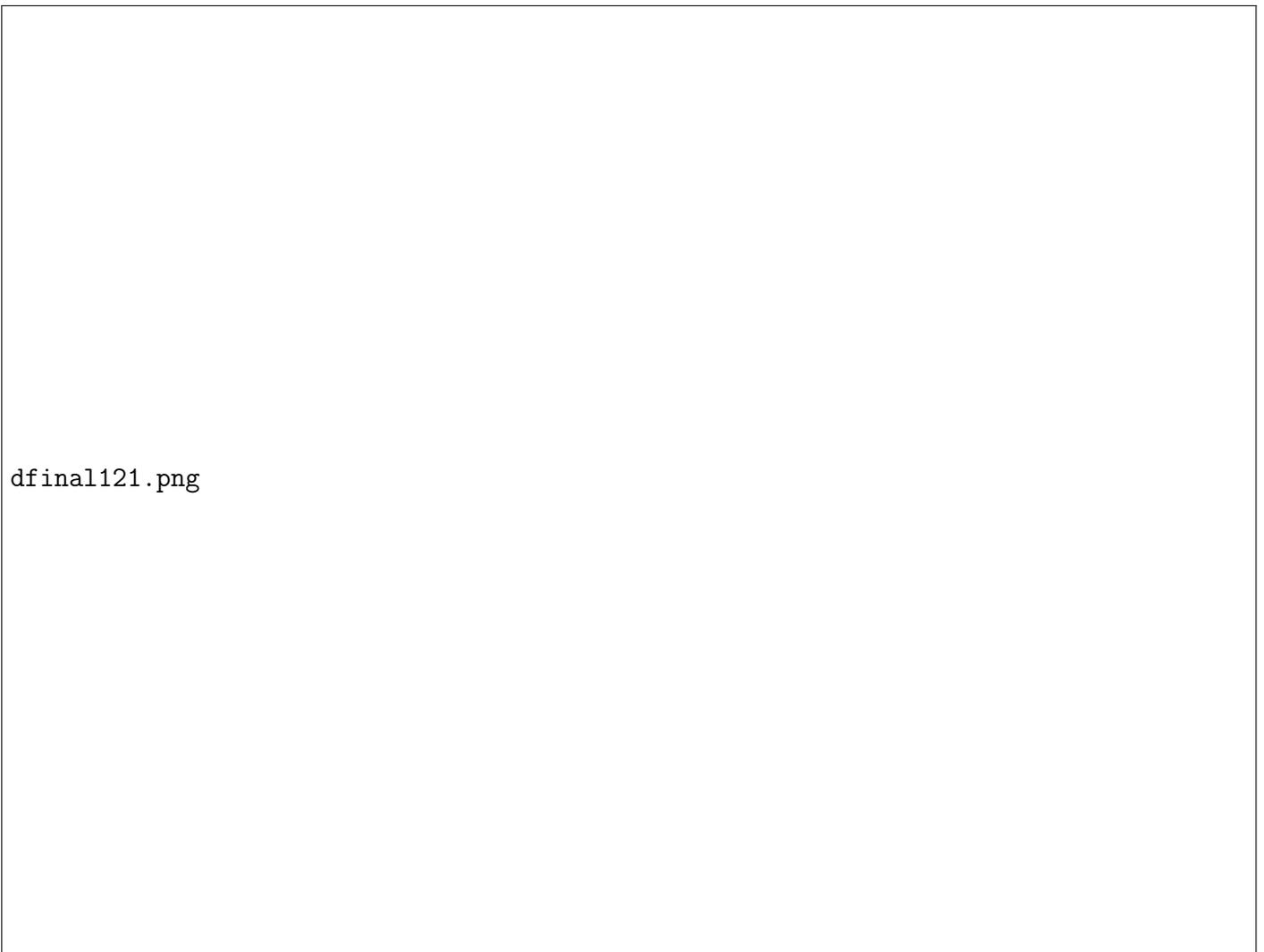
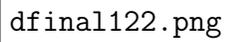


Figura 4.44: Diagrama de manchas estándar con escala de un píxel de 13 micras. La escala del cuadrado que encierra al diagrama de manchas es de 13 micras por lado, que es el tamaño de un píxel de nuestro detector a utilizar.



dfinal122.png

Figura 4.45: Diagrama de manchas, con las manchas encerradas en círculos que representan el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen.

El valor de la razón de Strehl policromática tiene un valor mayor a 0.9 en todo el campo de visión del detector (figuras 4.46 y 4.47) debido a que el sistema opera al límite de resolución, esto garantiza una muy buena capacidad del sistema para resolver objetos puntuales.

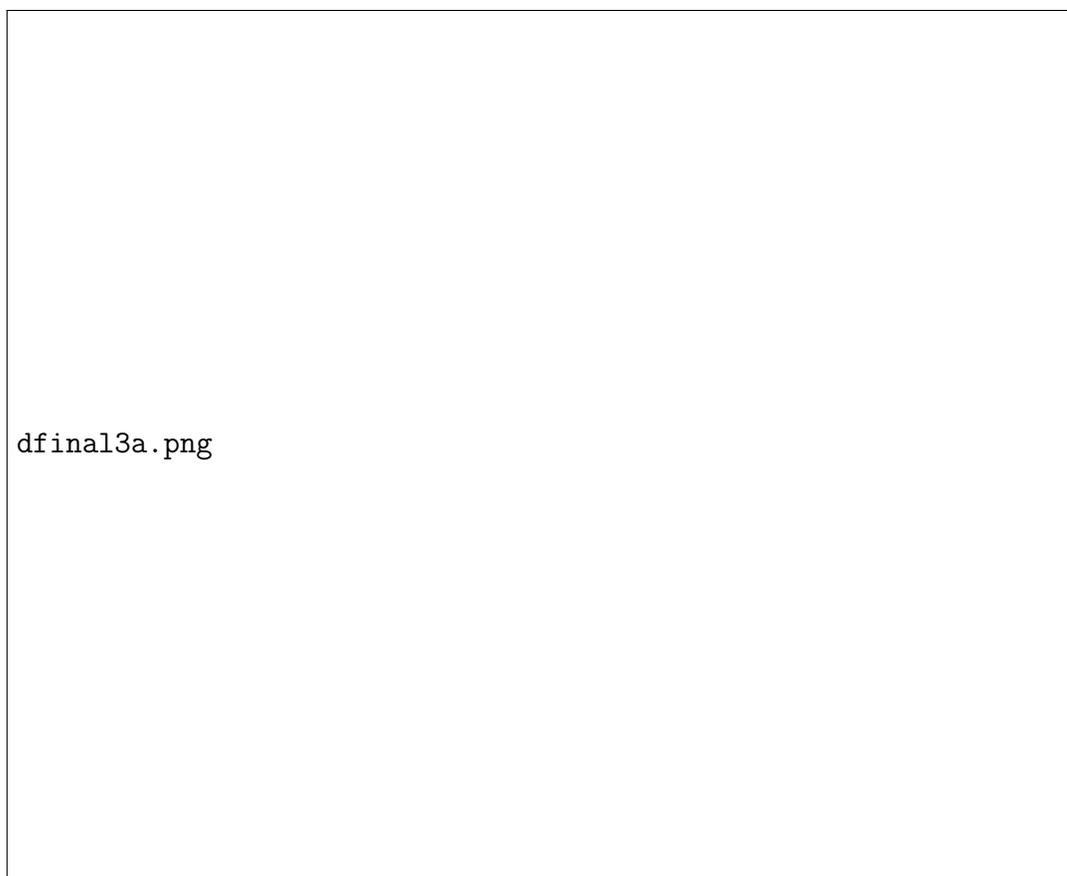


Figura 4.46: PSF policromática en el centro del campo de visión.

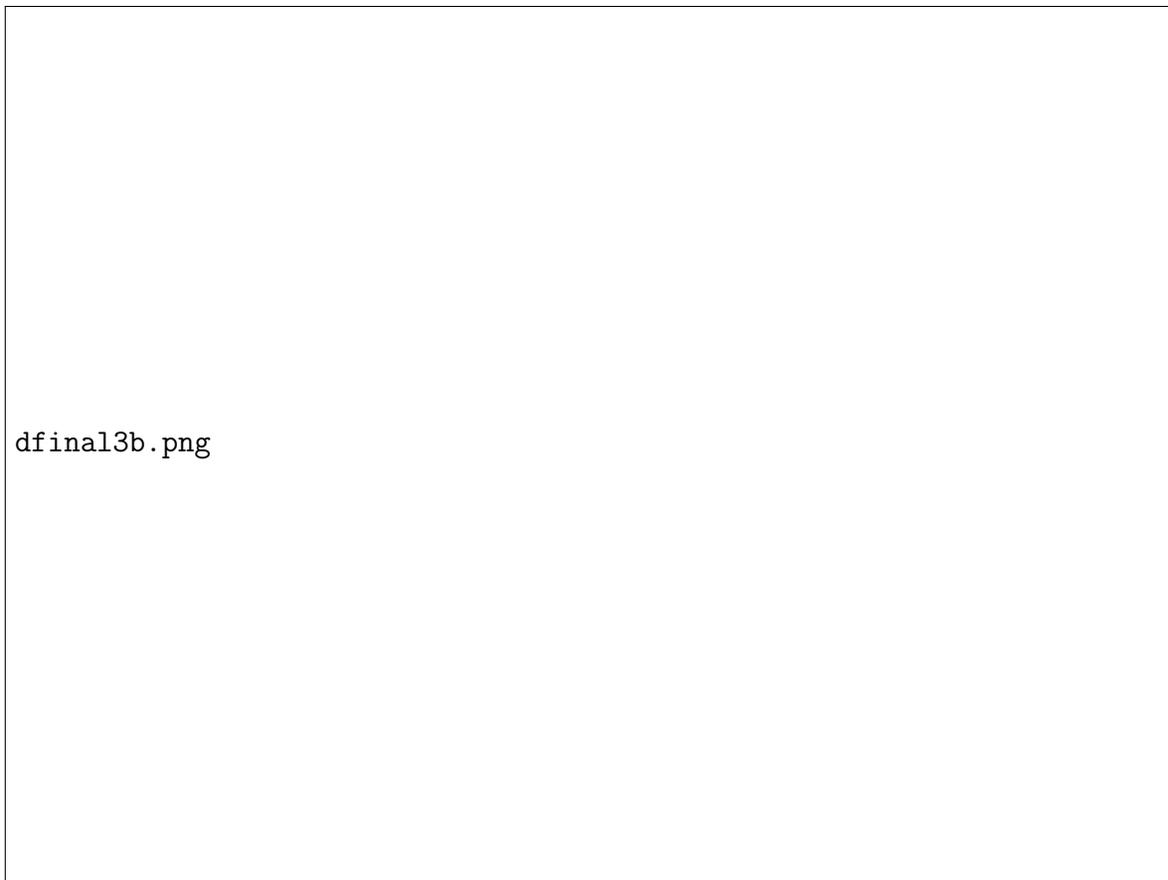


Figura 4.47: PSF policromática en el extremo del campo de visión.

La capacidad de resolución espacial máxima que se puede tener en el detector por su tamaño de píxel es de 38 líneas/mm, para esta frecuencia espacial el sistema óptico transfiere un nivel de contraste del 85 % aproximadamente, lo que se traduce en una buena eficiencia de la óptica para generar imágenes de objetos extendidos (figura 4.48).

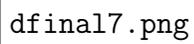
The image area is mostly blank, with the text 'dfinal7.png' located in the lower-left corner. This indicates that the MTF plot for the optical system is not visible in this view.

Figura 4.48: MTF del sistema óptico en todo el campo de visión.

El sistema se simuló corriendo el rango espectral de operación hacia el azul y el rojo para analizar hasta que longitud de onda el sistema era capaz de resolver dentro de los criterios de calidad y eficiencia óptica requeridos, se puede observar en las figuras 4.49, 4.50, 4.51 y 4.52 que el sistema opera satisfactoriamente desde los 370 hasta los 960 nm.

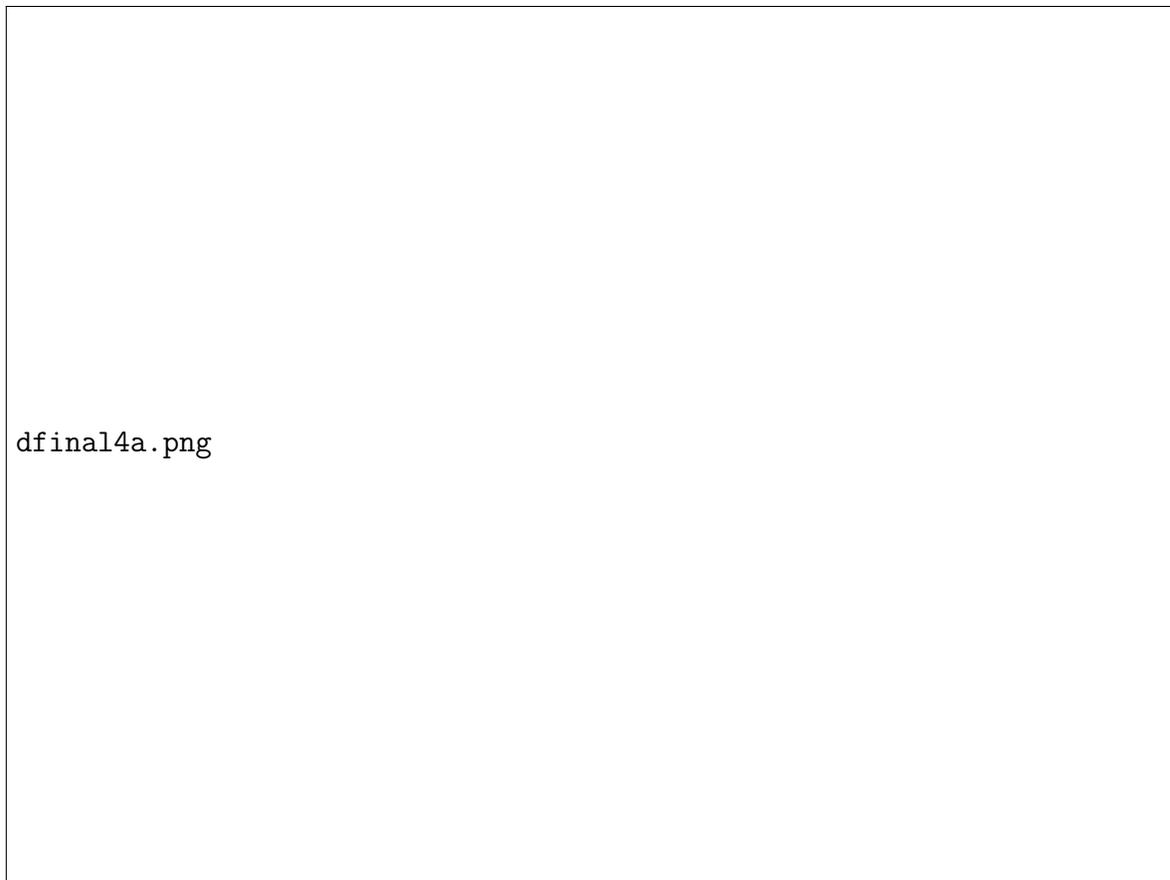


Figura 4.49: Diagrama de manchas encerrado por un cuadrado de 13 micras por lado equivalente a nuestro tamaño de píxel a Utilizar. Se muestra un desplazamiento del rango espectral de operación al azul 370-420 nm, para analizar su funcionamiento en zonas alejadas del rango espectral al que se optimizó.



Figura 4.50: Diagrama de manchas extendido con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama, con desplazamiento del rango espectral de operación al azul 370-420 nm, para analizar su funcionamiento en zonas alejadas del rango espectral al que se optimizó.

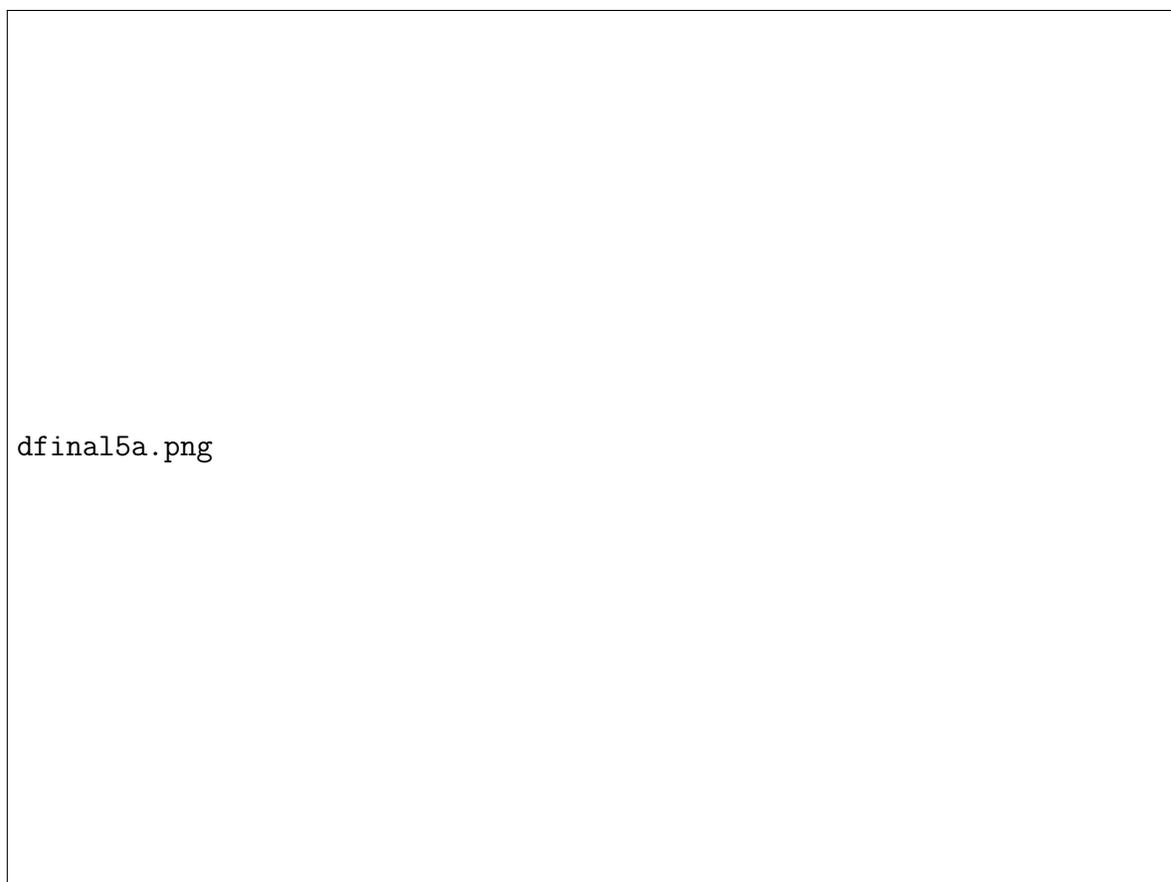


Figura 4.51: Diagrama de manchas encerrado por un cuadrado de 13 micras por lado equivalente a nuestro tamaño de píxel a Utilizar. Se muestra un desplazamiento del rango espectral de operación al rojo 860-960 nm.

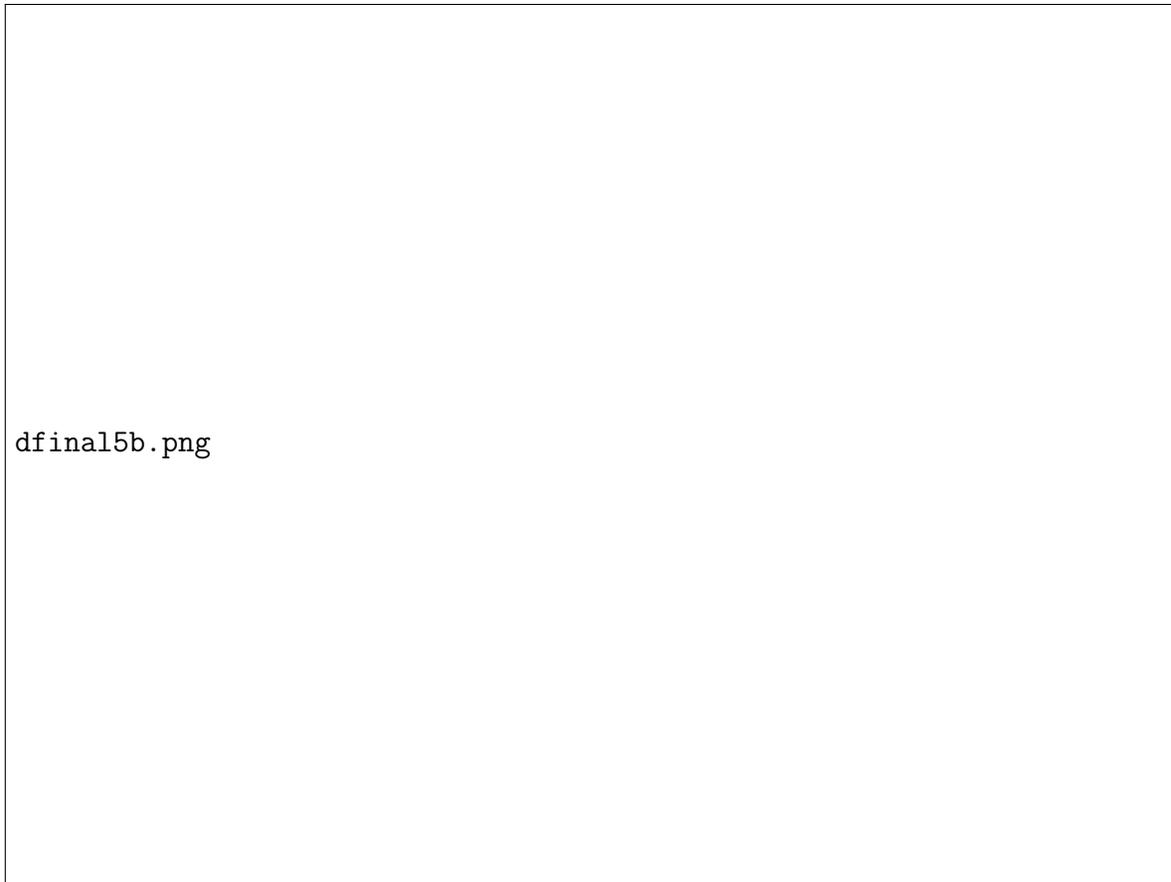


Figura 4.52: Diagrama de manchas extendido con el tamaño equivalente del seeing de 1.4 segundos de arco en el plano imagen como escala en el diagrama, con desplazamiento del rango espectral de operación al rojo 860-960 nm.

Cada elemento del sistema absorbe un poco de la luz cuando ésta lo atraviesa, lo que conlleva a que no toda la intensidad de luz que entra en el sistema sea la misma que logra llegar al detector, la tasa de transferencia efectiva o throughput nos permite calcular el porcentaje de la luz que logra salir del sistema. Esto último es necesario de conocer debido a que a las fuentes astronómicas son muy débiles por estar tan lejos de nosotros, este parámetro nos permitiría hacer un análisis de sensibilidad si se requiriese, para delimitar el tiempo de integración de las observaciones. Para reducir esta absorción el componente óptico debe ser cubierto con una película antirreflejante que disminuye la pérdida de la luz al pasar por cada elemento óptico. Para nuestro diseño se optó por colocar una película de Fluoruro de magnesio (MgF_2) puesto que es un material comúnmente utilizado para este tipo de aplicaciones y se tiene a disposición en el taller de manufactura óptica del instituto.

Incluyendo el telescopio, los filtros astronómicos y el reductor focal hay un total de 12 elementos en el camino óptico de la luz, la absorción de los componentes del sistema provoca una transmisión promedio un poco menor del 50% para longitudes de onda inferiores y mayor al 50% para las longitudes de onda superiores del rango espectral optimizado. Lo anterior muestra que el sistema tiene una mayor sensibilidad en longitudes de onda mas largas lo que no es atípico en los materiales ópticos.

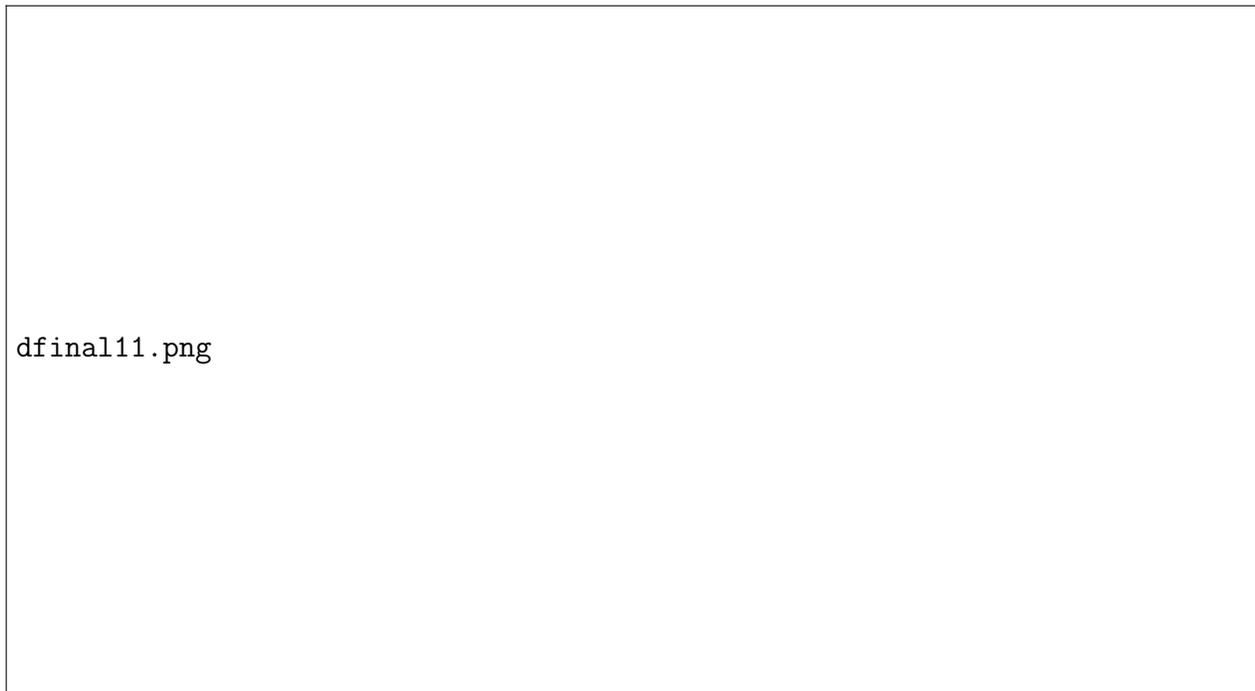


Figura 4.53: Transmisión del sistema en el plano sagital y tangencial del campo central del detector, donde cada color representa la transmitancia de cada longitud de onda a lo largo de la pupila del sistema.



dfinal12.png

Figura 4.54: Transmisión del sistema en el plano sagital y tangencial del campo extremo del detector, donde cada color representa la transmitancia de cada longitud de onda.



Figura 4.55: Troughput del sistema en el campo central y en el campo extremo del detector.

Por último las especificaciones técnicas de los valores de radios de curvatura, espesores, diámetros, espacio entre elementos y espacio sobrante para sujetar a los componentes se pueden observar en las siguientes figuras.

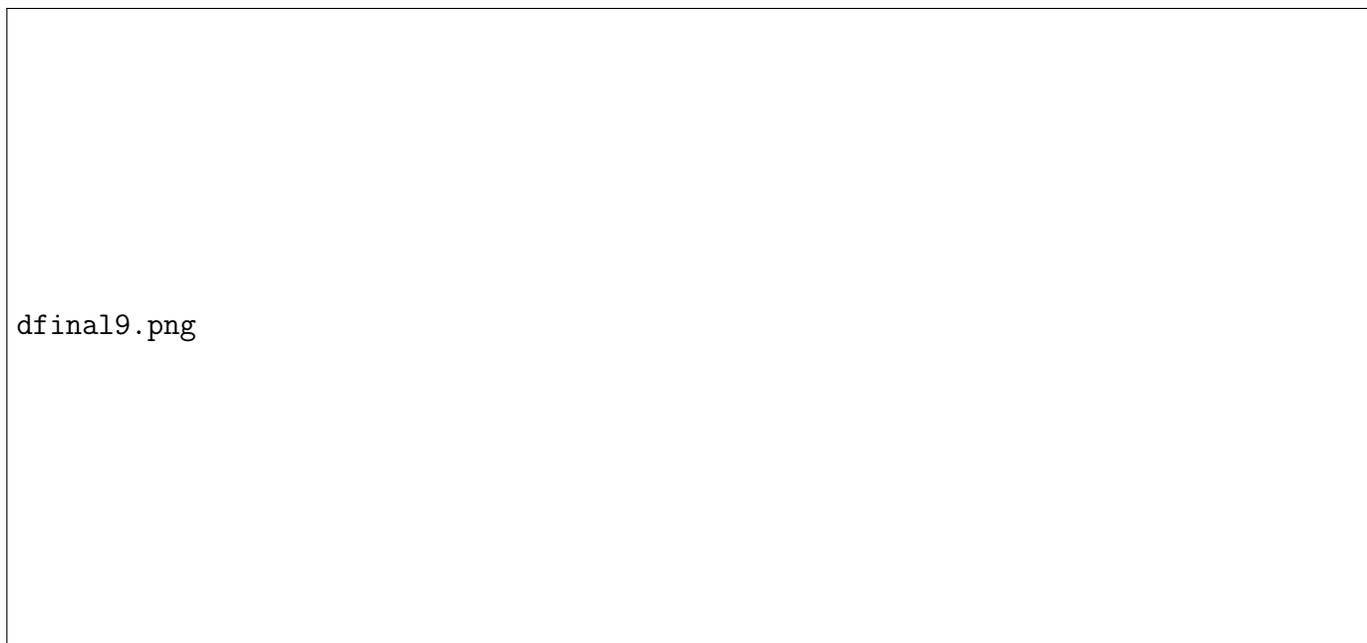


Figura 4.56: Editor de parámetros del software Optic Studio con las especificaciones del diseño final [mm].

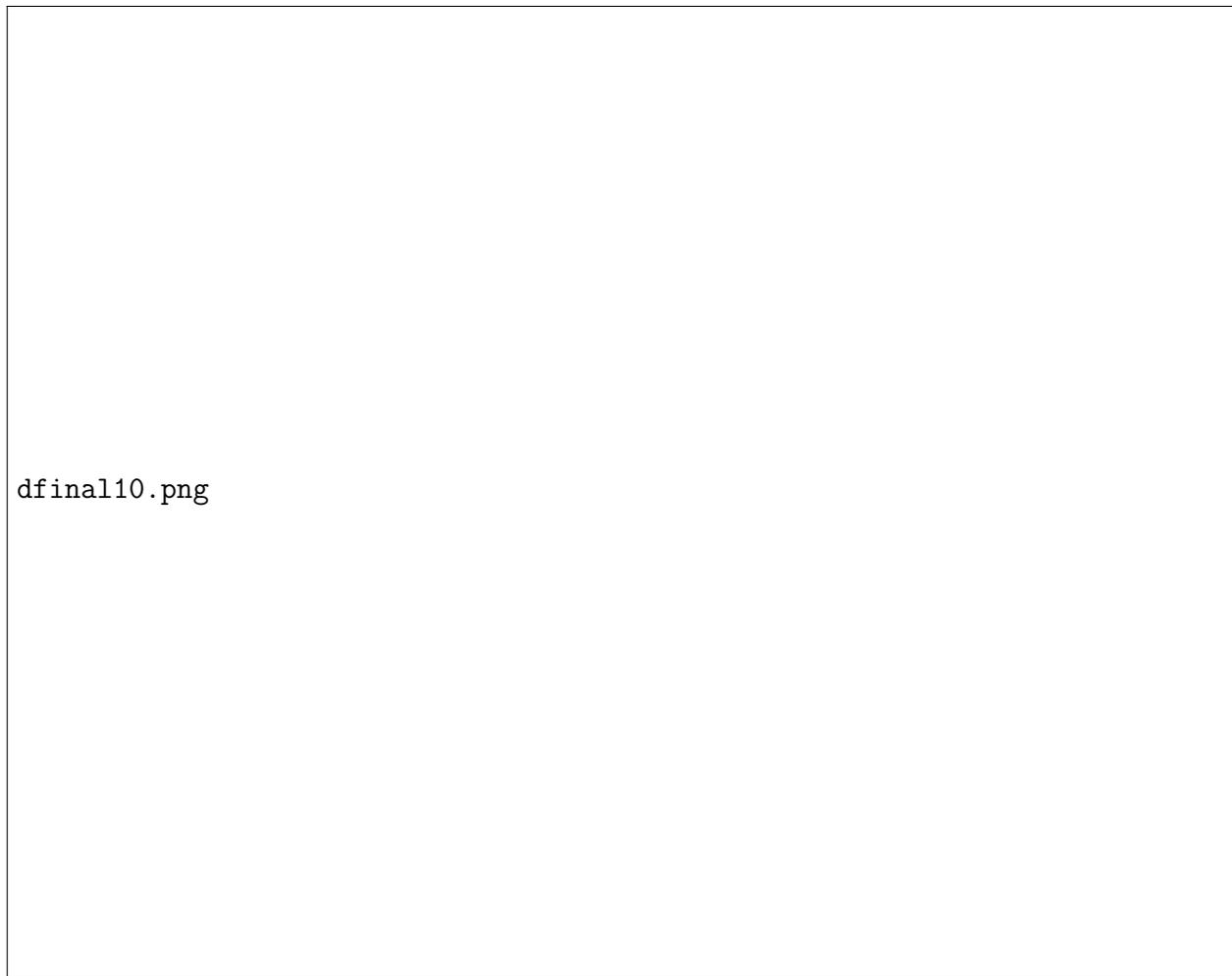


Figura 4.57: Espacio en los componentes ópticos para su sujeción mecánica [mm]. En la parte superior se muestran los componentes de la cámara y en la parte inferior el colimador

Capítulo 5

Diseño optomecánico

5.1. Análisis térmico de operación

La temperatura y presión atmosférica que usa el programa de diseño óptico por default durante la simulación es de 20°C y 1 atm respectivamente, tomando en cuenta que el telescopio del OAGH se encuentra aproximadamente a 2480 metros sobre el nivel del mar, la presión atmosférica del lugar se reduce a 0.740 atm, en lo que respecta a la temperatura de observación ésta varía a lo largo del año y durante la noche de cada observación, teniendo un valor promedio de 10°C en primavera, 16°C en verano, 12°C en otoño y -3°C en invierno. Para el análisis térmico de operación se simuló el diseño óptico utilizando un material mecánico en las separaciones entre componentes, con este modelo se hicieron las simulaciones a distintas temperaturas con una presión atmosférica de 0.740 atm para simular el sitio de observación.

Se partió de la temperatura inicial de 20°C a 1 atm y se observó el comportamiento de todo el sistema en las siguientes configuraciones. Se trató de compensar los desenfoques con el movimiento axial del espejo secundario del telescopio en pasos de 10 micras, que se encuentran dentro de la capacidad de paso de este sistema de ajuste mecánico:

- 30°C y 0.740 atm
- 20°C y 0.740 atm
- 10°C y 0.740 atm
- 0°C y 0.740 atm
- -10°C y 0.740 atm

Los intervalos anteriores fueron escogidos para tratar de encontrar la relación en los efectos de la temperatura sobre el sistema (por si se requiere un compensador térmico), los resultados mostraron que el sistema se compensa bien con el ajuste axial del espejo secundario y no se desenfoca fuera del disco de seeing en un intervalo de ± 5 °C, esto una vez enfocado al inicio de las observaciones, lo cual es un rango mayor al que podría variar durante toda la noche, en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se muestra una de estas simulaciones partiendo del sistema ya enfocado con el espejo secundario en la configuración de 10 °C y 0.74 atm.

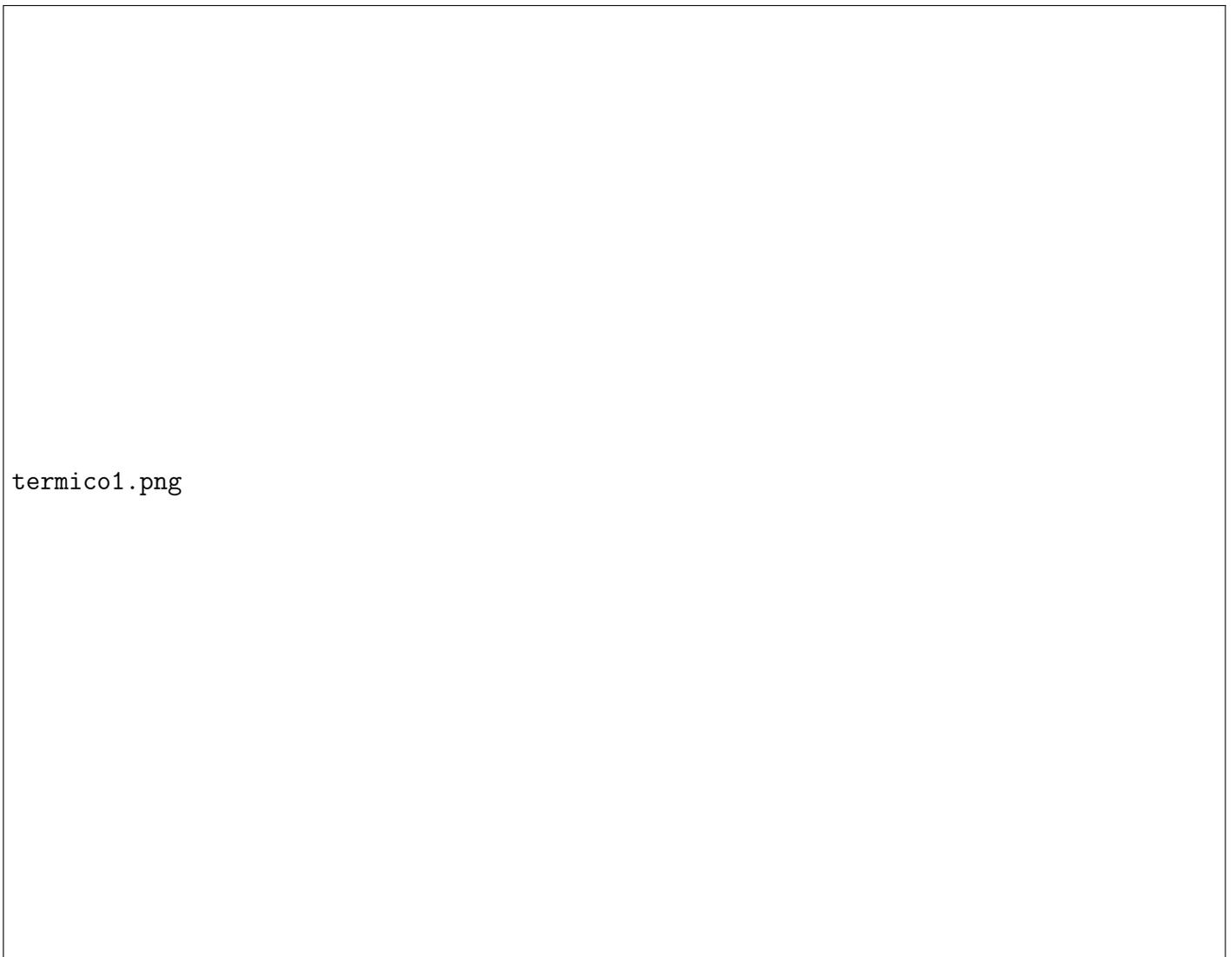
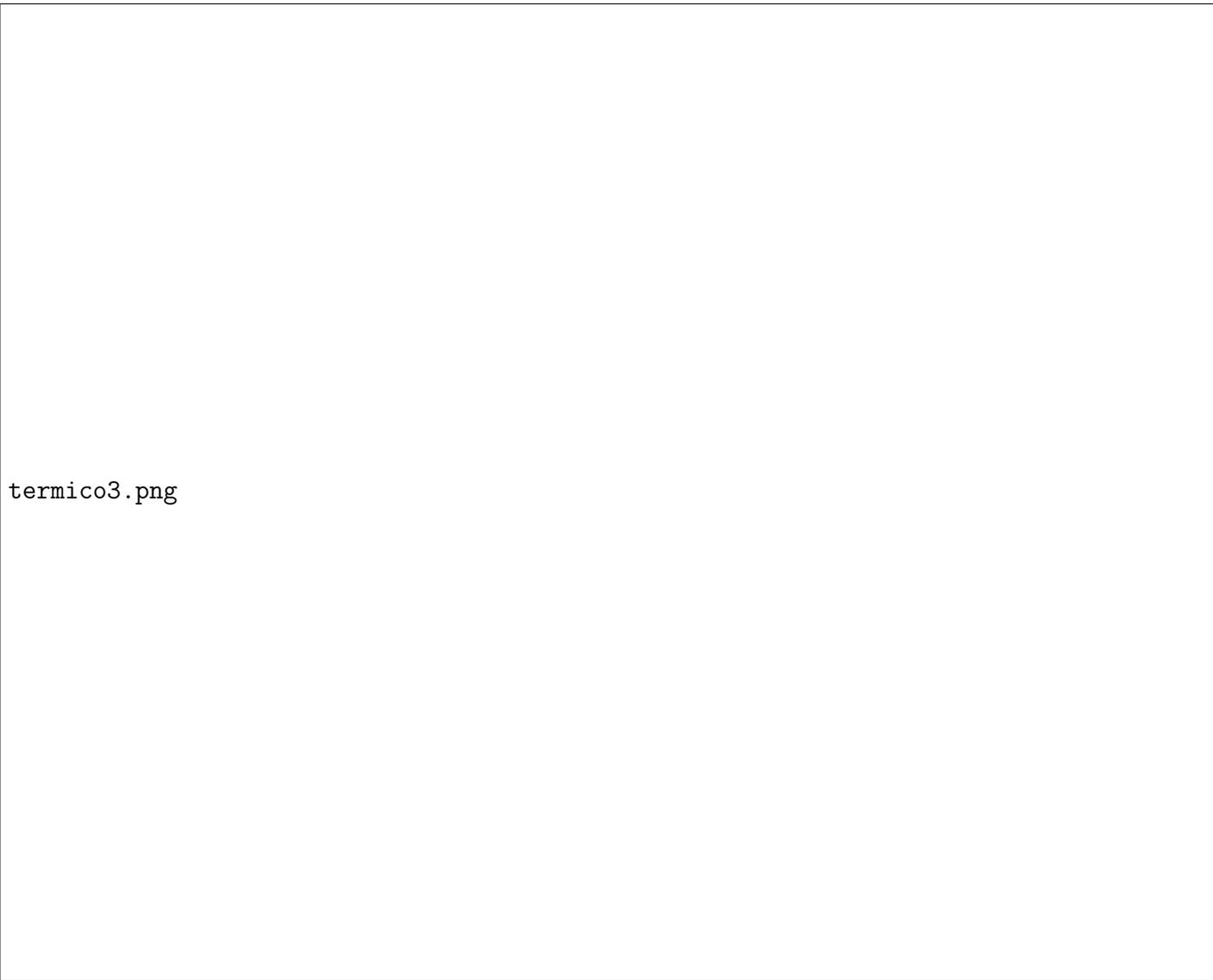


Figura 5.1: Diagrama de manchas extendido del sistema a 10°C y 0.74 atm enfocado con el espejo secundario del telescopio, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.



Figura 5.2: Diagrama de manchas del sistema a 15°C y 0.74 atm después del enfoque hecho a 10°C, con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.



termico3.png

Figura 5.3: Diagrama de manchas del sistema a 5°C y 0.74 atm después del enfoque a 10°C , con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.

Con este análisis se puede concluir entonces que el reductor focal no necesita un sistema de atermalización para compensar los desenfoces por efectos térmicos, ya que se mantiene una buena resolución toda la noche de observación una vez que se ajuste la posición del espejo secundario, como se realiza de manera rutinaria al inicio de todas las observaciones.

El material mecánico utilizado en la simulación fue el aluminio, ya que es el que será utilizado para diseñar los barriles de la estructura optomecánica, esto porque el aluminio es un material fácil de maquinar, fácil de conseguir, es mas barato y sobre todo mas liviano que otros materiales como el acero, esto facilita su implementación, puesto que el telescopio del observatorio tiene el lugar de acople en su parte trasera y es preferible reducir el peso de sistema al todo lo posible.

5.2. Características y descripción del Ensamble mecánico

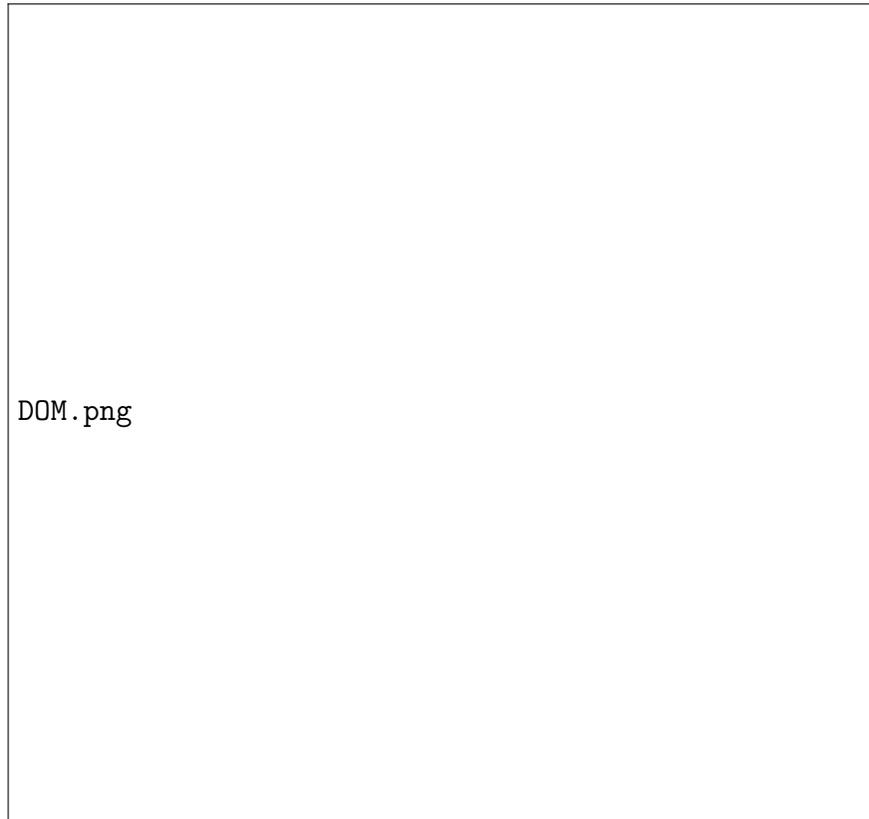


Figura 5.4: Ensamble completo del sistema optomecánico del reductor focal con el detector.

El sistema optomecánico que será utilizado para acoplar el reductor focal al telescopio es un sistema hecho en su mayoría de Aluminio 6061-T6, con excepción de algunos anillos de titanio que sujetan radialmente los elementos ópticos puesto que tiene un coeficiente de expansión térmica CTE muy cercano al de algunos elementos ópticos. Es importante mencionar que todo el sistema fue optimizado en sus dimensiones, de tal manera que los elementos puedan fabricarse con partes de material accesible en México.

Se utilizaron en su mayoría ajustes de eje-agujero con tolerancias estrictas para garantizar la alineación del ensamble dentro de la tolerancia establecida, durante el diseño se tuvo especial cuidado en corroborar que la mayoría de los elementos estuviesen dentro de las posibilidades de fabricación de los talleres mecánicos del INAOE, específicamente del OAGH, lo anterior para reducir el costo y simplificar su implementación. Es importante señalar que los componentes mecánicos del ensamble deberán ser anodizado, para que el color del material se torne negro mate y atenúe posibles reflexiones espurias.



DOM1 . png

Figura 5.5: Ensamble completo del sistema optomecánico del reductor focal con vista de sección.

El sistema completo tiene un peso total de 64 kg mas los 3.7 kg del detector, sus longitudes verticales y horizontales mas largas son de 879 mm y 720 mm respectivamente, la distancia entre el colimador y el primer doblete de la cámara se dividió con un espejo plano inclinado 45 grados sobre el eje, con una distancia de 275 mm hacia el colimador y 225 mm hacia la cámara, estas distancias fueron escogidas de tal forma que las flexiones estuvieran equilibradas de la mejor manera posible, lo anterior para poder implementar un sistema óptico tan largo sin que las flexiones por el mismo peso del sistema afectaran considerablemente su funcionalidad. Para facilitar la descripción del ensamble el sistema fue dividido en 8 sub-ensambles que se describirán en las siguientes secciones.

1. Acoplador con el sistema guiador del telescopio y la rueda de filtros
2. Ensamble COL1 y COL2
3. Ensamble y acople con el espejo diagonal M1
4. Celda CAM1 y CAM2
5. Ensamble CAM1 y CAM2 con el sistema de ajuste lateral del elemento compensador
6. Ensamble CAM3 y CAM4
7. Ensamble CAM5 y CAM6
8. Ensamble completo del barril de la cámara

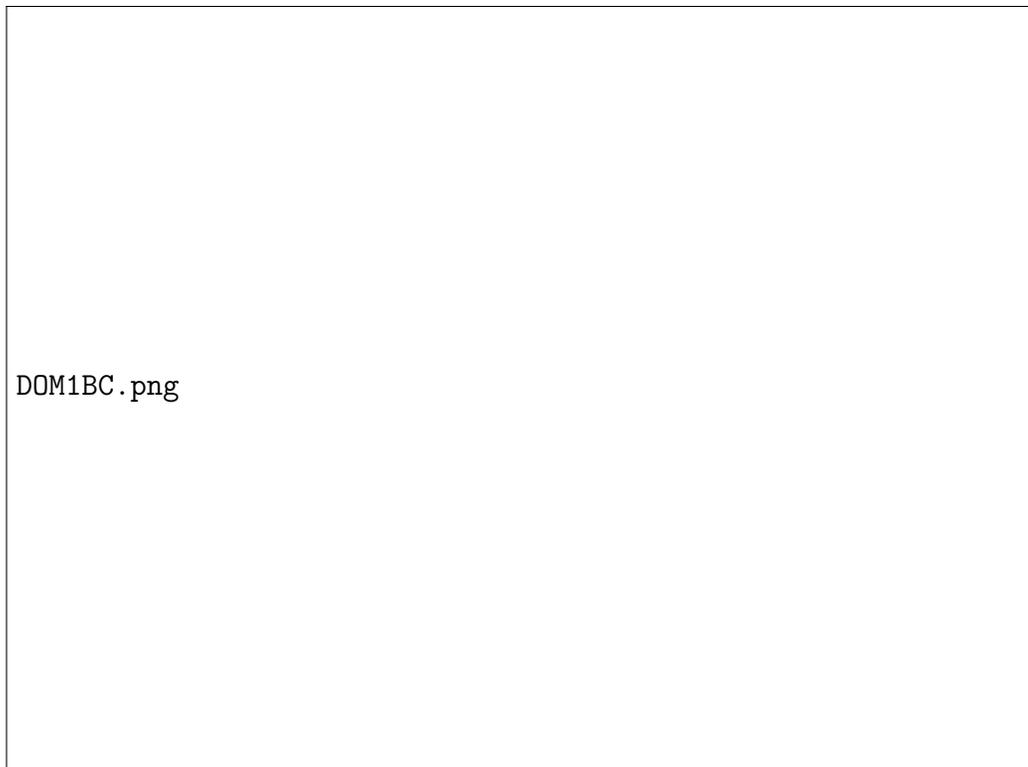


Figura 5.6: Vista explosionada del ensamble completo del sistema optomecánico del reductor focal con vista de sección.

5.2.1. Acoplador con el sistema guiador del telescopio y la rueda de filtros

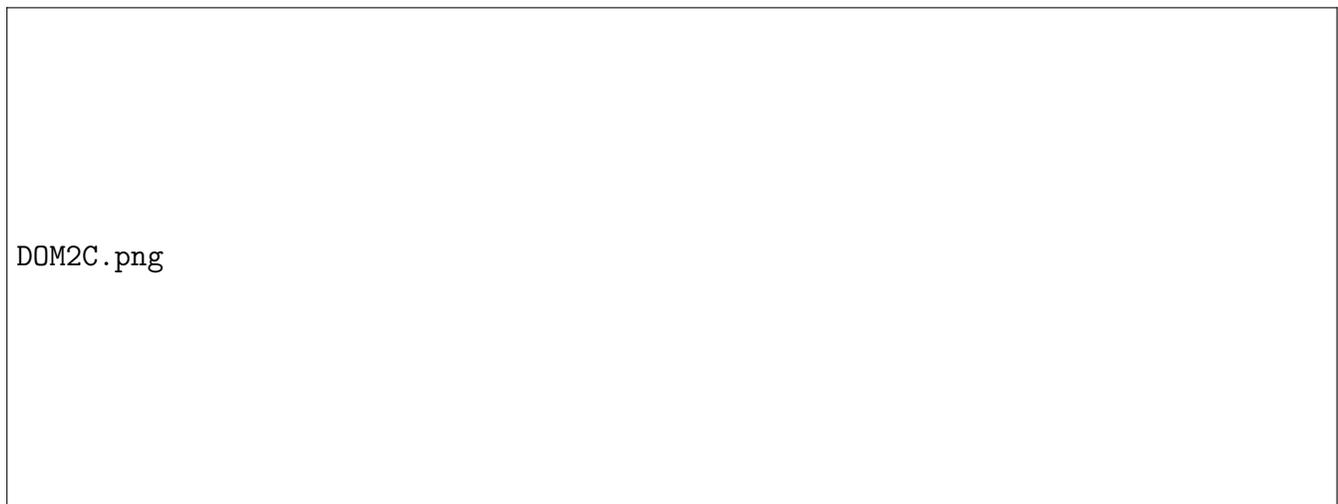


Figura 5.7: Vista explosionada del ensamble del acoplador con el sistema guiador del telescopio.

El acople con el sistema guiador del telescopio cuenta con una brida que hace contacto con la base del sistema guiador, atornillado a este ultimo se sujeta una caja en donde se coloca la rueda de filtros, seguido de un tubo extensor con bridas que separa a la distancia necesaria el barril del colimador. El sub-ensamble cuenta con cartabones, costillas y geometrías en sus elementos que actúan como soportes que ayudan a reducir las flexiones del sistema y logran compensar la asimetría de la estructura de la rueda de filtros, así mismo para evitar la entrada de luz parásita al sistema se cuenta con sellos utilizando O-rings tanto en la parte superior como inferior de la rueda de filtros.



Figura 5.8: Ensamble del acople con sistema guiador del telescopio (a) vista frontal y b) lateral ambas con su vista de sección).

5.2.2. Ensamble de COL1 y COL2

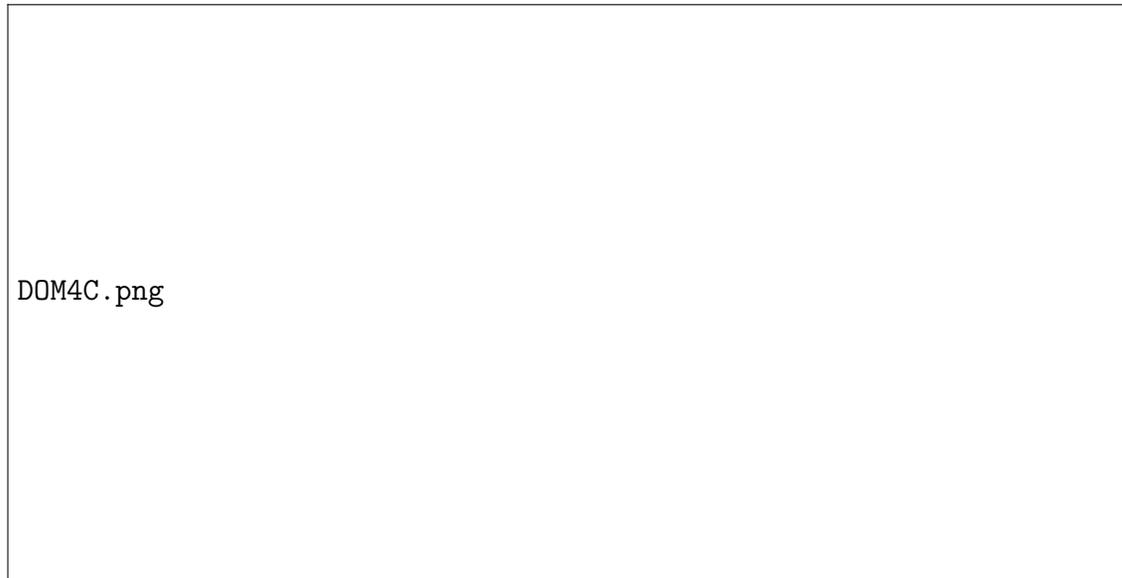


Figura 5.9: Vista explosionada y de sección del ensamble de COL1 Y COL2.

El ensamble del colimador consta de 4 partes además del elemento óptico, está conformado de un barril de aluminio que tiene en el asiento del doblote un radio específico de 1 mm para reducir el estrés axial, el anillo que actúa como soporte radial es de titanio siendo diseñado para garantizar un buen centrado del elemento óptico y para mantener un estrés dentro de los valores permitidos que no afecten su integridad. Como elemento de sujeción axial se colocó una tapa atornillada al barril de la cámara con una muesca para colocar un O-ring, este último permite un contacto suave y mantiene el elemento en su posición sin ejercer una alta presión (ver figura 5.10). Es importante señalar que el torque aplicado sobre los tornillos de las tapas de sujeción axial de todos los elementos ópticos deberá estar entre 50 a 80 inch-lbs, esto para que el O-ring haga contacto con la superficie del lente y que en su deformación del mismo aplique una fuerza equivalente de 1.5 veces el peso de la lente.

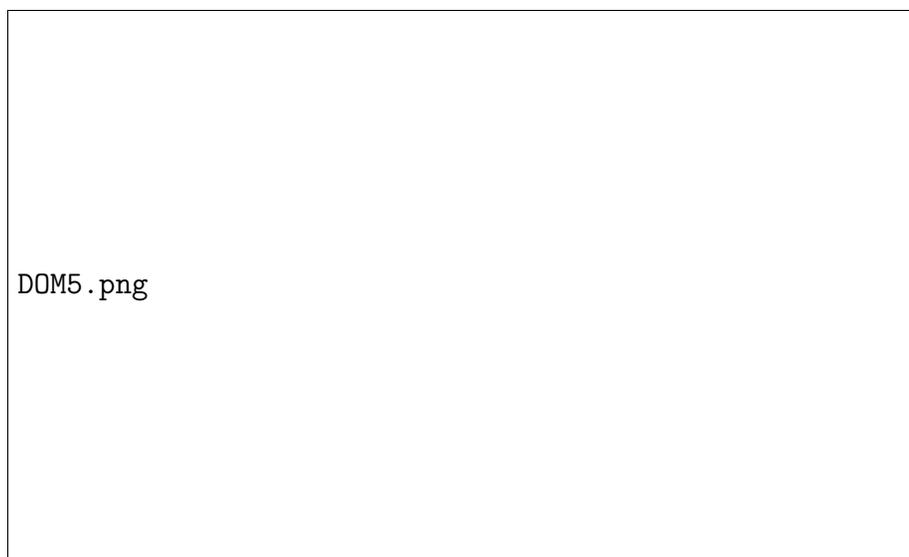


Figura 5.10: Ensamble de COL1 y COL2 con vista de sección.

5.2.3. Ensamble y acople del espejo diagonal M1

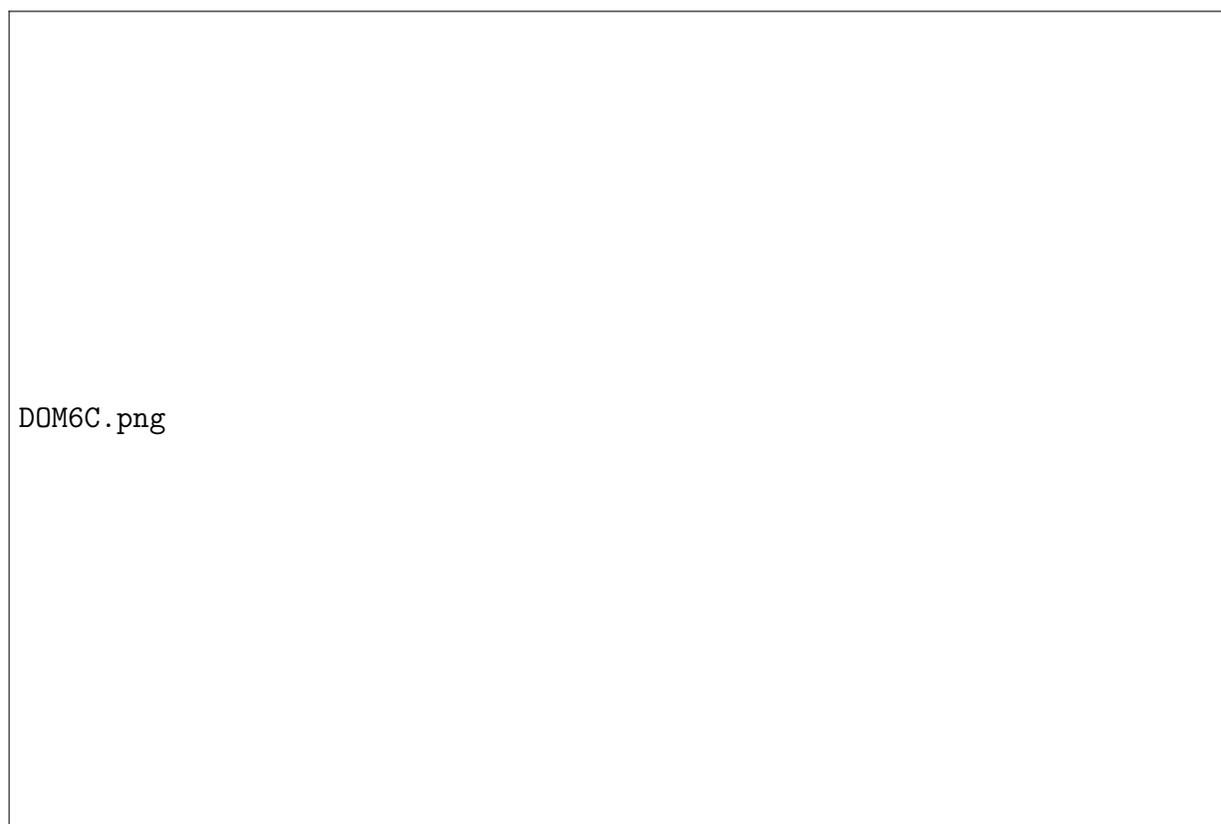


Figura 5.11: Vista explosionada del ensamble completo del espejo diagonal M1.

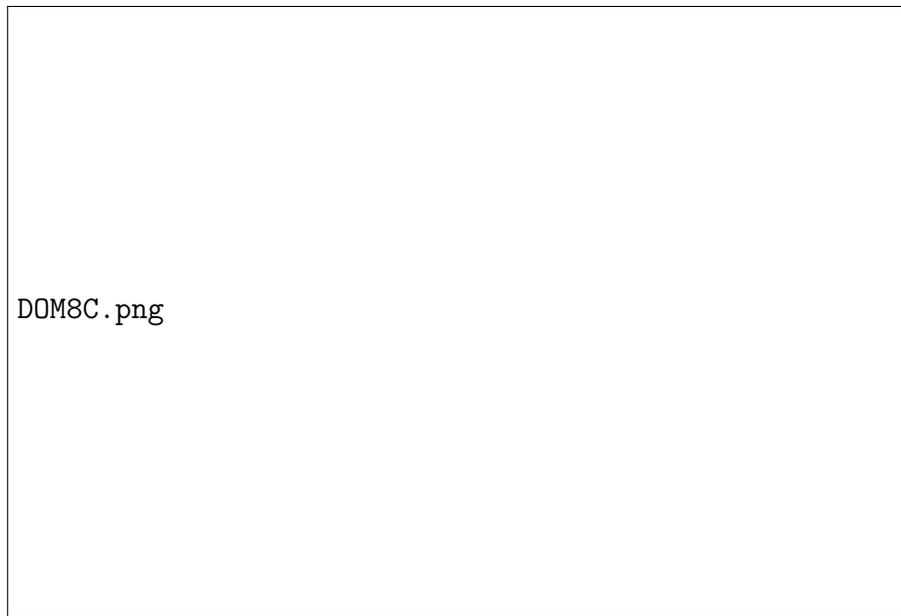


Figura 5.12: Vista explosionada y de sección de la montura del espejo M1.

El ensamble del espejo inclinado se hizo con un cubo donde sobre una de las tapas se coloca una montura que contiene el espejo, esta montura se alinea en el ensamble utilizando unos pines de localización, estos pines se incertan sobre unos barrenos de presición sobre la tapa mencionada, para después fijarse con unos tornillos M4 con la ayuda de una base para esta montura, dos de las tapas cuentan con agujeros donde se ensamblan los demás componentes del reductor focal, la montura del espejo tiene un diseño similar al del colimador, con un anillo de titanio y una tapa con muesca para O-ring que mantienen al espejo en su posición sin ejercer un estrés que pueda dañarlo.

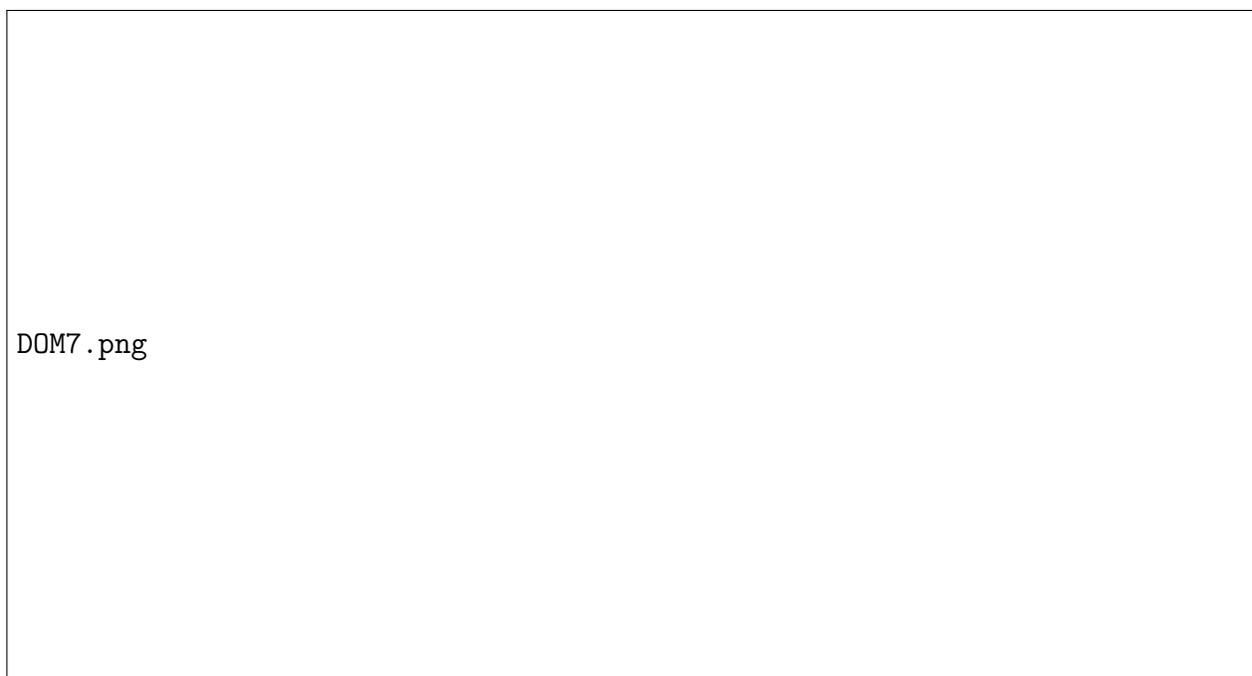


Figura 5.13: Ensamble del espejo inclinado M1 con vista de sección.

5.2.4. Celda de CAM1 y CAM2

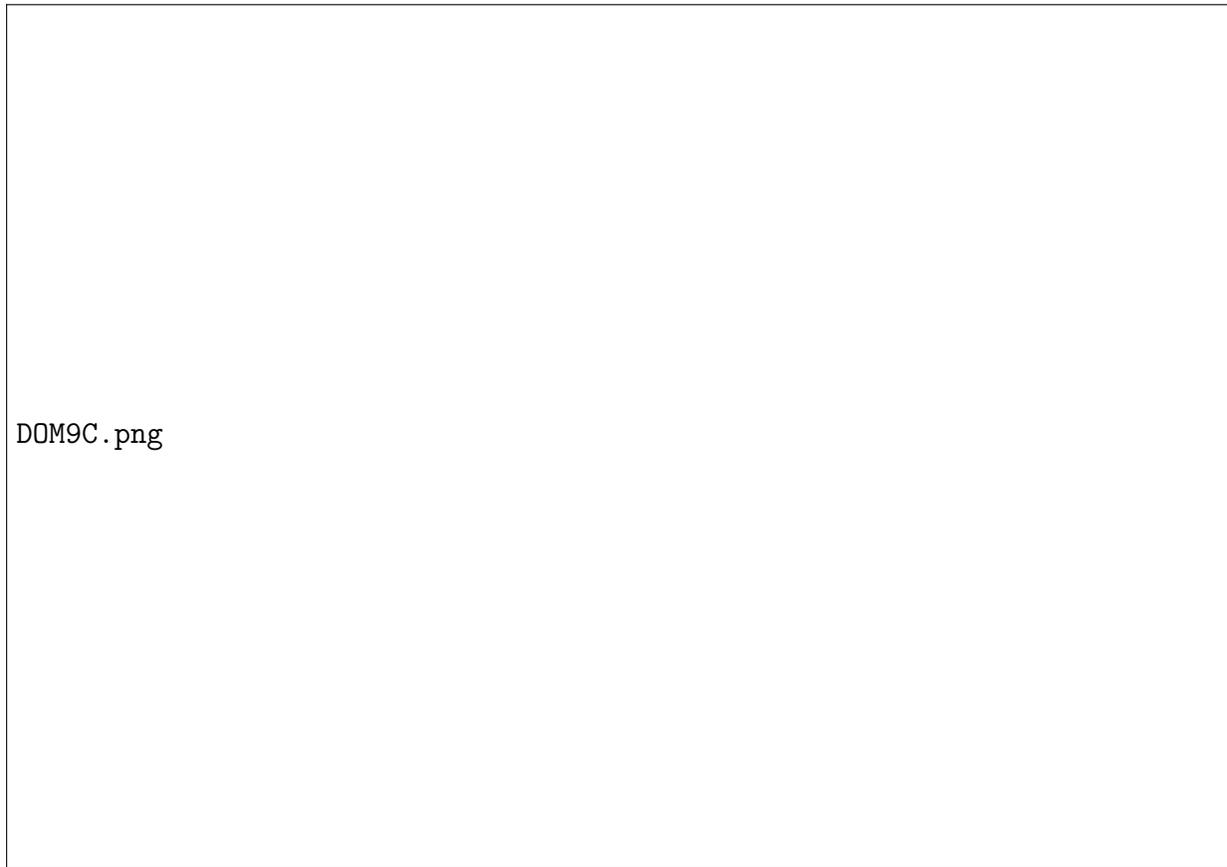


Figura 5.14: Vista explosionada y de sección de la celda de CAM1 y CAM2.

La celda del doblete que contiene a CAM1 y CAM2 es una celda individual que tiene el mismo sistema de sujeción axial y radial que los elementos ópticos anteriores, cabe mencionar que este componente fue ensamblado de esta manera porque es utilizado como compensador, por lo que esta celda actúa como sub-ensamble de un sistema de ajuste lateral que se describirá en la siguiente sección.

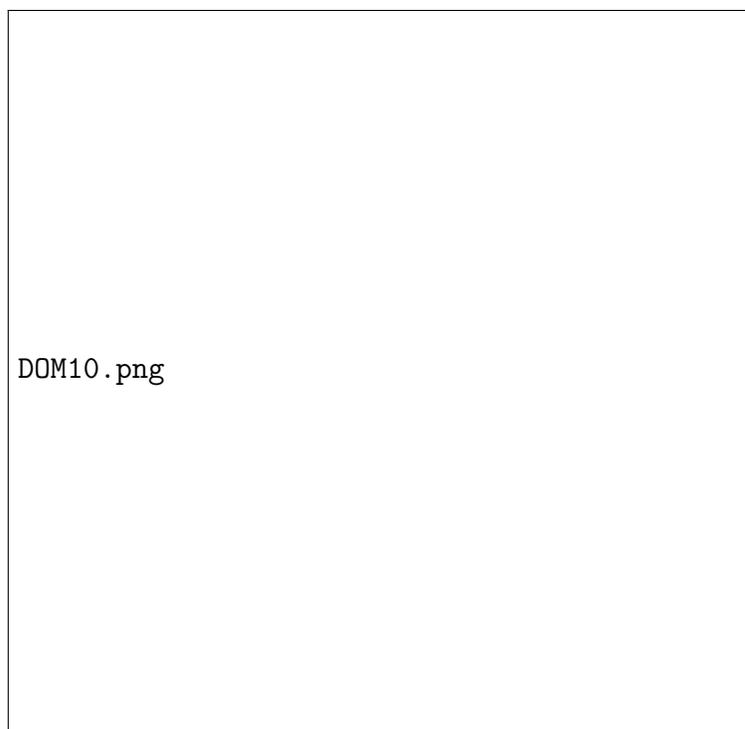


Figura 5.15: Ensamble de la celda individual con vista de sección de CAM1 y CAM2.

5.2.5. Ensamble CAM1 Y CAM2 con el sistema de ajuste lateral del elemento compensador

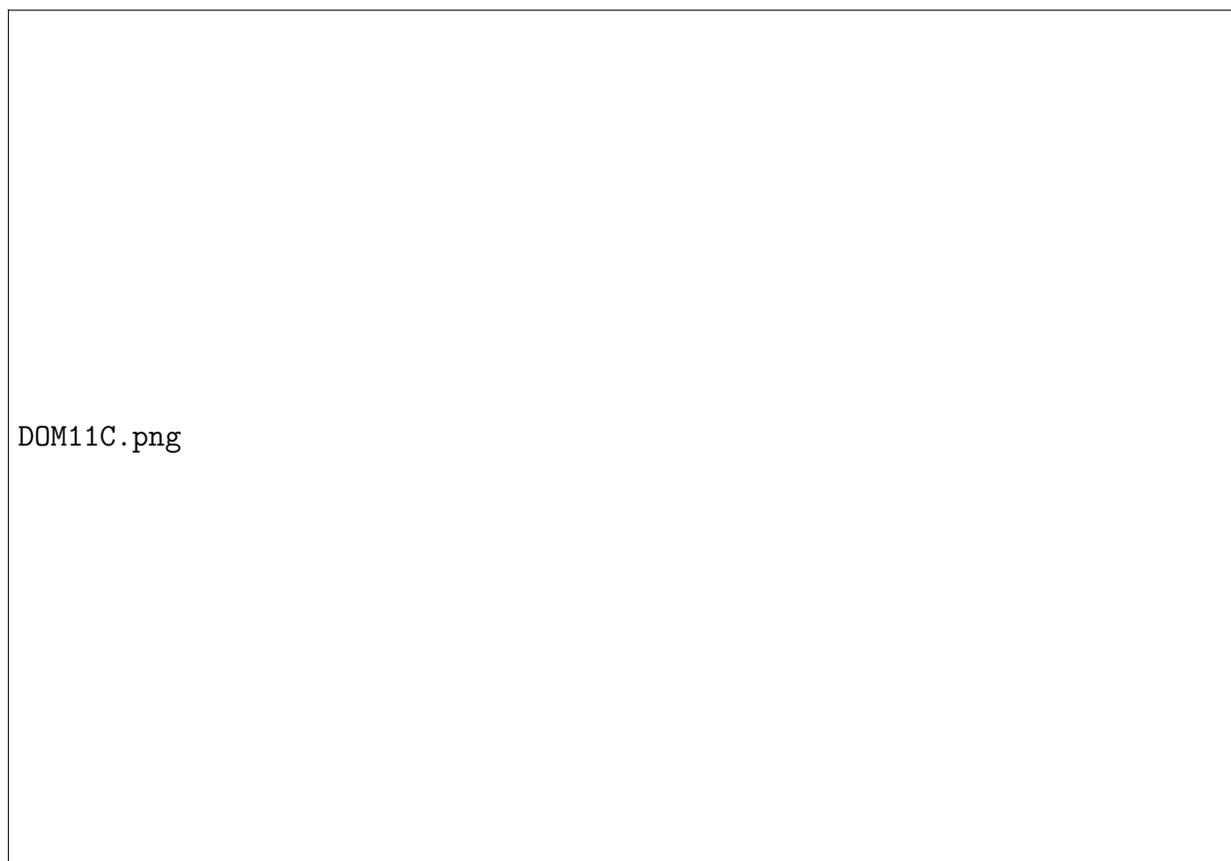


Figura 5.16: Vista explosionada del ensamble de CAM1 Y CAM2.

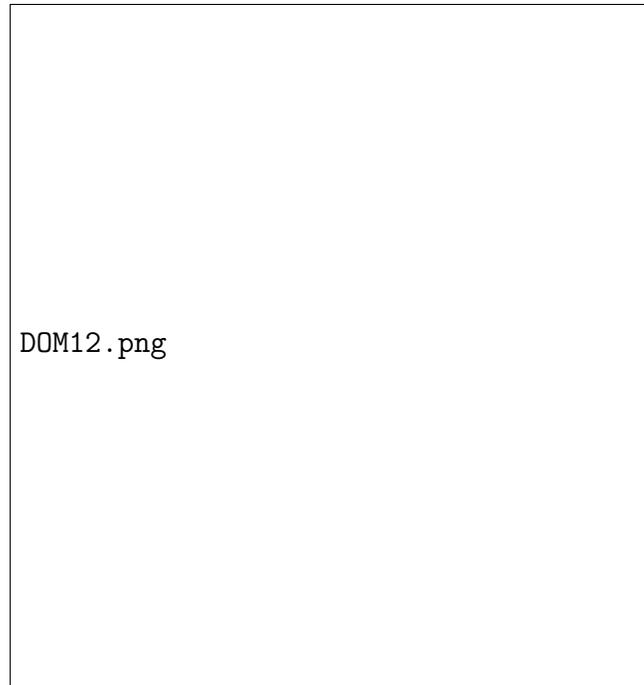


Figura 5.17: Ensamble de CAM1 Y CAM2 con vista de sección.

El ensamble contiene una brida anidada y una tapa de retención con un O-ring que sujeta a la celda individual de CAM1 y CAM2, esta brida se atornilla a una muesca del barril de la cámara y tiene unos agujeros pasados con 3 bujes que a su vez contienen 3 tornillos de precisión M3 X 0.2, estos últimos están colocados radialmente en la brida separados 120 grados siendo usados para el ajuste lateral del elemento compensador, como se puede apreciar en la figura 5.18. Este ajuste permite movimientos laterales de algunos cientos de micras que son suficientes para el nivel de desplazamiento que necesita el elemento compensador (según los resultados mostrados de la simulación Montecarlo).

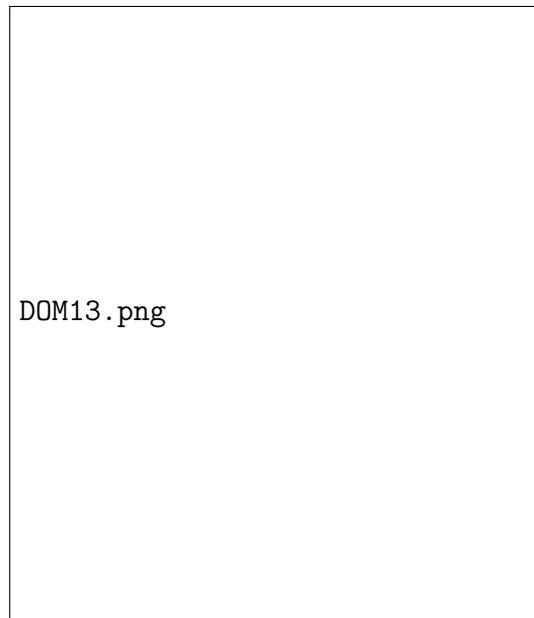


Figura 5.18: Sistema de ajuste lateral del elemento compensador.

En el ajuste lateral se puede utilizar el criterio de cual tornillo ajustar en función de la calidad de imagen obtenida en las observaciones de prueba, se recomienda tener especial cuidado a la hora de centrar inicialmente la celda individual del doblete, esto para que no se necesite demasiado rango de movimiento para ajustar el componente.

5.2.6. Ensamble de CAM3 y CAM4

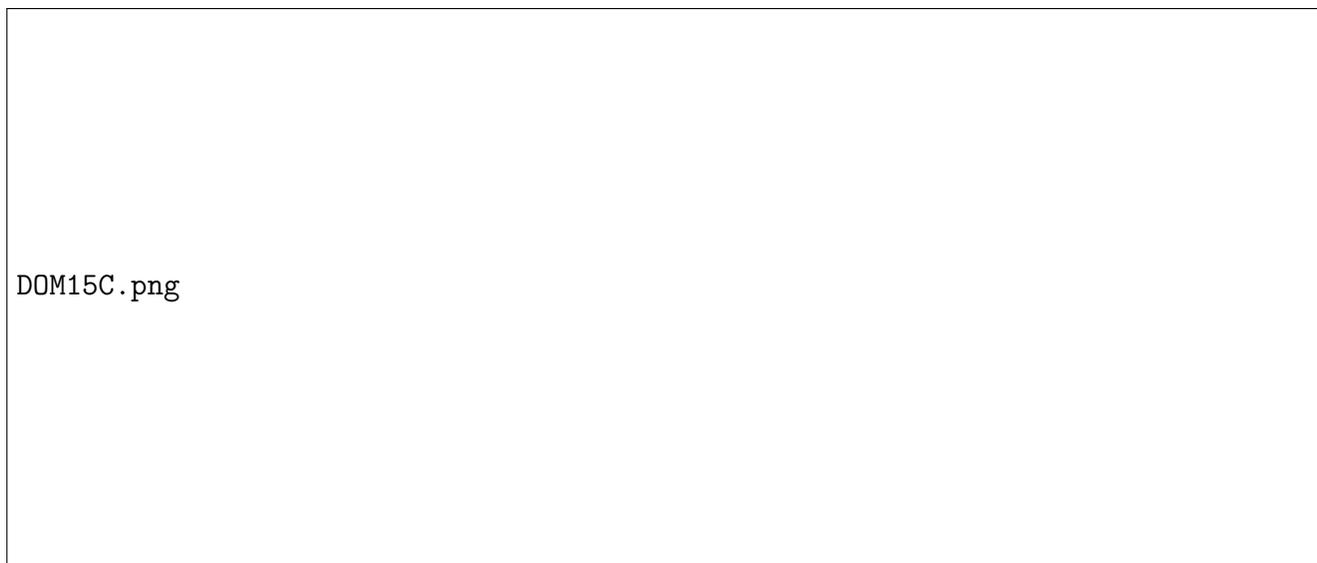


Figura 5.19: Vista explosionada del ensamble de CAM3 y CAM4 con vista de sección.

El ensamble de estos elementos es idéntico al del colimador solo que el anillo del elemento óptico CAM4 está hecho de aluminio en vez de titanio, esto porque el material del elemento óptico es CaF₂.

que tiene un alto CTE de $18.9 \mu m/^{\circ}C$ cercano al del aluminio, cabe señalar que para el diseño de los soportes radiales es preferible utilizar materiales con un CTE aproximadamente igual al del elemento óptico, esto porque ayuda a simplificar el diseño del anillo y reduce el estrés en el componente óptico al mínimo, sin embargo, en ocasiones los materiales pueden ser muy difíciles de conseguir y resultan costosos, por lo que es preferible diseñar un sistema que contenga materiales de fácil adquisición.



Figura 5.20: Ensamble de CAM3 y CAM4.

5.2.7. Ensamble de CAM5 y CAM6

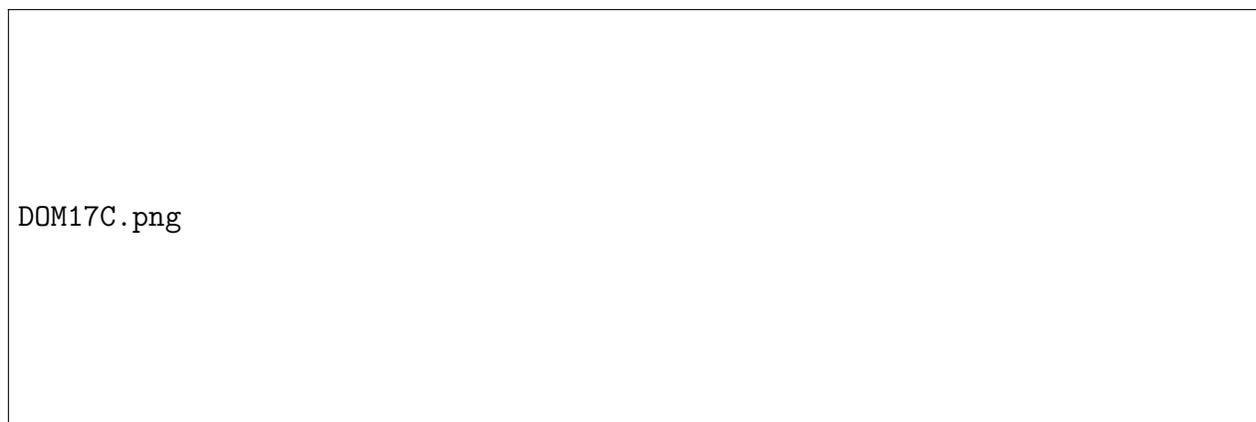
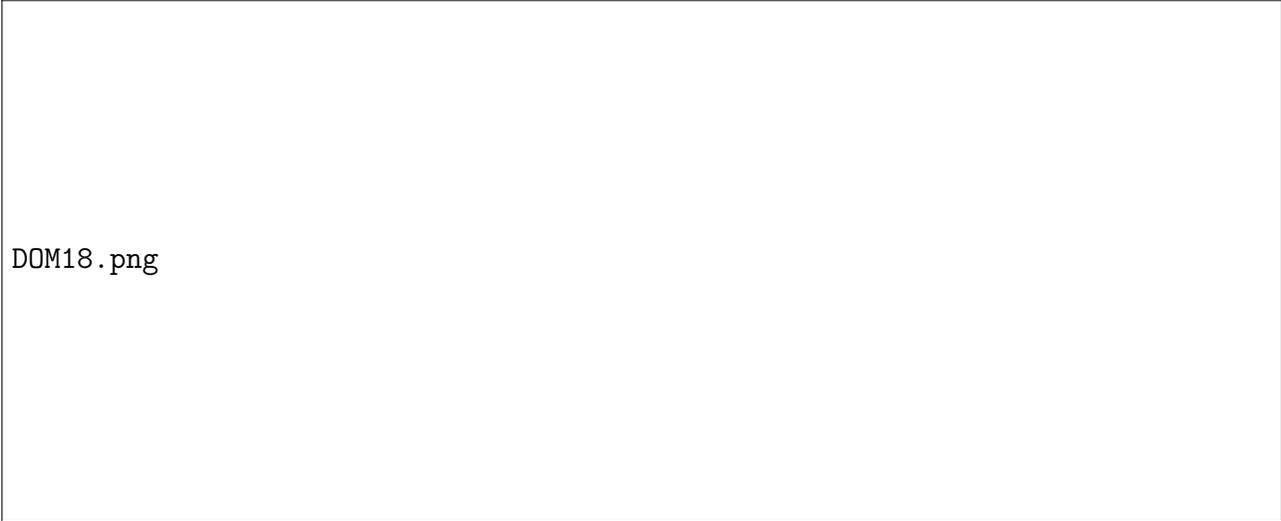


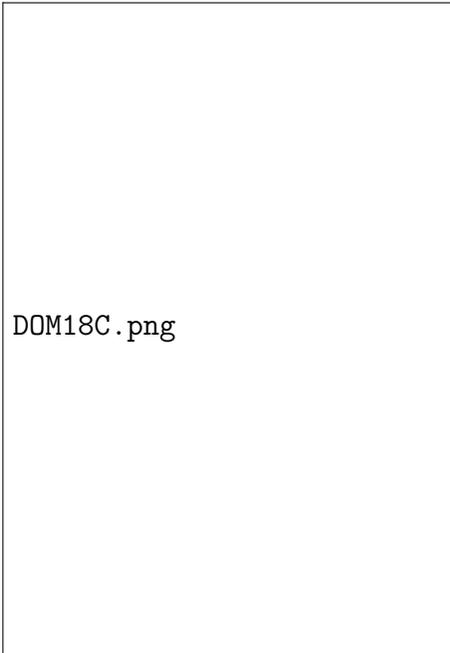
Figura 5.21: Vista explosionada y de sección del ensamble de CAM5 y CAM6 con el detector colocado.

El ensamble de CAM5 y CAM6 también cuenta con una brida que se ensambla al barril de la cámara, los anillos de CAM5 y CAM6 son de titanio y aluminio respectivamente y en la parte frontal se ensambla con otra brida en la que se coloca el detector. Esta superficie de contacto con el detector tiene un requisito de planicidad de 20 micras, ya que es la superficie de referencia de todo el sistema óptomecánico. Los barrenos M5 avellanados que tiene están colocados con precisión para garantizar la alineación del CCD sin importar la holgura que tengan los barrenos del mismo.



DOM18.png

Figura 5.22: Ensamble con vista de sección de CAM5 y CAM6 con el detector colocado.

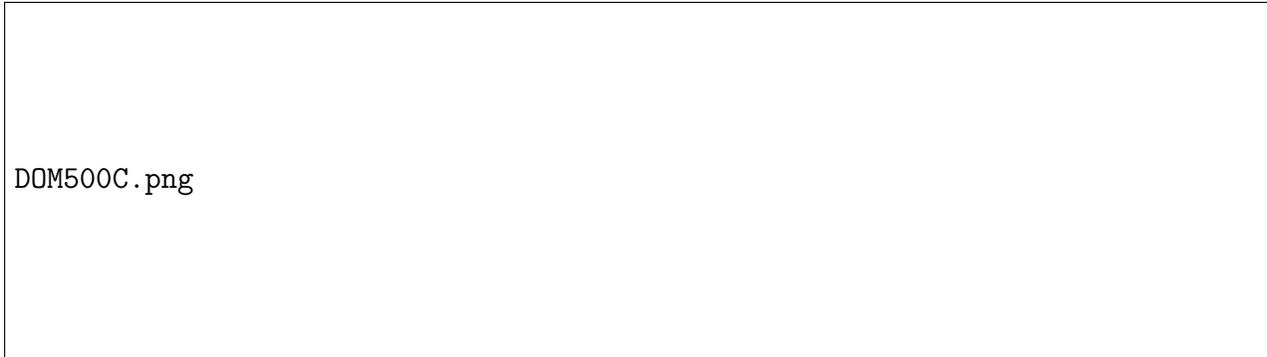


DOM18C.png

Figura 5.23: Vista mas detallada del ensamble con el detector.

5.2.8. Ensamble completo del barril de la cámara

El ensamble completo del barril de la cámara consta de los últimos 4 ensambles descritos anteriormente, estos ensambles se atornillan a un barril con bridas y separadores que posicionan el conjunto de componentes ópticos en su respectiva posición. Para el barril se busco que fuese de un diámetro que minimizara las flexiones, ocasionadas por el peso que pudieran tener los posibles instrumentos futuros que se le colocarán, cuenta además con agujeros pasados que permiten el acceso de herramienta para hacer el ajuste lateral del elemento compensador.



DOM500C.png

Figura 5.24: Vista explosionada del ensamble completo del barril de la cámara con el detector colocado.

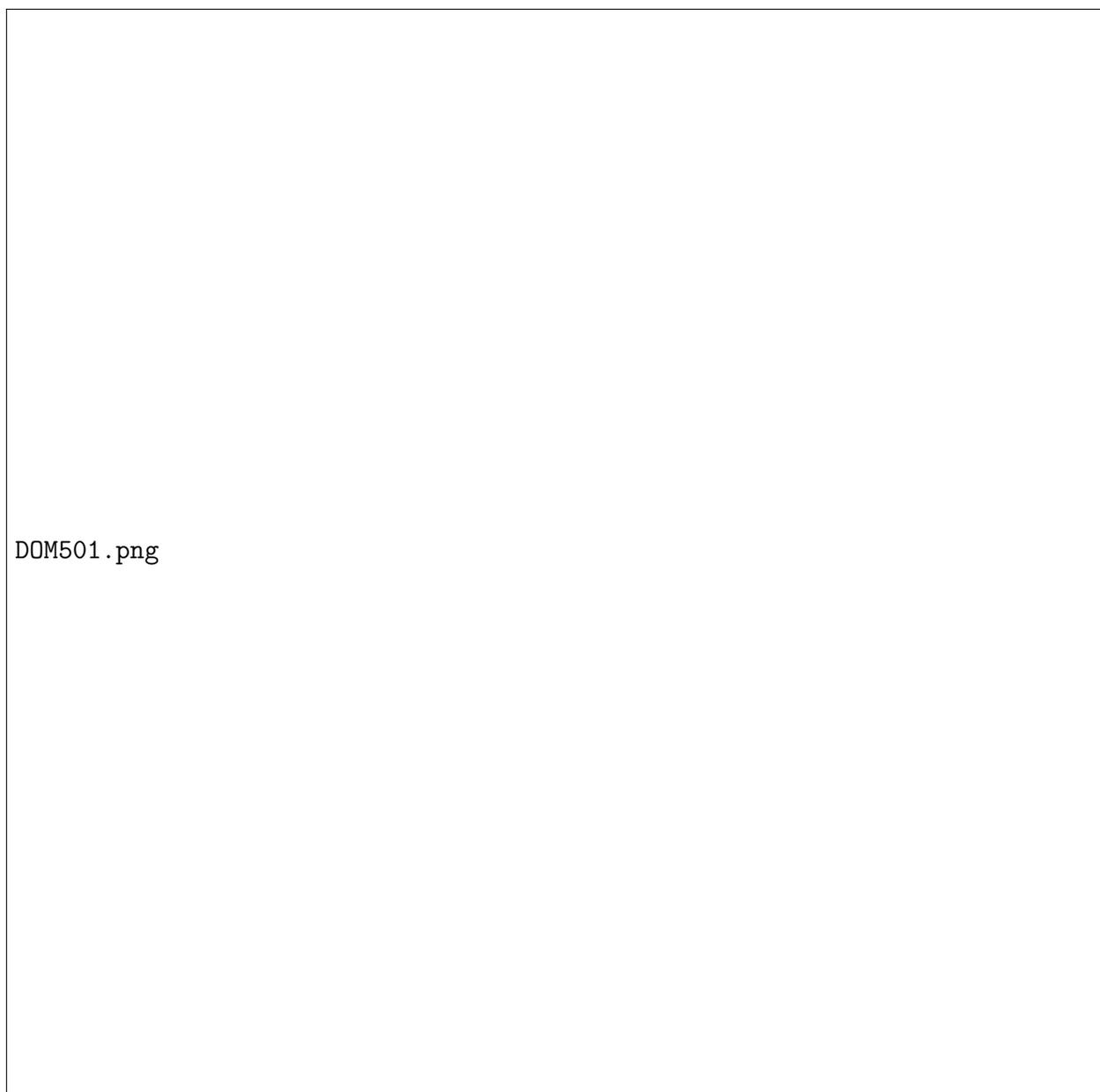


Figura 5.25: Ensamble completo del barril de la cámara con vista de sección con el detector colocado.

5.2.9. Propiedades físicas de los materiales utilizados en el ensamble

En la siguiente tabla se resumen las propiedades físicas mas relevantes de los materiales tanto ópticos como mecánicos que conforman el reductor focal.

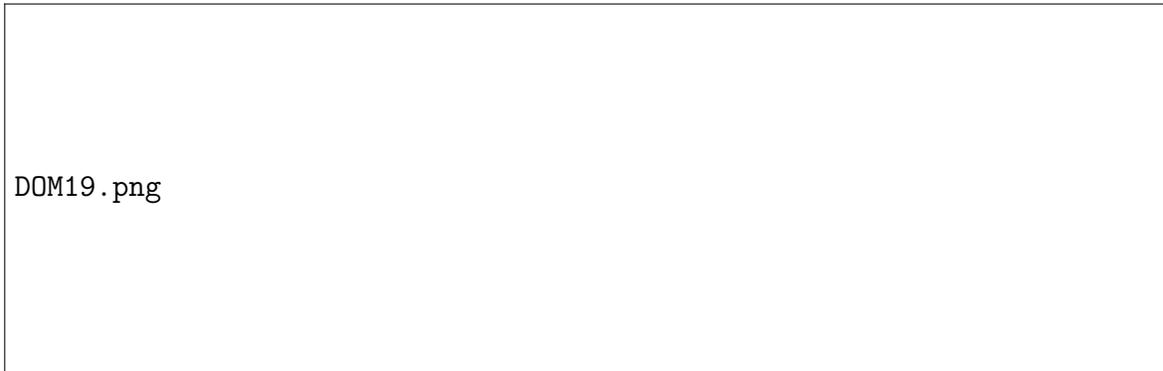


Figura 5.26: Algunas propiedades físicas de los materiales ópticos y mecánicos del reductor focal.

5.3. Análisis estructural y resultados de las simulaciones de elementos finitos

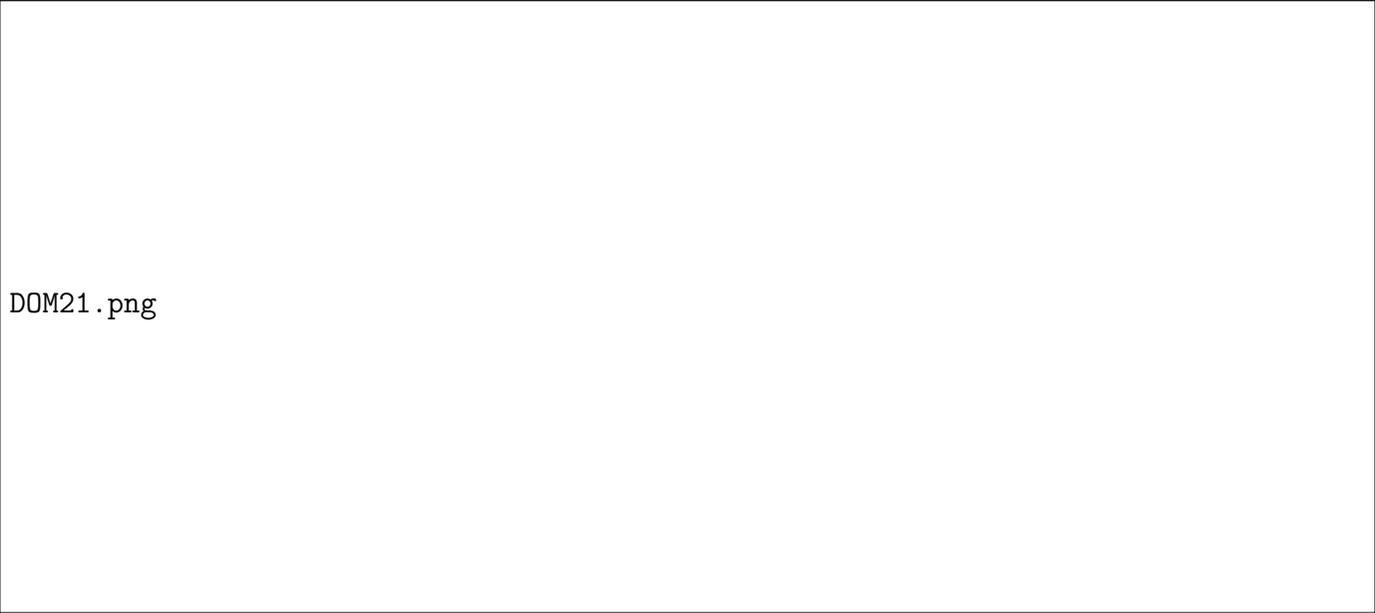
En esta sección se muestran los resultados que validan la eficiencia del sistema mecánico, tanto para mantener los componentes ópticos en su respectiva posición como su integridad física. Como temperatura inicial de referencia para el análisis se tomó la temperatura promedio del taller de Cananea donde se ensamblará el reductor focal ($18^{\circ}C$).

Para el intervalo de temperatura máxima y mínima de supervivencia de los componentes ópticos del reductor, se tomaron 5 grados por encima de los limites proporcionados por el equipo de OAGH, lo anterior para tener un buen margen de seguridad en el diseño ($30^{\circ}C$, $-15^{\circ}C$ respectivamente). Cabe mencionar que solo para el análisis de las flexiones no se tomo en cuenta el intervalo de temperaturas a la que puede estar expuesto el reductor, ya que no es relevante para ese análisis, por lo que la temperatura en los resultados mostrados a continuación se mantiene fija ($18^{\circ}C$).

5.3.1. Flexiones de la estructura

El análisis de flexiones fue realizado con simulaciones estáticas del programa de diseño, para todas las simulaciones se utilizaron uniones rígidas en todos los contactos entre las caras de los componentes, colocando como superficie fija la cara superior de la brida circular que será atornillada al telescopio, la fuerza que actúa en estas simulaciones es la gravedad orientada en 3 posiciones del telescopio que son resaltables para la cuestión observacional: En la primera se supone que el telescopio observa directamente hacia el zenit, en la segunda que el telescopio observa inclinado 90 grados respecto al zenit y en la tercera que el telescopio observa a un ángulo de 60 grados respecto al zenit que es el ángulo máximo al que se observa comúnmente.

Para facilitar la simulación se simplificó el ensamble y se colocó un elemento cilíndrico de apoyo que simula el peso del detector, en todas las figuras de este análisis se puede observar el estrés de Von Mises en [MPa] en el ensamble debido a las flexiones en la estructura, junto con los desplazamientos máximos en [mm] de los componentes ópticos del sistema por causa de estas mismas flexiones en la estructura, este estrés y/o desplazamientos se ilustra de un color diferente según sea el valor del parámetro en la escala, los resultados se muestran para las distintas posiciones de observación del telescopio mencionadas.



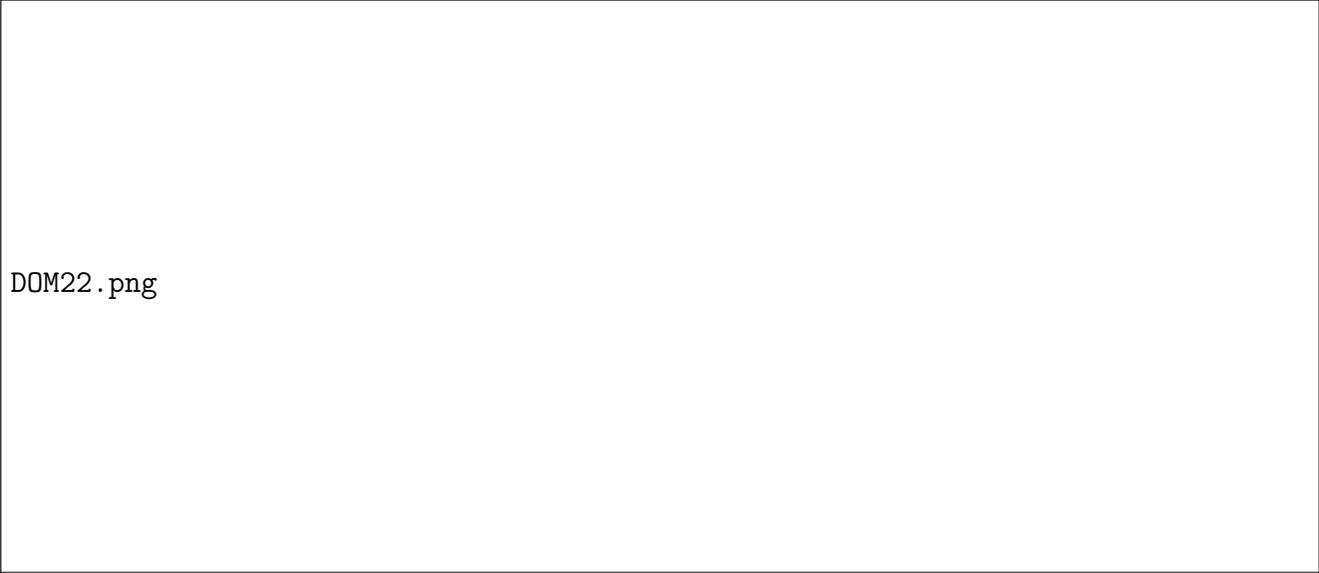
DOM21 . png

Figura 5.27: Estrés a) y desplazamientos; b) causados por el peso del sistema con el telescopio apuntando al zenit.



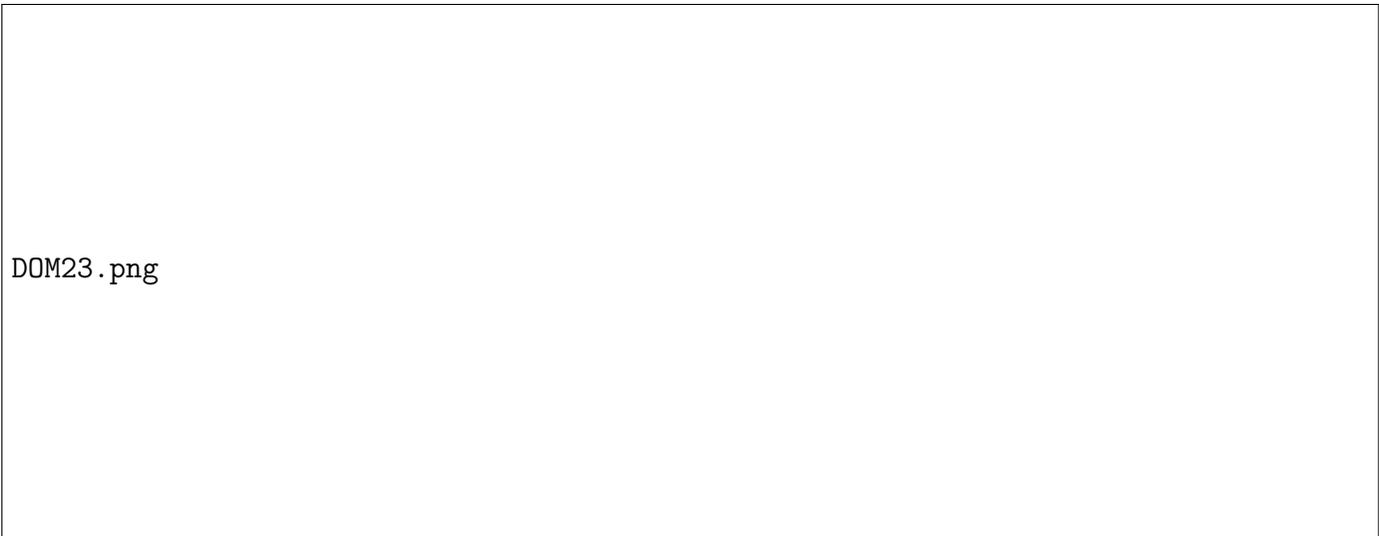
DOM20.png

Figura 5.28: Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 90 grados respecto al zenit con inclinación trasera del reductor.



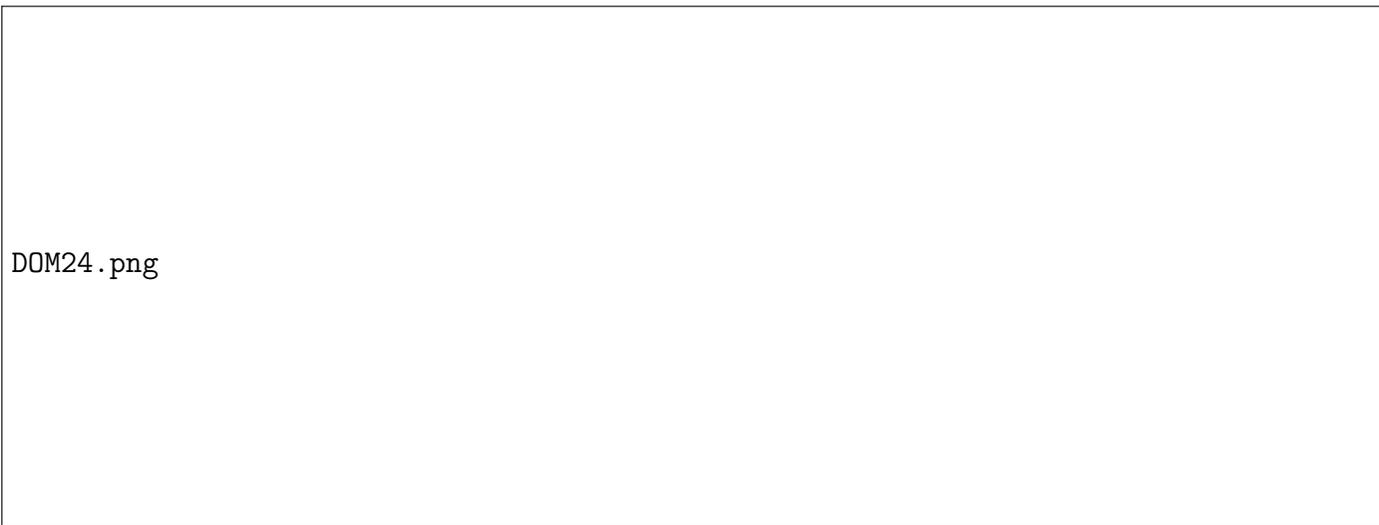
DOM22.png

Figura 5.29: Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 90 grados respecto al zenit con inclinación frontal del reductor.



DOM23.png

Figura 5.30: Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 90 grados respecto al zenit con inclinación lateral del reductor.



DOM24.png

Figura 5.31: Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 60 grados respecto al zenit con inclinación trasera del reductor.

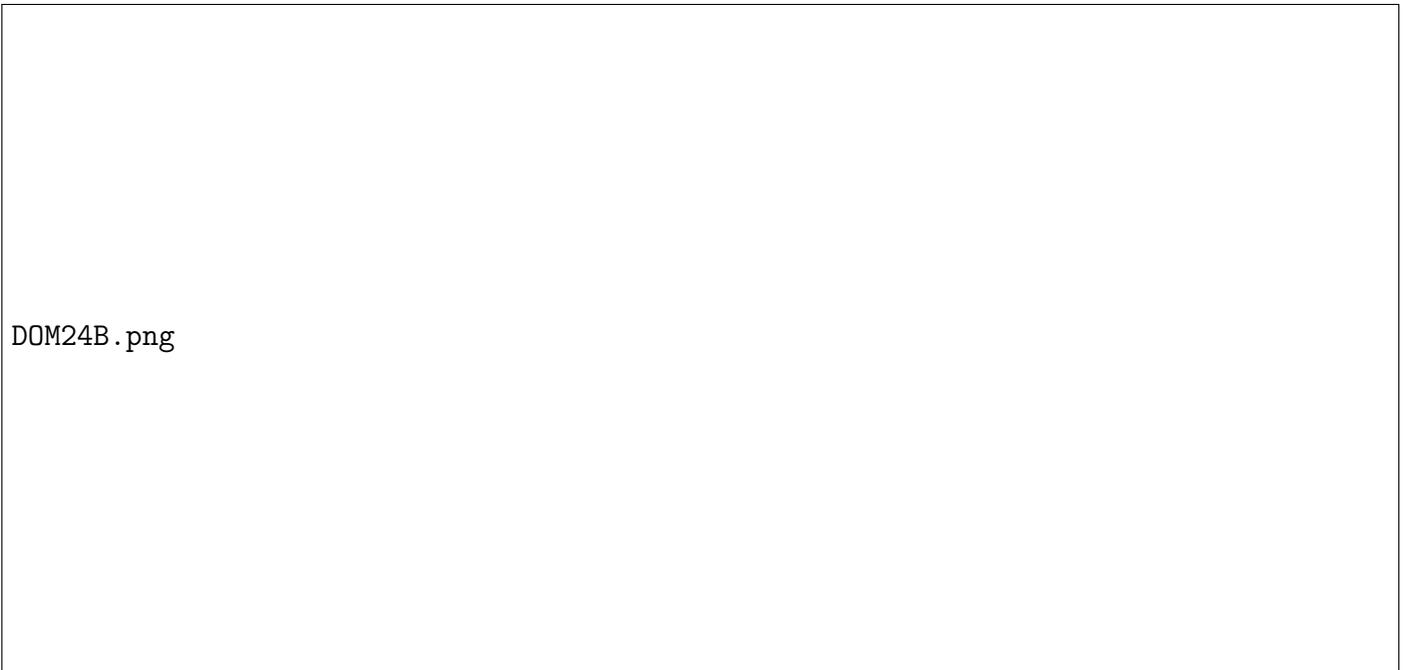


Figura 5.32: Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 60 grados respecto al zenit con inclinación frontal del reductor.

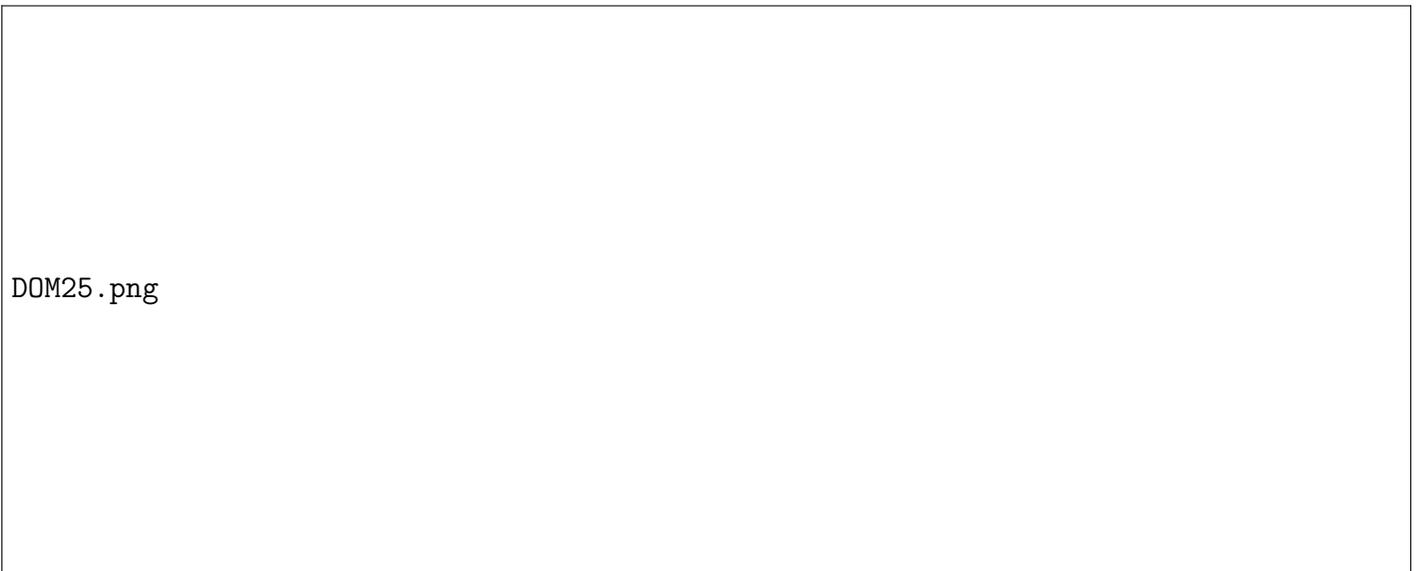


Figura 5.33: Estrés a) y desplazamientos b) causados por el peso del sistema, con el telescopio apuntando 60 grados respecto al zenit con inclinación lateral del reductor.

Adicionalmente se hizo una simulación en la que se agrego una restricción fija en la tapa trasera del cubo del espejo inclinado M1, esto para analizar cual es la flexión solo del barril de la cámara. Esta flexión es importante a conocer porque si recordamos en nuestro análisis de tolerancias, tomamos

en cuenta correlacionandamente a todos los demás posibles errores de ensamble, la flexión solo del barril de la cámara, esta flexión no debía de ser mayor a 1 minuto de arco a diferencia de la tolerancia en la flexión de todo el sistema que era del doble, podemos observar los resultados de esta simulación en la figura 5.34.

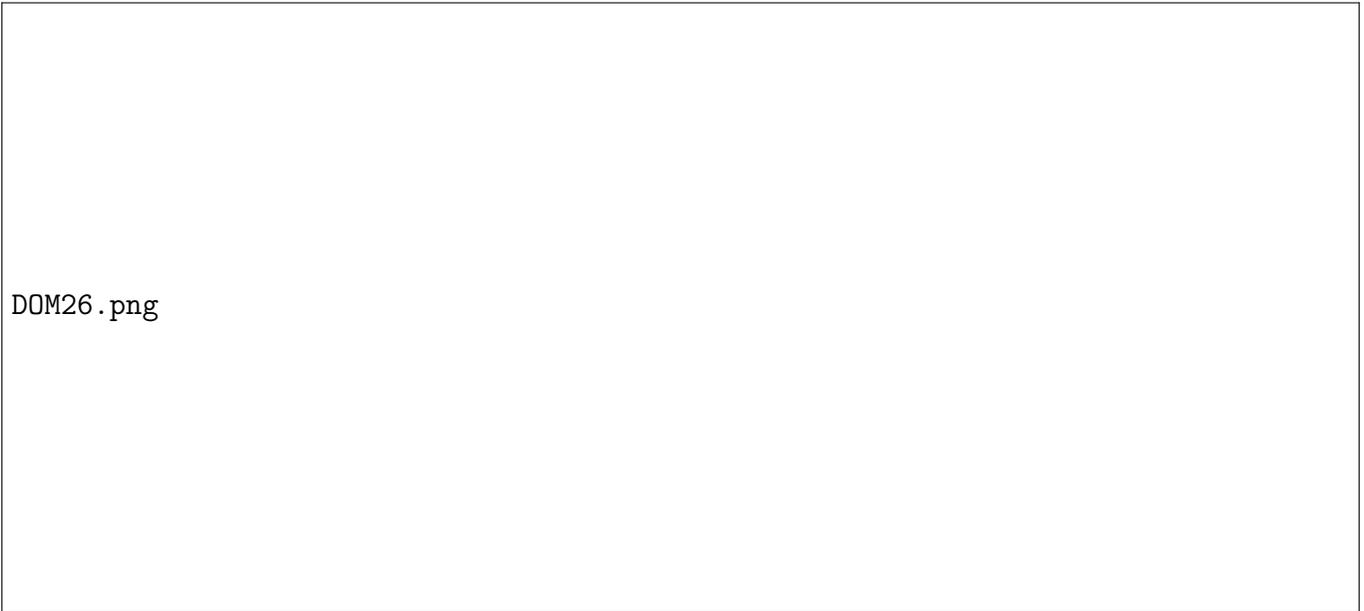


Figura 5.34: Estrés a) y desplazamientos b) de la flexión solo del barril de la cámara, causado por el peso del sistema cuando el telescopio apunta hacia el zenit.

las simulaciones muestran que el estrés en el ensamble está muy por debajo de valores que podrían dañar la estructura del reductor y los desplazamientos son tan pequeños que no afectan el funcionamiento del sistema con el CCD montado en el mismo, porque no se deforma el ensamble en una inclinación mayor a la permitida (Usando las distancias entre los componentes mencionadas en el capítulo anterior en la figura 4.43 y obteniendo el ángulo de inclinación). Haciendo los cálculos aproximados utilizando las dimensiones máximas de las separaciones de los componentes ópticos en la estructura, se puede aproximar que para que el sistema no rebace el ángulo de inclinación permitido en las flexiones del mismo, el último elemento de la óptica (CAM6) no debe presentar desplazamientos mayores a 432 micras y 119 micras solo en la deformación del barril de la cámara.

Con este límite se hicieron las simulaciones que nos permitieron definir el peso máximo sugerido para montar en la estructura, sin el riesgo de que ésta presente flexiones que degraden la calidad del sistema, los resultados mostraron que el sistema puede mantener una buena alineación con un peso de carga adicional de 80 kg, no obstante, se debe tener en cuenta que en esta simulación los contactos que sujetan la estructura son ideales e involucran toda una cara de los elementos, en la práctica realmente el ensamble está sostenido por una cantidad definida de tornillos, así que, para evitar algún daño o mal funcionalidad en el sistema, se recomienda no superar este peso en algún instrumento que se quiera implementar junto con este reductor focal.

Peso de la estructura optomecánica	67 kg
Peso del detector	3.7 kg
Peso total del instrumento	70.7 kg
Capacidad de carga de la estructura para acoplar algún otro instrumento	80 kg

Tabla 5.1: Datos técnicos relevantes para la implementación del instrumento.

En la siguiente tabla se resumen los mismos resultados de las simulaciones mostrados anteriormente pero cuando el sistema esta cargando un peso de 80 kg :

Estrés y desplazamientos máximos		
Inclinación del telescopio	Estrés máximo [MPa]	Desplazamiento máximo [μm]
0° zenit	27.11	250
90° trasero	15.80	189
90° frontal	15.80	189
90° lateral	18.18	237
60° trasero	27.23	288
60° frontal	4.59	51.5
60° lateral	24.72	241
0° barril de cámara	6.982	34.69

Tabla 5.2: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés [MPa] y desplazamientos [μm] máximos en la estructura cargando 80 kg.

Elemento flexionado	Inclinación máxima permitida	Inclinación máxima con peso de 80 kg
Sistema completo	2 minutos de arco	1.32 minutos de arco
Barril de la cámara	1 minuto de arco	0.288 minutos de arco

Tabla 5.3: Comparación entre las flexiones permitidas en la estructura y las obtenidas sujetando el peso máximo establecido en la posición de detector.

5.3.2. Estrés y desplazamientos en la óptica a causa de los efectos térmicos de los materiales del sistema optomecánico

Para realizar las simulaciones de los efectos térmicos del ensamble se separaron las mismas validando el estrés radial y axial en los elementos de manera individual, debido a que el tipo de ensamble de los elementos ópticos es idéntico en todos los elementos, las simulaciones hechas se hicieron de la misma manera para cada componente. El objetivo de este análisis era asegurar que el modelo estuviese libre de un estrés que pudiera dañar algún componente, verificar si existía birrefringencia por tensión en el área efectiva de la óptica que pudiese degradar la funcionalidad del sistema y validar que los desplazamientos en los componentes estén dentro de la tolerancia definida para mantener la eficiencia del diseño. Para lograrlo se simularon todas las maneras mas relevantes en

el que los componentes pudiesen presentar algún tipo de estrés o desalineación, ya sea solo por el ensamble de los mismos o los efectos térmicos.

En todos los resultados de las simulaciones de estrés y desplazamientos se observa inicialmente el estrés y desplazamiento que puede tener el elemento óptico a la temperatura de referencia o temperatura de ensamble, ya que debemos recordar que el ensamble ya está generando de por sí un estrés para sujetar dicho componente en su posición, después, se muestra la variación de estos parámetros cuando el sistema se encuentra ya ensamblado en los límites del intervalo de temperaturas a las que podría estar expuesto el mismo.

Estrés radial

El estrés radial en los componentes ópticos es causado por los anillos que actúan como soporte radial, ya que ejercen estrés en los elementos ópticos al variar la temperatura, lo anterior debido a la diferencia de CTE de los materiales, además, el anillo sostiene inicialmente al componente antes de colocar las tapas de soporte axial con un pegamento epoxídico scotch weld 2216, por todo lo anterior se simuló el estrés en los elementos ópticos separando estas simulaciones en 3 diferentes tipos de estudio estático:

1. Estrés en la superficie de contacto del elemento óptico sujetado por el anillo con pegamento.
2. Estrés radial del elemento óptico por la tensión causada por la diferencia de CTE de los materiales.
3. Estrés radial del elemento óptico por la presión causada por la diferencia de CTE de los materiales.

Para ejemplificar estos estudios estáticos se utilizará la simulación hecha para la celda individual del doblete CAM1 Y CAM2, en la figura 5.35 se puede observar el modelo 3D usado para estos análisis estáticos.



Figura 5.35: Modelo 3D usado para la simulación del estrés radial en el componente óptico CAM1 y CAM2.

Para el primer análisis la superficie fija se colocó en la base de la celda de aluminio, el contacto del lente con la base del asiento se colocó como de no penetración y los demás como unión rígida, para este análisis en particular se supuso el peor de los casos en el que el ensamble experimentaría el máximo estrés, con la gravedad actuando en el ensamble como se ve en la figura 5.36. Aunque es poco probable que las personas que ensamblaran este instrumento lo hagan en esta posición, el análisis muestra si los anillos son capaces de sostener el elemento por si mismo.

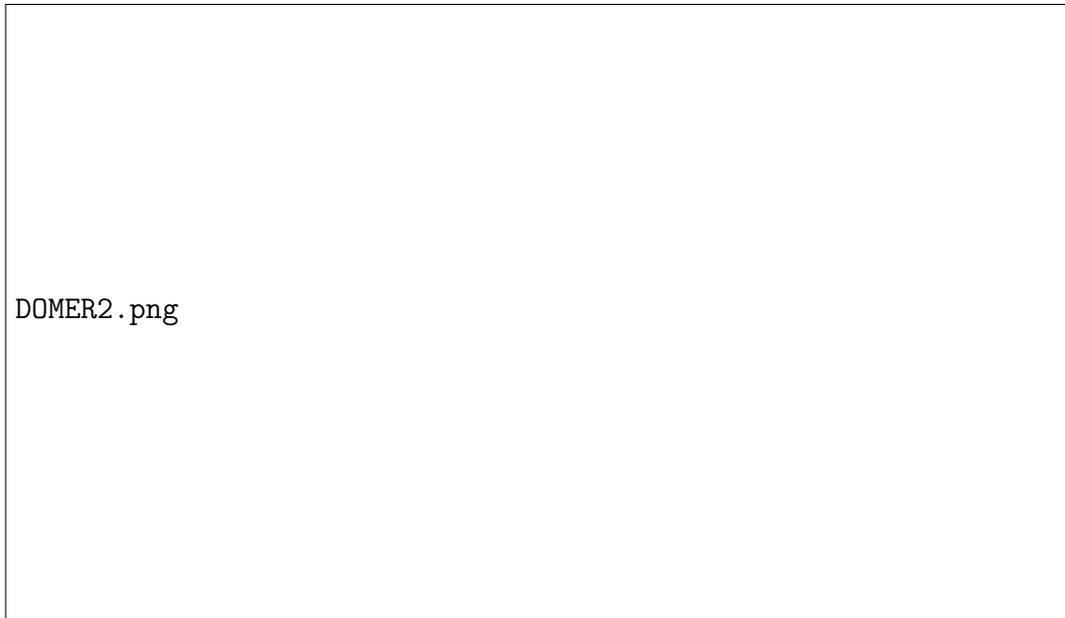


Figura 5.36: Orientación de la gravedad en el Modelo 3D de la simulación de estrés radial en el componente óptico CAM1 y CAM2.

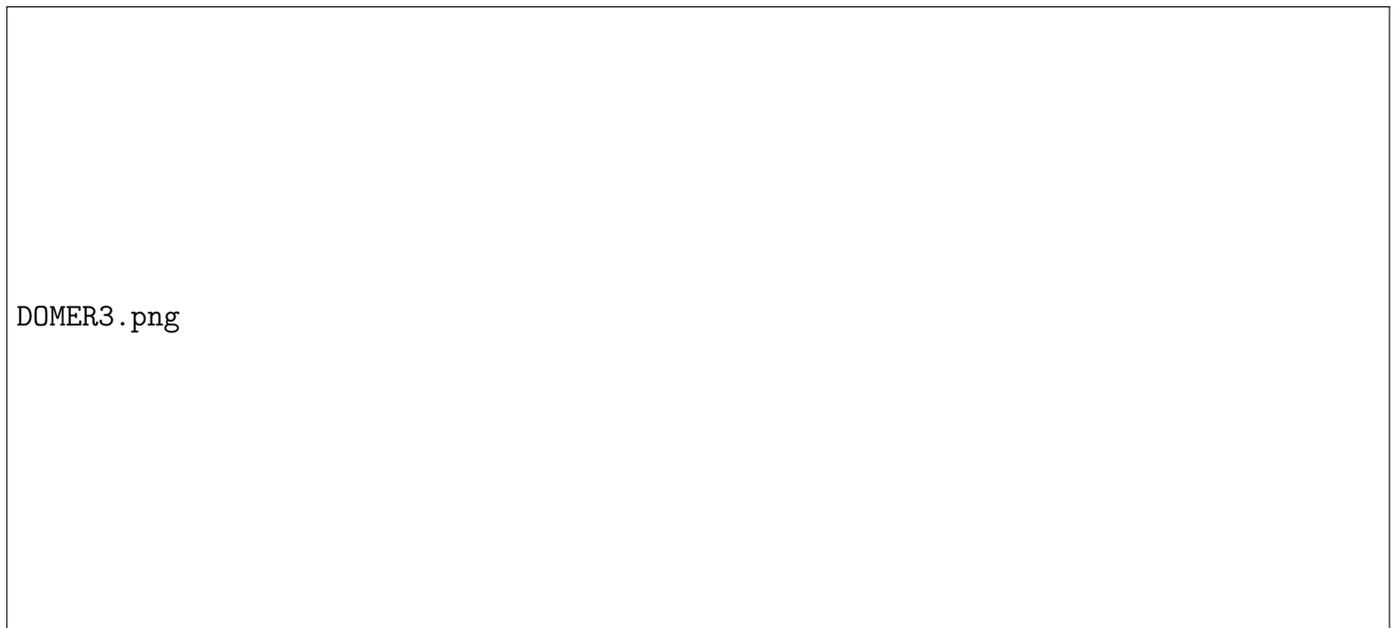


Figura 5.37: Resultado de la simulación de elementos finitos del estrés radial [MPa], causada por solo el ensamble del componente óptico CAM1 y CAM2: a) estrés en todo el ensamble b) estrés solo en el componente óptico.

Estrés radial A 18°C	
Elemento óptico	Estrés máximo
COL1 COL2	0.382
M1	0.416
CAM1 CAM2	0.581
CAM3	0.379
CAM4	0.419
CAM5	0.403
CAM6	0.256

Tabla 5.4: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés radial [MPa], en los componentes ópticos a 18°C causado por su ensamble.

Para el segundo estudio estático se colocaron los componentes a una temperatura de 30°C, se utilizaron unas restricciones avanzadas para poder simular la correcta expansión térmica de los materiales en todas las direcciones y de igual manera el contacto de la lente con su aciento en la celda se colocó como de no penetración, manteniendo los demás como unión rígida.

DOMER4.png

Figura 5.38: Resultados de la simulación de elementos finitos del estrés radial [MPa], causado por la dilatación térmica de los materiales a 30°C: a) estrés en todo el ensamble; b) estrés solo en el componente óptico CAM1 Y CAM2.

Estrés radial A 30°C	
Elemento óptico	Estrés máximo
COL1 COL2	3.284
M1	3.449
CAM1 CAM2	3.457
CAM3	3.354
CAM4	3.695
CAM5	3.362
CAM6	3.298

Tabla 5.5: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés radial [MPa], en los componentes ópticos a causa de la dilatación térmica de los materiales a 30°C.

Por último el tercer estudio fue hecho idénticamente al anterior solo que la temperatura del ensamble se colocó en -15 grados.

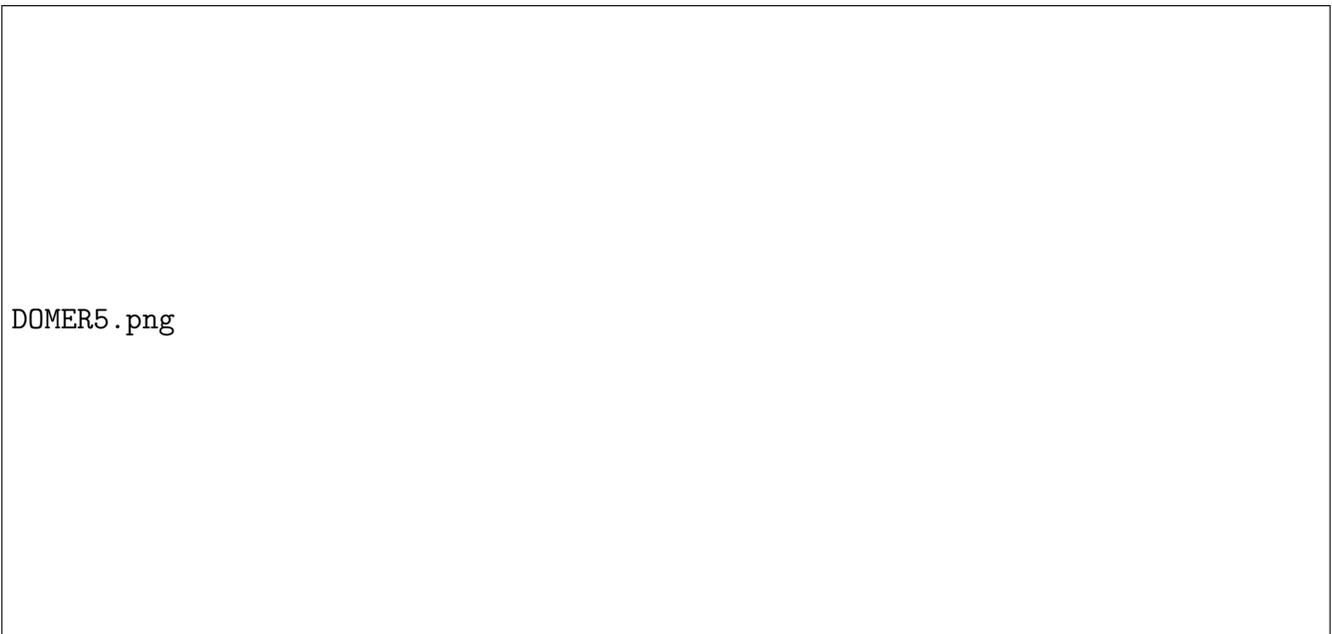


Figura 5.39: Resultados de las simulación de elementos finitos del estrés radial [MPa], causado por la dilatación térmica de los materiales a -15°C: a) estrés en todo el ensamble b) estrés solo en el componente óptico CAM1 Y CAM2.

Estrés radial A $-15^{\circ}C$	
Elemento óptico	Estrés máximo
COL1 COL2	8.946
M1	9.573
CAM1 CAM2	9.064
CAM3	9.209
CAM4	10.016
CAM5	9.245
CAM6	9.069

Tabla 5.6: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés radial [MPa], en los componentes ópticos a causa de la compresión térmica de los materiales a $-15^{\circ}C$.

Estrés axial

Para la simulación de estrés axial de igual forma que para el estrés radial se realizaron 3 diferentes estudios estáticos con condiciones específicas para cada uno, en esta simulación se enfocaron de la siguiente manera:

1. Estrés en el componente óptico causado por la presión del O-ring y la tapa de sujeción axial con el asiento del lente.
2. Estrés axial causado por la diferencia de CTE en los materiales del ensamble a 30 grados.
3. Estrés axial causado por la diferencia de CTE en los materiales del ensamble a -15 grados.

Para el primer estudio se utilizó el modelo ilustrado en la figura 5.40, los contactos fueron en su mayoría de sin penetración y de unión rígida en las interfaces lente-celda, tapa-celda y O-ring-tapa, para la interfaz lente-O-ring se utilizó un tipo de contacto especial para O-ring que viene como opción de tipo de contacto en el software llamado Shrink Fit, el componente óptico fue restringido con una sujeción especial respecto a su eje para evitar desplazamientos ajenos a la presión axial en el elemento, dejando como superficie fija la base de la celda de aluminio.

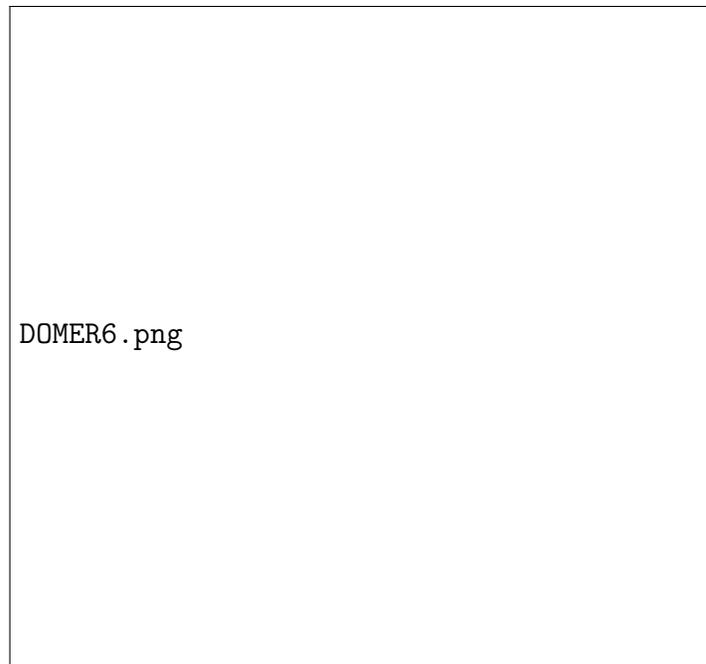


Figura 5.40: Modelo 3D usado para la simulación del estrés axial del componente óptico CAM1 y CAM2.

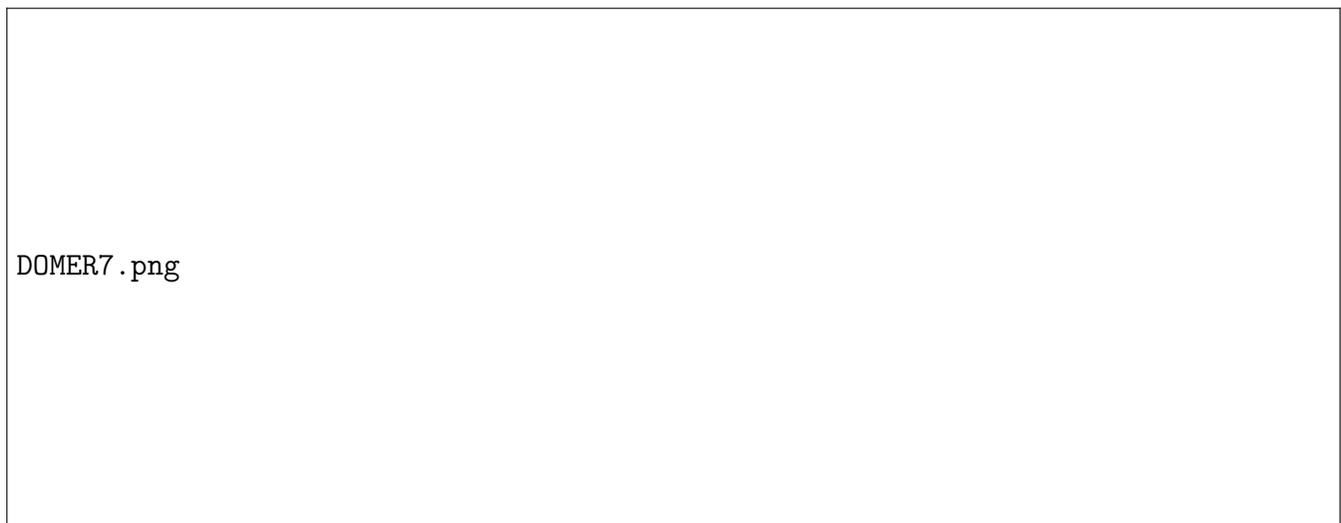


Figura 5.41: Resultado de la simulación de elementos finitos del estrés axial [MPa], causada por solo el ensamble del componente óptico CAM1 y CAM2: a) estrés en todo el ensamble; b) estrés solo en el componente óptico

Estrés axial A 18°C	
Elemento óptico	Estrés máximo
COL1 COL2	0.834
M1	1.736
CAM1 CAM2	1.741
CAM3	0.912
CAM4	0.969
CAM5	1.511
CAM6	0.322

Tabla 5.7: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés axial [MPa], en los componentes ópticos a 18°C causado por su ensamble.

Para el segundo análisis se utilizó la misma configuración en los puntos de contacto entre los elementos que en los de la simulación anterior, la única diferencia fue que ahora para el análisis se colocó los materiales del ensamble a 30°C, con restricciones especiales para este tipo de análisis de expansión térmica.

DOMER8.png

Figura 5.42: Resultados de las simulación de elementos finitos del estrés axial [MPa], en el componente óptico CAM1 y CAM2 a causa de la dilatación térmica de los materiales a 30°C: a) estrés en todo el ensamble; b) estrés solo en el componente óptico.

Estrés axial A 30°C	
Elemento óptico	Estrés máximo
COL1 COL2	0.967
M1	1.956
CAM1 CAM2	2.460
CAM3	2.400
CAM4	1.110
CAM5	1.744
CAM6	0.3662

Tabla 5.8: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés axial [MPa], en los componentes ópticos a causa de la dilatación térmica de los materiales a 30°C.

Por último el tercer estudio fue hecho como al anterior solo que la temperatura del ensamble se colocó en -15 grados.

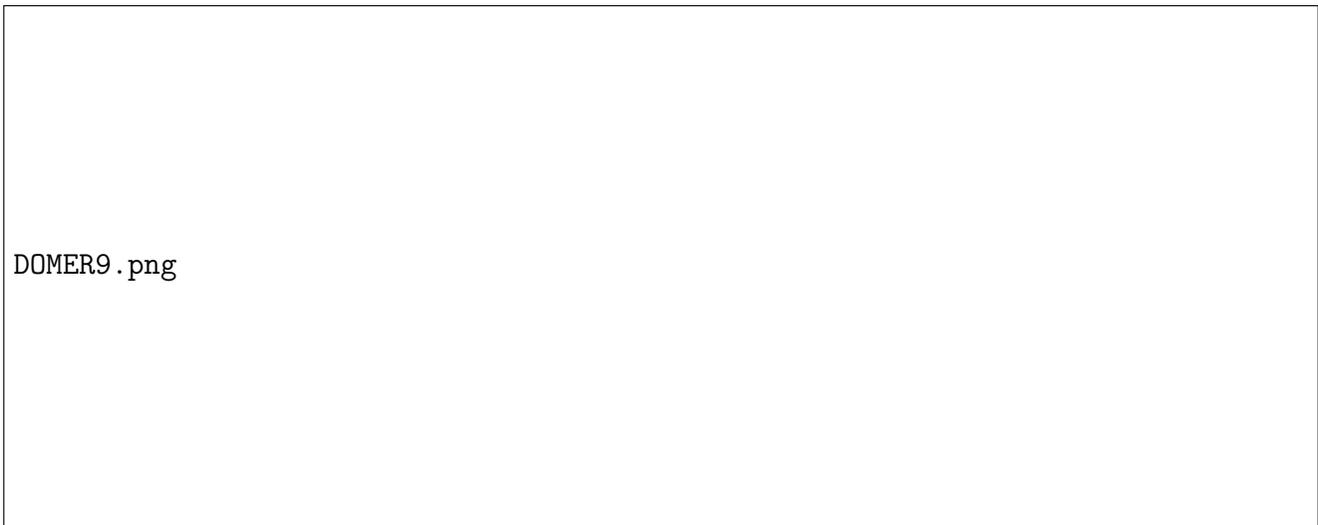


Figura 5.43: Resultados de las simulación de elementos finitos del estrés axial [MPa], en el componente óptico CAM1 y CAM2 a causa de la compresión térmica de los materiales a -15°C: a) estrés en todo el ensamble b) estrés solo en el componente óptico.

Estrés axial A $-15^{\circ}C$	
Elemento óptico	Estrés máximo
COL1 COL2	0.571
M1	1.089
CAM1 CAM2	2.077
CAM3	1.298
CAM4	0.7351
CAM5	1.573
CAM6	0.363

Tabla 5.9: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés axial [MPa], en los componentes ópticos a causa de la compresión térmica de los materiales a $-15^{\circ}C$.

Desplazamientos máximos de la óptica:

En estas tablas se recopilaron los desplazamientos máximos de los componentes ópticos de las simulaciones echas anteriormente, se separaron de igual manera en 3 conjuntos y se muestran estos desplazamientos respecto a cada eje del sistema de coordenadas cartesiano de cada elemento óptico por separado. Salta a la vista que estos desplazamientos son muy pequeños y no afectan la eficiencia del sistema, porque caen dentro del rango de tolerancia que se tiene para estos desplazamientos.

Desplazamientos en los componentes ópticos a 18 grados			
Elemento óptico	Δx	Δy	Δz
COL1 COL2	1.194	0.097	1.082
M1	1.221	0.160	0.020
CAM1 CAM2	0.011	0.503	1.363
CAM3	0.218	1.080	0.031
CAM4	0.353	1.668	0.039
CAM5	0.139	0.905	0.009
CAM6	0.020	0.842	0.022

Tabla 5.10: Desplazamientos máximos en los componentes ópticos, causado por el ensamble de los mismos en valores absolutos [μm].

Desplazamientos en los componentes ópticos a 30 grados			
Elemento óptico	Δx	Δy	Δz
COL1 COL2	8.879	3.743	3.606
M1	2.767	7.902	2.783
CAM1 CAM2	1.795	10.070	4.906
CAM3	4.330	1.834	4.669
CAM4	7.062	5.646	5.646
CAM5	16.560	1.625	1.696
CAM6	12.190	5.027	5.024

Tabla 5.11: Desplazamientos máximos en los componentes ópticos, causados por los efectos térmicos de los materiales del sistema optomecánico a una temperatura de 30 grados en valores absolutos [μm].

Desplazamientos en los componentes ópticos a -15 grados			
Elemento óptico	Δx	Δy	Δz
COL1 COL2	4.618	9.903	9.903
M1	7.618	6.425	7.656
CAM1 CAM2	4.933	6.443	5.025
CAM3	9.972	4.053	4.971
CAM4	17.470	15.552	15.553
CAM5	12.190	5.027	5.024
CAM6	12.180	13.800	13.810

Tabla 5.12: Desplazamientos máximos en los componentes ópticos, causados por los efectos térmicos de los materiales del sistema optomecánico a una temperatura de -15 grados en valores absolutos [μm].

Validación de ausencia de estrés que genere un efecto de birrefringencia en la superficie efectiva de la óptica:

Para este análisis también se utilizaron las simulaciones hechas anteriormente para calcular el estrés radial y axial de cada elemento óptico, pero se utilizó una herramienta del software etiquetada como Iso Clipping, esta herramienta es muy útil porque nos permite configurar los resultados arrojados por el software, para que éste nos muestre coloreada solo el área en donde están ciertos valores de estrés específicos.

Para el caso de estrés por birrefringencia se requiere un mínimo de estrés de 3.5 MPa para que este fenómeno pueda estar presente, desde la figura 5.44 hasta la figura 5.48 se muestran los resultados de esta simulación especial, podemos observar que los componentes están libres de un estrés que pueda generar un efecto de birrefringencia en su área efectiva, ya que las figuras expuestas son de la simulación que contiene un mayor estrés en los elementos, que es la del estrés radial a una temperatura de -15 grados, en estas simulaciones se observa que los niveles de estrés que pueden causar este efecto se encuentran solo en la superficie de dichos elementos sin penetrar hacia el área

efectiva de la óptica. Se utilizo las simulaciones de estrés radial a -15 grados por que es la que presenta mas estrés penetrando la superficie.

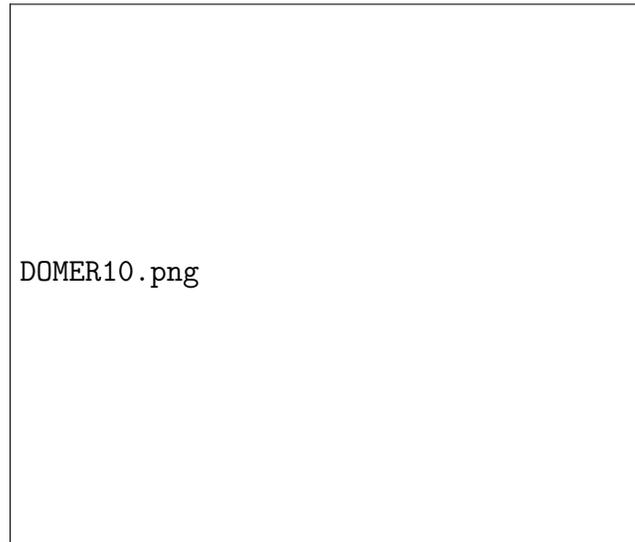


Figura 5.44: Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre COL1 y COL2, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente(estrés radial a -15 grados).

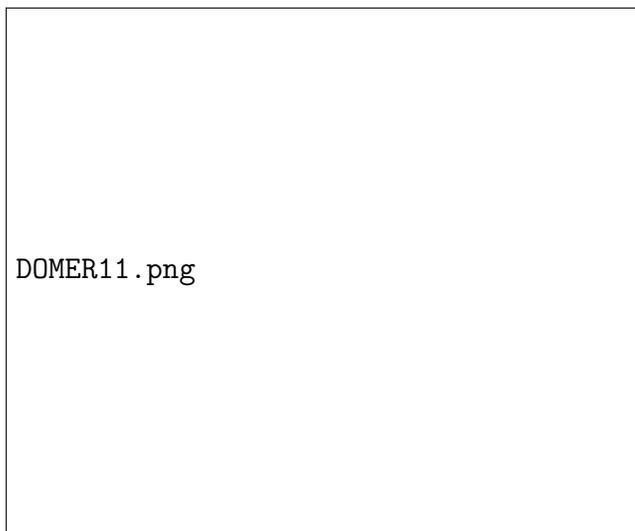


Figura 5.45: Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre M1, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente(estrés radial a -15 grados).

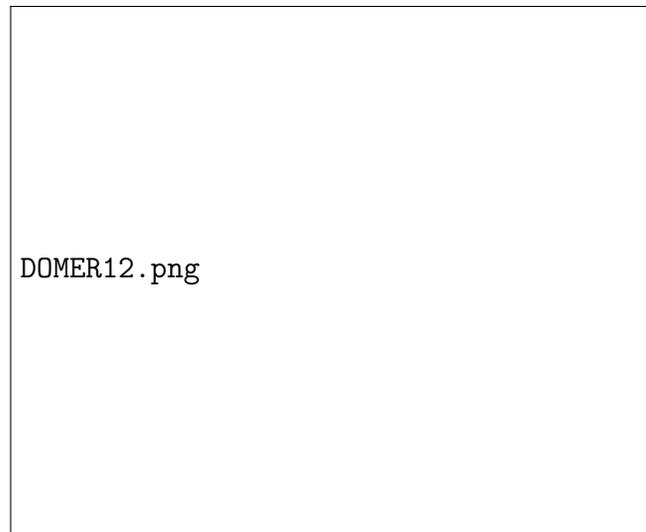


Figura 5.46: Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre CAM1 Y CAM2, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente(estrés radial a -15 grados).

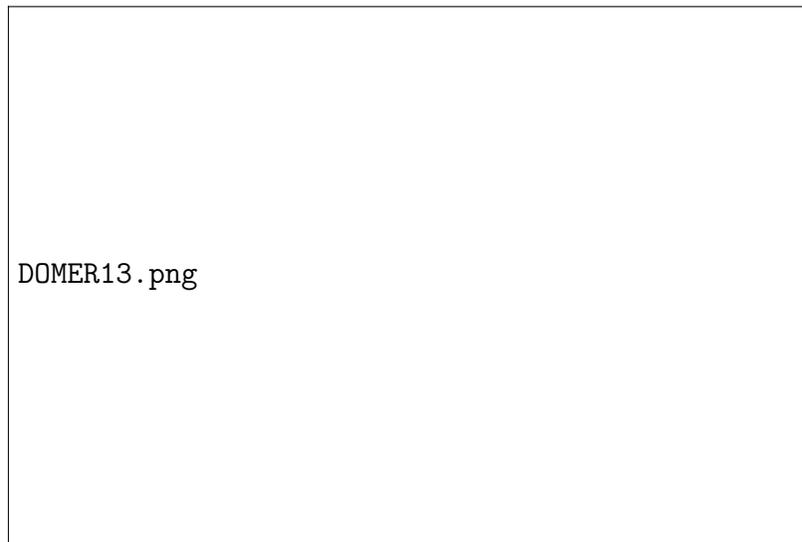


Figura 5.47: Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre CAM3 Y CAM4, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente(estrés radial a -15 grados).



Figura 5.48: Resultados de las simulaciones hechas para visualizar un estrés de 3.5 MPa o superior sobre CAM5 Y CAM6, que pudiese presentar birrefringencia en el área efectiva de la óptica, utilizando la simulación que presenta el mayor estrés de todas las simulaciones sobre dicho componente (estrés radial a -15 grados).

5.3.3. Validación del sistema de ajuste

Para simular el ajuste lateral del elemento compensador se colocó una pieza dummy que representa la celda individual de CAM1 y CAM2, se utilizaron contactos de restricción fija en donde se ensambla la brida y las condiciones de contacto se colocaron de la siguiente manera:

- dummy-brida → sin penetración.
- O-ring-tapa → unión rígida.
- O-ring-dummy → shrink fit.

Se aplicó una fuerza en los puntos de contacto del tornillo de ajuste con la celda móvil como se ve en la figura 5.49, la fuerza aplicada fue el equivalente a un tercio del peso máximo que puede resistir el tornillo antes de romperse ($8,5Kg/3 \approx 3Kg$ que fue obtenida de la página del fabricante) y como se ven los resultados en las figuras 5.50 y 5.51, el elemento compensador se desplaza en el rango de movimiento que se necesita según los resultados de la simulación Montecarlo.

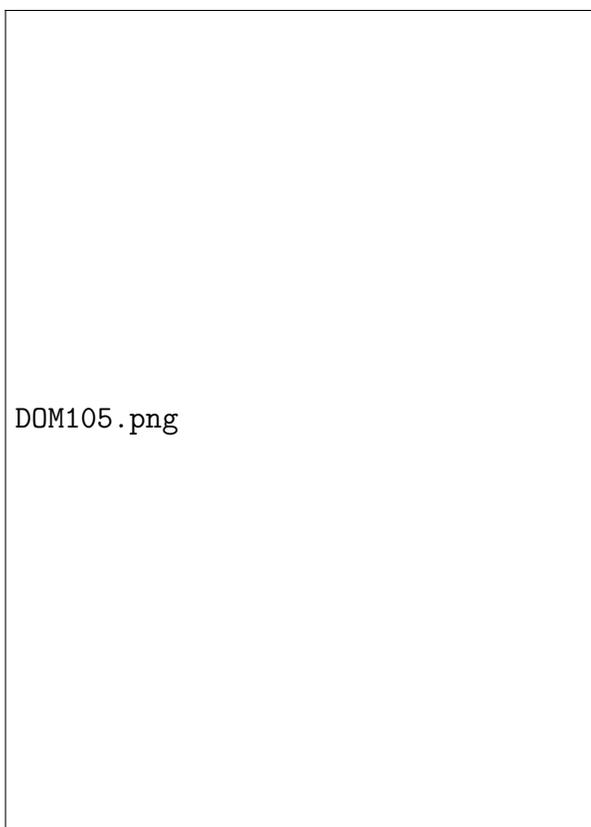


Figura 5.49: Fuerza de 30N aplicada en uno de los puntos de contacto del tornillo de ajuste.

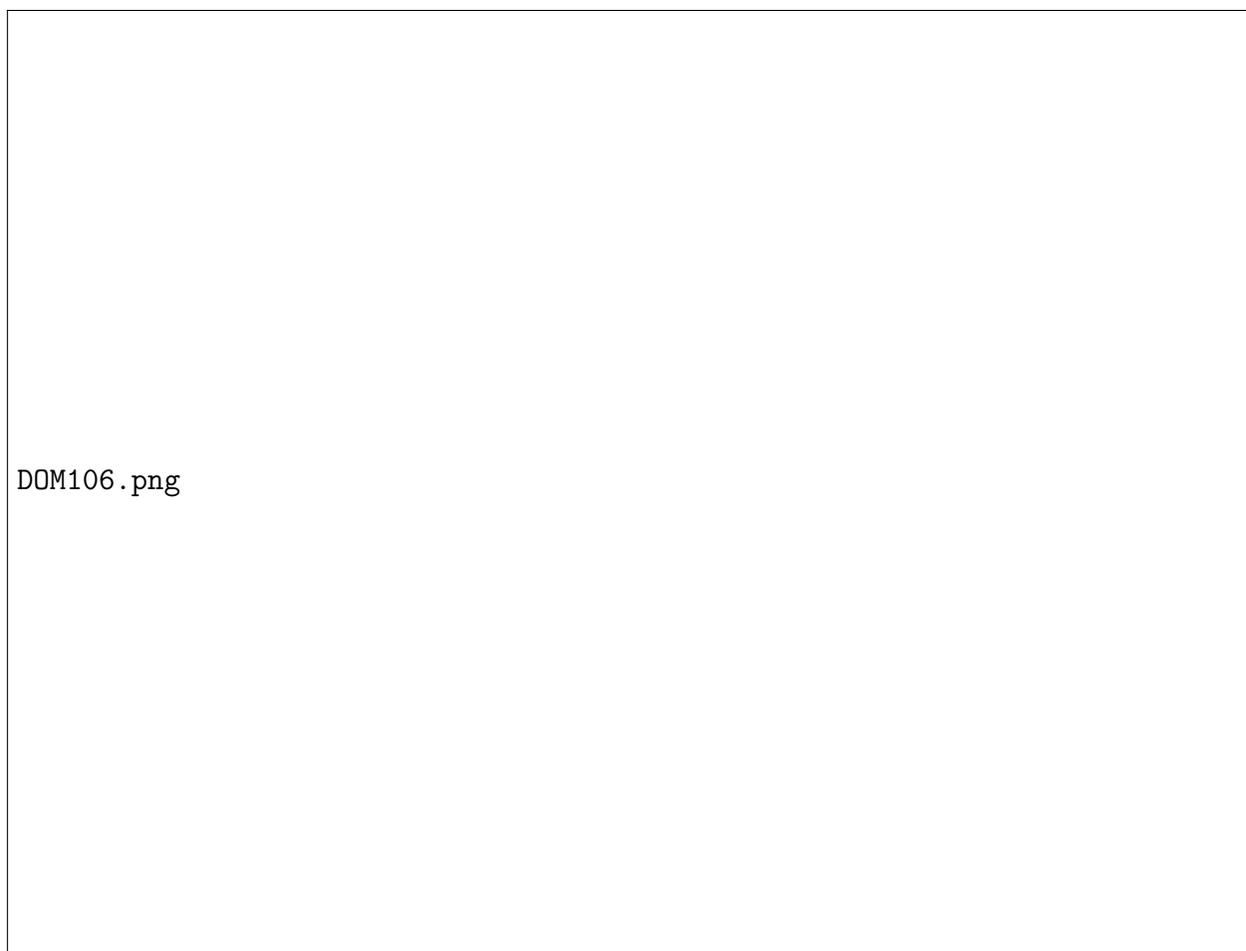


Figura 5.50: Estrés a) y desplazamientos; b) de la simulación del ajuste lateral del elemento compensador.

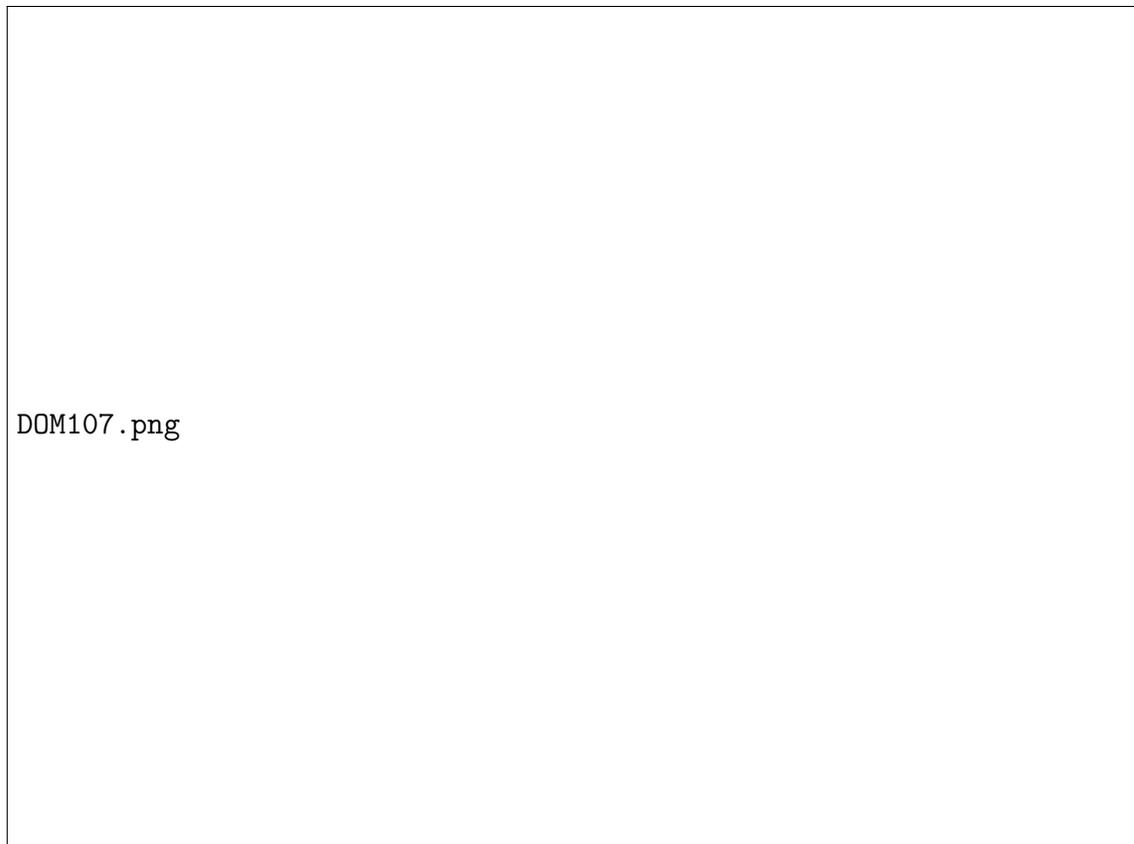


Figura 5.51: Estrés a) y desplazamientos; b) de la pieza dummy que representa la celda individual de CAM1 y CAM2.

Capítulo 6

Conclusiones

Para la obtención del diseño del reductor focal se hizo un análisis con sistemas que cubrían 10 y 8 minutos de arco inicialmente, debido a las limitaciones expuestas en el capítulo 4 y las necesidades en la calidad de imagen no fue posible lograr un sistema óptimo con alguna de estas características, por lo que el sistema final que se logró obtener cubre un campo de 6 minutos de arco. El diseño final tiene una muy buena calidad de imagen y esta capacidad de observación aun es satisfactoria para el interés científico del proyecto.

Este reductor focal convierte al telescopio de OAGH de un sistema $f/12$ a uno $f/3.6$, debido a esto la escala de placa se ve afectada y permite alcanzar una resolución de 0.355 segundos de arco por píxel en nuestro detector, con esta escala de placa se puede colocar el disco de seeing de hasta 1.4 arco segundos dentro de una matriz de 4×4 en el CCD, permitiendo un muestreo eficiente con el mismo, las especificaciones astronómicas mas relevantes y algunas de las características del sistema se pueden visualizar en la siguientes tablas y figuras.

Parámetros	Especificaciones
Razón focal de OAGH	12
Escala de placa OAGH	8.185 arcsec/mm
Razón focal con reductor	3.6
Escala de placa con reductor	0.355 arcsec/pix
Tamaño de píxel del CCD	13 μm
Píxeles activos en el CCD	1024 x 1024
Campo de visión en el CCD	6 minutos de arco
Tamaño de mancha (eje central)	1.626 μm (656.3 nm)
Tamaño de mancha ($r = 3$ arcmin)	4.404 μm (656.3 nm)
Intervalo espectral con mancha menor que seeing de 1 arcsec	370 nm a 960 nm

Tabla 6.1: Especificaciones del telescopio de 2.1 metros del OAGH y reductor focal.

Parámetros	Valores propuestos para el instrumento	Valores finales en el instrumento
Campo de visión	6 a 12 minutos de arco	6 minutos de arco
Rango espectral de operación	400 nm - 900 nm	370 nm - 960 nm
Escala de placa	0.5 segundos de arco por píxel (para un seeing = 1 segundo de arco)	0.355 segundos de arco por píxel (para un seeing = 1 segundo de arco)
Razón focal	2.5	3.6

Tabla 6.2: Comparación entre los parámetros elementales del reductor focal que debía tener y los que se obtuvieron finalmente.

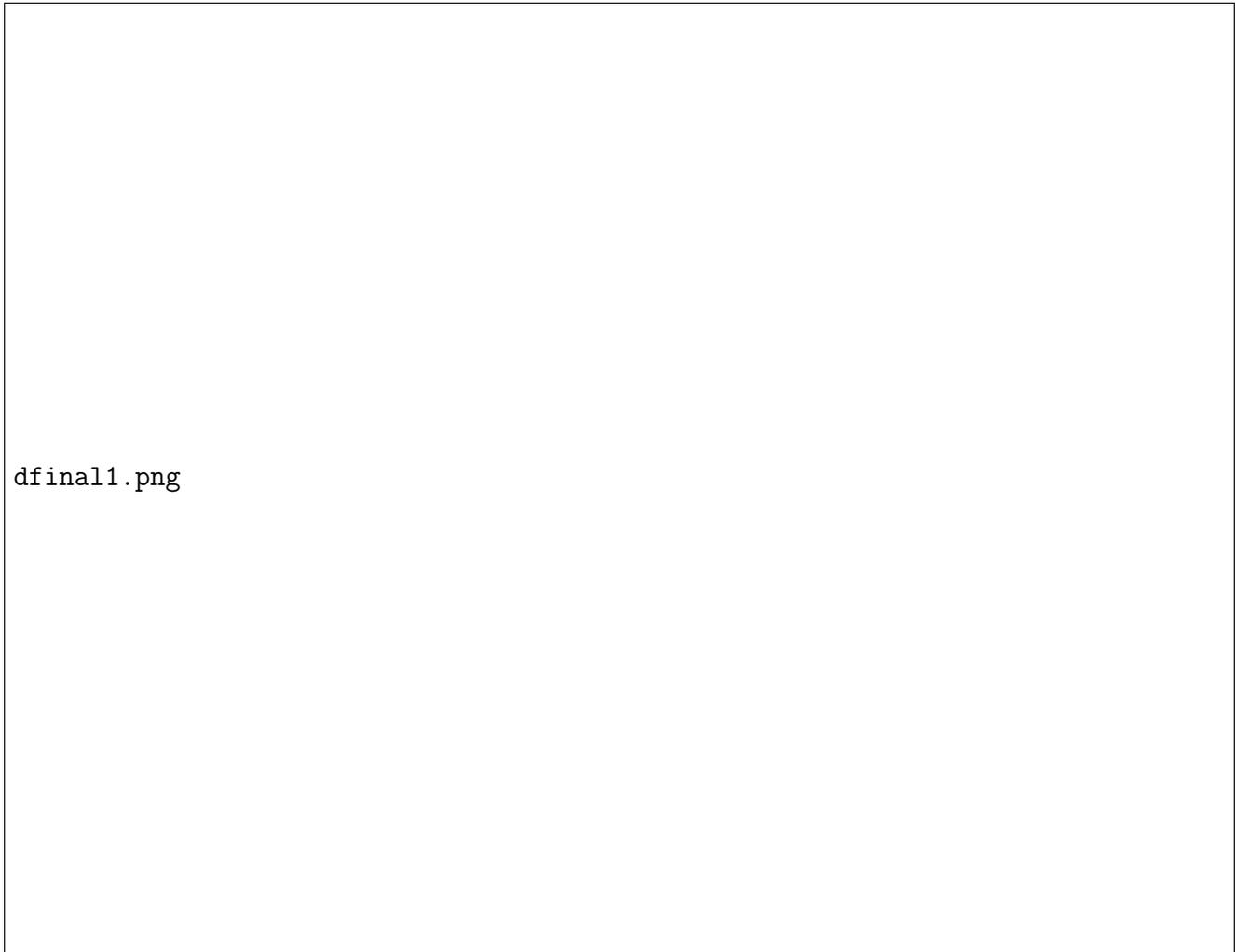
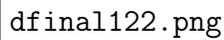


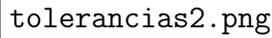
Figura 6.1: Diagrama de rayos del diseño final que incluye todos los espesores y las separaciones centrales entre elementos [mm]. Los números azules son los diámetros del eje central de los elementos ópticos y los negros la separación entre el vértice de los componentes.



dfinal122.png

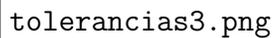
Figura 6.2: Diagrama de manchas extendido con el tamaño equivalente del seeing en el plano imagen como escala en el diagrama.

Para la validación del diseño óptico y como requisito indispensable para el diseño optomecánico se realizó el análisis de tolerancias del sistema, en este análisis se agregaron defectos de alineación y manufactura que irremediablemente tendrían los componentes de la óptica, para este estudio nos apoyamos de una herramienta de simulación especial que tiene nuestro programa de diseño. Los resultados de la simulación y las tolerancias finales del sistema se pueden observar en las figuras 4.31– 4.39, estos resultados mostraron que nuestro sistema es posible de implementar, ya que no cuenta con tolerancias que necesiten un grado de precisión exagerado en la fabricación de la óptica o un nivel de alineación que sea muy complicado y costoso de lograr en un sistema optomecánico.



tolerancias2.png

Figura 6.3: Tolerancias de manufactura del diseño óptico final.



tolerancias3.png

Figura 6.4: Tolerancias de ensamble del diseño óptico final.

Para el diseño optomecánico se escogieron materiales que se pueden conseguir comercialmente (aluminio 6061-T6 y titanio), el ensamble permite mantener la alineación de la óptica dentro de las tolerancias establecidas (figura 4.39) hasta con una carga máxima de 80 kg, así como la integridad física de los componentes. Los resultados de las simulaciones de elementos finitos, muestran que el estrés en los elementos ópticos por tensión cuando el ensamble está a una temperatura máxima de 30 grados no es suficiente para dañar al elemento, ya que se mantiene un factor de seguridad aproximado de 2 respecto al estrés límite de 6.9 MPa, mientras que el estrés por presión mayor que existe ya sea radial o axial en los mismos es 30 veces menor que el necesario para causar algún tipo de daño. Los desplazamientos en la estructura que se pueden presentar, de igual manera están dentro de la tolerancia de ensamble obtenida en el análisis de tolerancias y en lo que respecta al efecto de birrefringencia, pudimos validar que el área efectiva de la óptica se encuentra libre de estrés que pueda causar este efecto. Por tanto se puede concluir que el sistema es funcional para la aplicación

requerida, quedando pendiente la fabricación de sus componentes e implementación en el telescopio.

Peso de la estructura optomecánica	67 kg
Peso del detector	3.7 kg
Peso total del instrumento	70.7 kg
Capacidad de carga de la estructura para acoplar algún otro instrumento	80 kg

Tabla 6.3: Datos técnicos relevantes para la implementación del instrumento.

Elemento flexionado	Inclinación máxima permitida	Inclinación máxima con peso de 80 kg
Sistema completo	2 minutos de arco	1.32 minutos de arco
Barril de la cámara	1 minuto de arco	0.288 minutos de arco

Tabla 6.4: Comparación entre las flexiones permitidas en la estructura y las obtenidas sujetando el peso máximo establecido.

Estrés y desplazamientos máximos		
Inclinación del telescopio	Estrés máximo	Desplazamiento máximo
0° zenit	27.11	250
90° trasero	15.80	189
90° frontal	15.80	189
90° lateral	18.18	237
60° trasero	27.23	288
60° frontal	4.59	51.5
60° lateral	24.72	241
0° barril de cámara	6.982	34.69

Tabla 6.5: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés [MPa] y desplazamientos [μm] máximos en la estructura cargando 80 Kg.

Estrés radial A 18°C		
Elemento óptico	Estrés máximo	Estrés para presentar daño Tensión-Presión [MPa]
COL1 COL2	0.382	6.9 - 345
M1	0.416	6.9 - 345
CAM1 CAM2	0.581	6.9 - 345
CAM3	0.379	6.9 - 345
CAM4	0.419	6.9 - 345
CAM5	0.403	6.9 - 345
CAM6	0.256	6.9 - 345

Tabla 6.6: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés radial [MPa], en los componentes ópticos a 18°C causado por su ensamble.

Estrés radial A 30°C		
Elemento óptico	Estrés máximo	Estrés para presentar daño por tensión
COL1 COL2	3.284	6.9 MPa
M1	3.449	6.9 MPa
CAM1 CAM2	3.457	6.9 MPa
CAM3	3.354	6.9 MPa
CAM4	3.695	6.9 MPa
CAM5	3.362	6.9 MPa
CAM6	3.298	6.9 MPa

Tabla 6.7: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés radial [MPa], en los componentes ópticos a causa de la dilatación térmica de los materiales a 30°C.

Estrés radial A -15°C		
Elemento óptico	Estrés máximo	Estrés para presentar daño por presión
COL1 COL2	8.946	345 MPa
M1	9.573	345 MPa
CAM1 CAM2	9.064	345 MPa
CAM3	9.209	345 MPa
CAM4	10.016	345 MPa
CAM5	9.245	345 MPa
CAM6	9.069	345 MPa

Tabla 6.8: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés radial [MPa], en los componentes ópticos a causa de la compresión térmica de los materiales a -15°C.

Estrés axial A 18°C		
Elemento óptico	Estrés máximo	Estrés para presentar daño por presión
COL1 COL2	0.834	345 MPa
M1	1.736	345 MPa
CAM1 CAM2	1.741	345 MPa
CAM3	0.912	345 MPa
CAM4	0.969	345 MPa
CAM5	1.511	345 MPa
CAM6	0.322	345 MPa

Tabla 6.9: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés axial [MPa], en los componentes ópticos a 18°C causado por su ensamble.

Estrés axial A 30°C		
Elemento óptico	Estrés máximo	Estrés para presentar daño por presión
COL1 COL2	0.967	345 MPa
M1	1.956	345 MPa
CAM1 CAM2	2.460	345 MPa
CAM3	2.400	345 MPa
CAM4	1.110	345 MPa
CAM5	1.744	345 MPa
CAM6	0.3662	345 MPa

Tabla 6.10: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés axial [MPa], en los componentes ópticos a causa de la dilatación térmica de los materiales a 30°C.

Estrés axial A -15°C		
Elemento óptico	Estrés máximo	Estrés para presentar daño por presión
COL1 COL2	0.571	345 MPa
M1	1.089	345 MPa
CAM1 CAM2	2.077	345 MPa
CAM3	1.298	345 MPa
CAM4	0.7351	345 MPa
CAM5	1.573	345 MPa
CAM6	0.363	345 MPa

Tabla 6.11: Resultados de las simulaciones de elementos finitos del estrés axial [MPa], en los componentes ópticos a causa de la compresión térmica de los materiales a -15°C.

Desplazamientos en los componentes ópticos a 18 grados			
Elemento óptico	Δx	Δy	Δz
COL1 COL2	1.194	0.097	1.082
M1	1.221	0.160	0.020
CAM1 CAM2	0.011	0.503	1.363
CAM3	0.218	1.080	0.031
CAM4	0.353	1.668	0.039
CAM5	0.139	0.905	0.009
CAM6	0.020	0.842	0.022

Tabla 6.12: Desplazamientos máximos en los componentes ópticos, causado por el ensamble de los mismos en valores absolutos [μm].

Desplazamientos en los componentes ópticos a 30 grados			
Elemento óptico	Δx	Δy	Δz
COL1 COL2	8.879	3.743	3.606
M1	2.767	7.902	2.783
CAM1 CAM2	1.795	10.070	4.906
CAM3	4.330	1.834	4.669
CAM4	7.062	5.646	5.646
CAM5	16.560	1.625	1.696
CAM6	12.190	5.027	5.024

Tabla 6.13: Desplazamientos máximos en los componentes ópticos, causados por los efectos térmicos de los materiales del sistema optomecánico a una temperatura de 30 grados en valores absolutos [μm].

Desplazamientos en los componentes ópticos a -15 grados			
Elemento óptico	Δx	Δy	Δz
COL1 COL2	4.618	9.903	9.903
M1	7.618	6.425	7.656
CAM1 CAM2	4.933	6.443	5.025
CAM3	9.972	4.053	4.971
CAM4	17.470	15.552	15.553
CAM5	12.190	5.027	5.024
CAM6	12.180	13.800	13.810

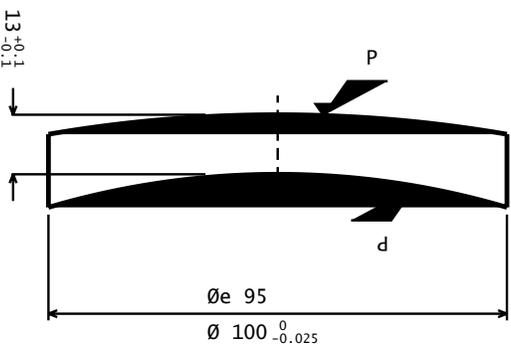
Tabla 6.14: Desplazamientos máximos en los componentes ópticos, causados por los efectos térmicos de los materiales del sistema optomecánico a una temperatura de -15 grados en valores absolutos [μm].

Los planos de fabricación de todos los elementos del sistema óptico y optomecánico del reductor focal están anexados en el apéndice de este documento.

Anexo 1: planos de fabricación óptica

Los planos de fabricación fueron generados a partir de las especificaciones de los componentes del sistema, con sus respectivas tolerancias utilizando las normas ISO para especificar los distintos parámetros de manufactura.

Dimensions in Millimeters

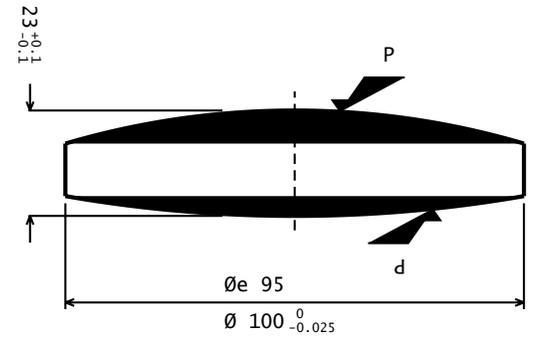


Left Surface

Material

Right Surface

R 295.654 ^{+0.295} _{-0.295}	CX	GLASS: S-LAL18	R 176.72 ^{+0.176} _{-0.176}	CC
Øe 95		Nd = 1.729157 ^{+0.0003} _{-0.0003}	Øe 95	
● AR @ 0.6563 µm		Vd = 54.68 ^{+0.2734} _{-0.2734}	● AR @ 0.6563 µm	
3/ 0.5 @ 0.6328 µm		0/ -	3/ 0.5 @ 0.6328 µm	
4/ 1'		1/ -	4/ 1'	
5/ According to MIL 13830 SDX60/40		2/ -	5/ According to MIL 13830 SDX60/40	
6/ -			6/ -	



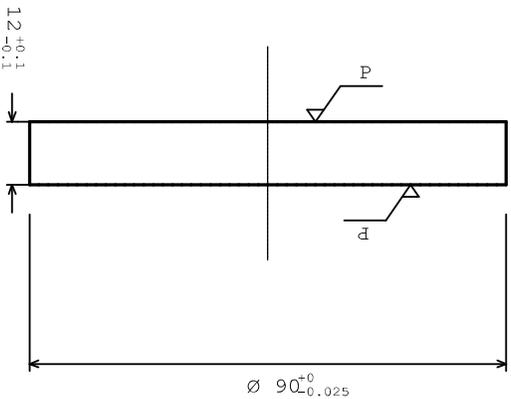
Dimensions in Millimeters

Left Surface

Material

Right Surface

R 176.72 ^{+0.176} _{-0.176}	CX	GLASS : CAF2	R 291.448 ^{+0.291} _{-0.291}	CX
Øe 95	● AR @ 0.6563 µm	Nd = 1.433849 ^{+0.0003} _{-0.0003}	Øe 95	● AR @ 0.6563 µm
3/ 0.5 @ 0.6328 µm		Vd = 95.00 ^{-0.475} _{-0.475}	3/ 0.5 @ 0.6328 µm	
4/ 1'		0/ -	4/ 1'	
5/ According to MIL 13830 SDX60/40		1/ -	5/ According to MIL 13830 SDX60/40	
6/ -		2/ -	6/ -	



Dimensions in Millimeters

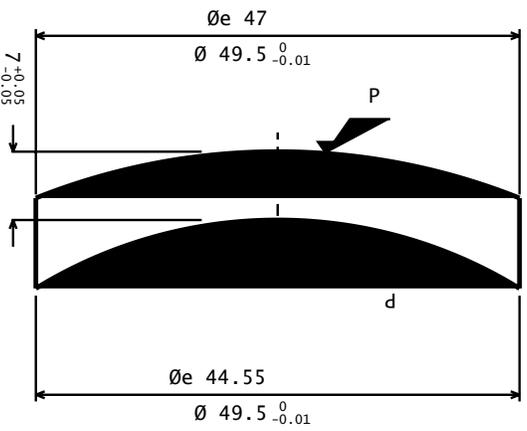
Left Surface

Material

Right Surface

R PLANO Ø_E 90 ① 3/ 0.5 (0.6328um) 4/ 1 arc min 5/ According toXMTL 13830;C--x60/40 6/ -		GLASS: MODEL Fused Silica SK 1300 $N_d = 1.456484^{+0.0003}$ $V_d = 67.88^{+0.3394}$		R PLANO $^{+0.51}$ Ø_E 85.5 $^{+0.1}$ ① 3/ 0.5 (0.6328um) 4/ 1 arc min 5/ According toXMTL 13830;C--x60/40 6/ -	
ISO Element Drawing Indications According to ISO 10110					
DATE	SCALE	DRAWN	APPRV		
4/17/2022	0.6800:1	Juan Gonzalez Gomez	INAOE		
PROJECT/TITLE					
Reductor Focal OAGH					
PART/DRAWING			REVISION		
Mirror 1			LENS . ZMX Configuration 1 of 1		

Dimensions in Millimeters



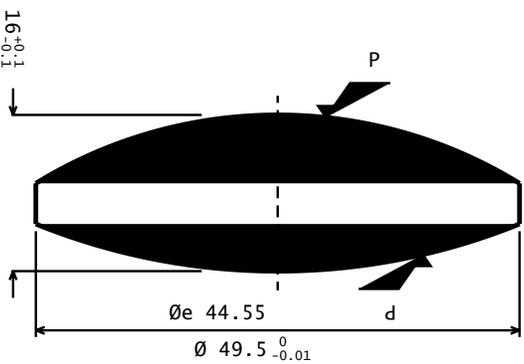
Left Surface

Material

Right Surface

<p>R 66.836^{+0.066}_{-0.066} CX</p> <p>Øe 47</p> <p>● AR @ 0.6563 µm</p> <p>3/ 0.5 @ 0.6328 µm</p> <p>4/ 1'</p> <p>5/ According to MIL 13830 SDX60/40</p> <p>6/ -</p>	<p>GLASS: S-LAL18</p> <p>Nd = 1.729157^{+0.0003}_{-0.0003}</p> <p>Vd = 54.68^{+0.2734}_{-0.2734}</p> <p>0/ -</p> <p>1/ -</p> <p>2/ -</p>	<p>R 47.217^{+0.047}_{-0.047} CC</p> <p>Øe 44.55</p> <p>●</p> <p>3/ 0.5 @ 0.6328 µm</p> <p>4/ 1'</p> <p>5/ According to MIL 13830 SDX60/40</p> <p>6/ -</p>
--	--	--

Dimensions in Millimeters



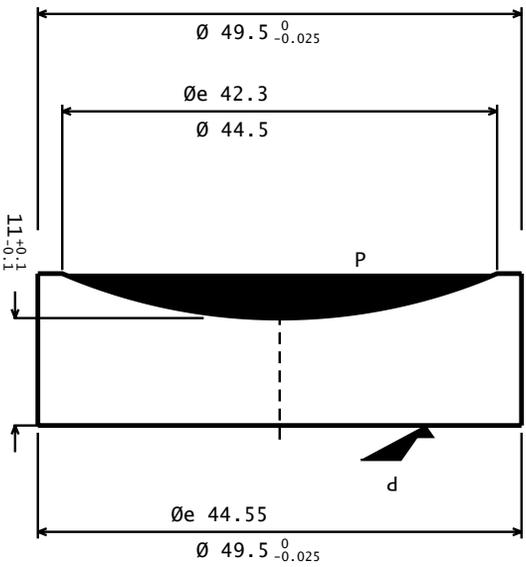
Left Surface

Material

Right Surface

<p>R 47.217^{+0.047}_{-0.047} CX $\text{Ø}e\ 44.55$ ● 3/ 0.5 @ 0.6328 μm 4/ 1' 5/ According to MIL 13830 SDX60/40 6/ -</p>	<p>GLASS: CAF2 $Nd = 1.433849^{+0.0003}$ $Vd = 95.00^{+0.475}$ 0/ - 1/ - 2/ -</p>	<p>R 65.83^{+0.065}_{-0.065} CX $\text{Ø}e\ 44.55$ ● AR @ 0.6563 μm 3/ 0.5 @ 0.6328 μm 4/ 1' 5/ According to MIL 13830 SDX60/40 6/ -</p>
---	--	---

Dimensions in Millimeters



Left Surface

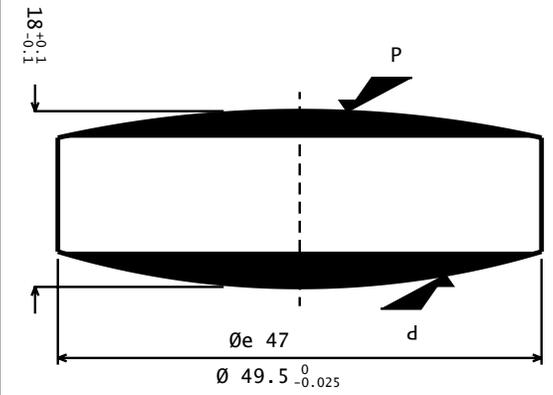
Material

Right Surface

R 56.598 ^{-0.056}/_{+0.056} CC
 Øe 42.3
 ● AR @ 0.6563 µm
 3/ 0.5 @ 0.6328 µm
 4/ 1'
 5/ According to MIL 13830 SDX60/40
 6/ -

GLASS: S-LAL18
 Nd = 1.729157 ^{+0.0003}/_{-0.0003}
 Vd = 54.68 ^{+0.2734}/_{-0.2734}
 0/ -
 1/ -
 2/ -

R PLANO
 Øe 44.55
 ● AR @ 0.6563 µm
 3/ 0.5 @ 0.6328 µm
 4/ 1'
 5/ According to MIL 13830 SDX60/40
 6/ -



Dimensions in Millimeters

Left Surface

R 113.866^{+0.113}_{-0.113} CX

Øe 47

● AR @ 0.6563 µm

3/ 0.5 @ 0.6328 µm

4/ 1'

5/ According to MIL 13830 SDX60/40

6/ -

Material

GLASS: CAF2

Nd = 1.433849^{+0.0003}_{-0.0003}

Vd = 95.00^{-0.475}_{-0.475}

0/ -

1/ -

2/ -

Right Surface

R 86.544^{-0.086}_{+0.086} CX

Øe 47

● AR @ 0.6563 µm

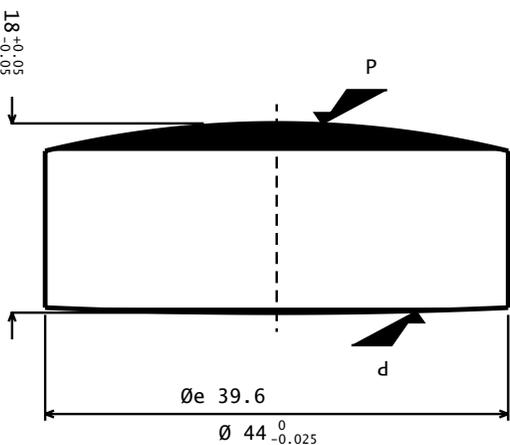
3/ 0.5 @ 0.6328 µm

4/ 1'

5/ According to MIL 13830 SDX60/40

6/ -

Dimensions in Millimeters

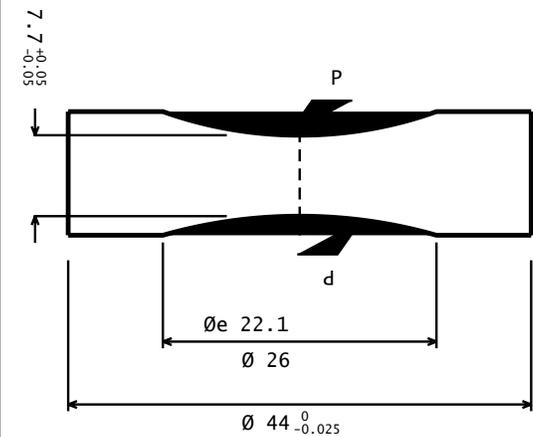


Left Surface

Material

Right Surface

R 93.767 ^{+0.187} _{-0.187}	CX	GLASS: S-LAL18	R 505.947 ^{-1.011} _{+1.011}	CX
Øe 39.6		Nd = 1.729157 ^{+0.0003} _{-0.0003}	Øe 39.6	
● AR @ 0.6563 µm		Vd = 54.68 ^{+0.2734} _{-0.2734}	● AR @ 0.6563 µm	
3/ 0.5 @ 0.6328 µm		0/ -	3/ 0.5 @ 0.6328 µm	
4/ 1'		1/ -	4/ 1'	
5/ According to MIL 13830 SDX60/40		2/ -	5/ According to MIL 13830 SDX60/40	
6/ -			6/ -	



Dimensions in Millimeters

Left Surface

- R 38.751^{-0.077}_{+0.077} CC
- $\text{Øe } 22.1$
- AR @ 0.6563 μm
- 3/ 0.5 @ 0.6328 μm
- 4/ 1'
- 5/ According to MIL 13830 SDX60/40
- 6/ -

Material

- GLASS: CAF2
- Nd = 1.433849^{+0.0003}_{-0.0003}
- Vd = 95.00^{-0.475}_{-0.475}
- 0/ -
- 1/ -
- 2/ -

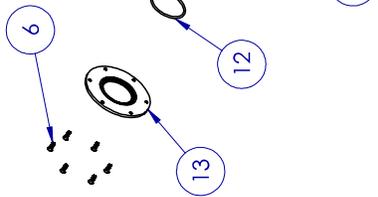
Right Surface

- R 47.476^{+0.094}_{-0.094} CC
- $\text{Øe } 22.1$
- AR @ 0.6563 μm
- 3/ 0.5 @ 0.6328 μm
- 4/ 1'
- 5/ According to MIL 13830 SDX60/40
- 6/ -

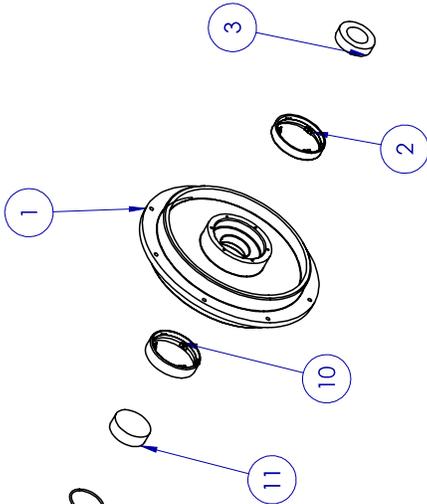
Anexo 2: planos de fabricación optomecánica

Los planos de manufactura mecánica fueron realizados apoyándonos del taller mecánico de OAGH, para lograr la correcta interpretación por parte del personal del taller en todas las piezas, expresando de forma clara sus parámetros así como sus respectivas tolerancias geométricas y de posición.

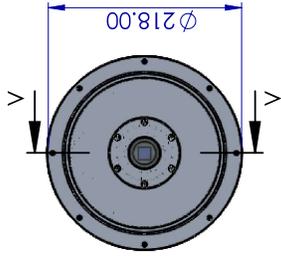
4



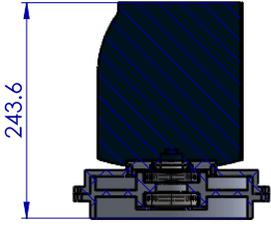
3



2



1

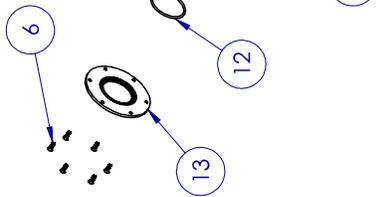


SECTION V-V

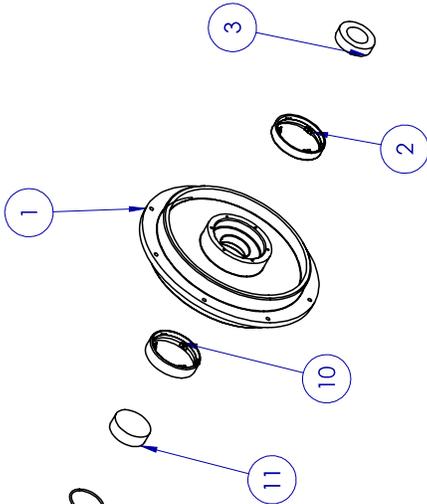
B

B

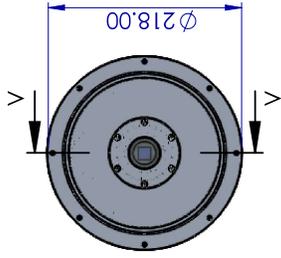
4



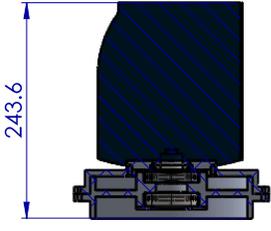
3



2



1

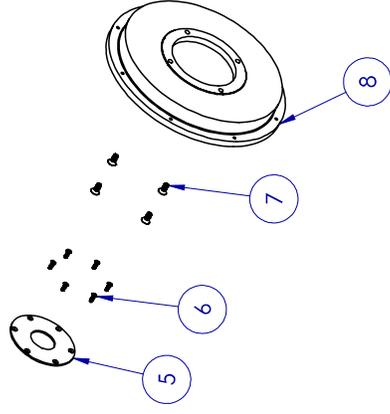
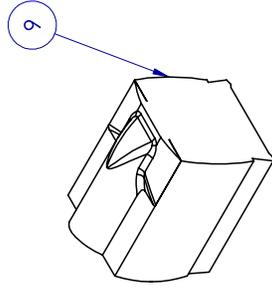


SECTION V-V

B

B

N.º DE PIEZA	NOMBRE DE PIEZA	CANTIDAD	/MATERIAL
1	BARRIL CAM 5-6	1	ALUMINIO 6061-T6
2	ANILLO CAM 6	1	ALUMINIO 6061-T6
3	CAM 6	1	CAF2
4	O-RING CAM 6	1	Buna-N Rubber 9262K656
5	TAPA CAM 6	1	ALUMINIO 6061-T6
6	TORNILLOS M3 X 10	12	Black-Oxide Alloy Steel 91294A130
7	TORNILLOS M5 X 12	4	Black-Oxide Alloy Steel 91294A210
8	ACOPLE CCD	1	ALUMINIO 6061-T6
9	TAPA CAM 6	1	ALUMINIO 6061-T6
10	ANILLO CAM 5	1	TITANIO
11	CAM 5	1	SLAL-18
12	O-RING CAM 5	1	Buna-N Rubber 9262K202
13	TAPA CAM 5	1	ALUMINIO 6061-T6



A

A

NOMBRE	FECHA
Juan G	31/01/2021
Edgar C	01/02/2021

TÍTULO:

ENSAMBLE CAM
5-6

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

B

REV

1

ESCALA: 1:5.5 PESO: 2283.36 gr HOJA 1 DE 9

3

2

1

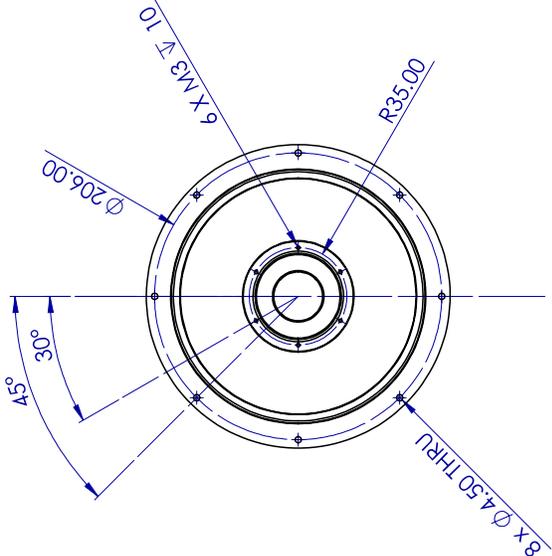
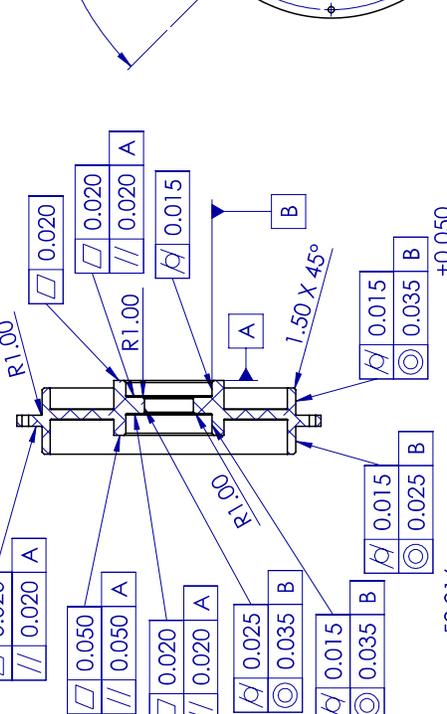
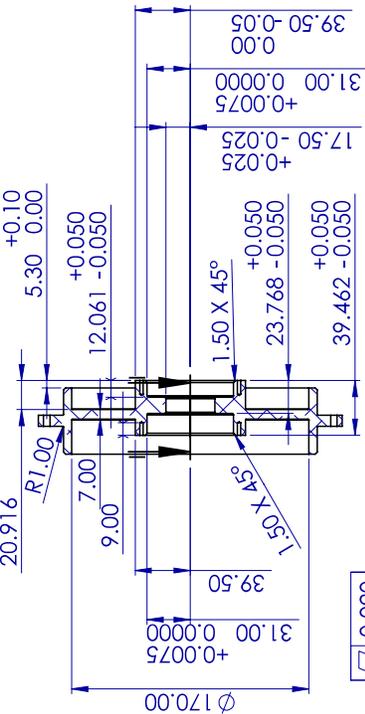
4

3

2

1

REVISIONES		DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO
ZONA	REV.			



SECTION H-H

SECTION I-I

B

B

A

A

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILÍMETROS CON SUS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		NOMBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm ANGULAR: ± 0.1 grados		JUAN G	31/01/2021
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO		VERIFICADO	FECHA
COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBABAS		Edgar C	01/02/2021
INGENIERÍA		TÍTULO: ENSAMBLE CAM 5-6 (pieza 1)	
FABRICACIÓN		TAMAÑO N.º DE DIBUJO B 1.1	
CALIDAD		REV 1	
ESCALA: 1:3.5 PESO: 1264.29 gr HOJA 2 DE 9		NO CAMBIA LA ESCALA	

2

1

1

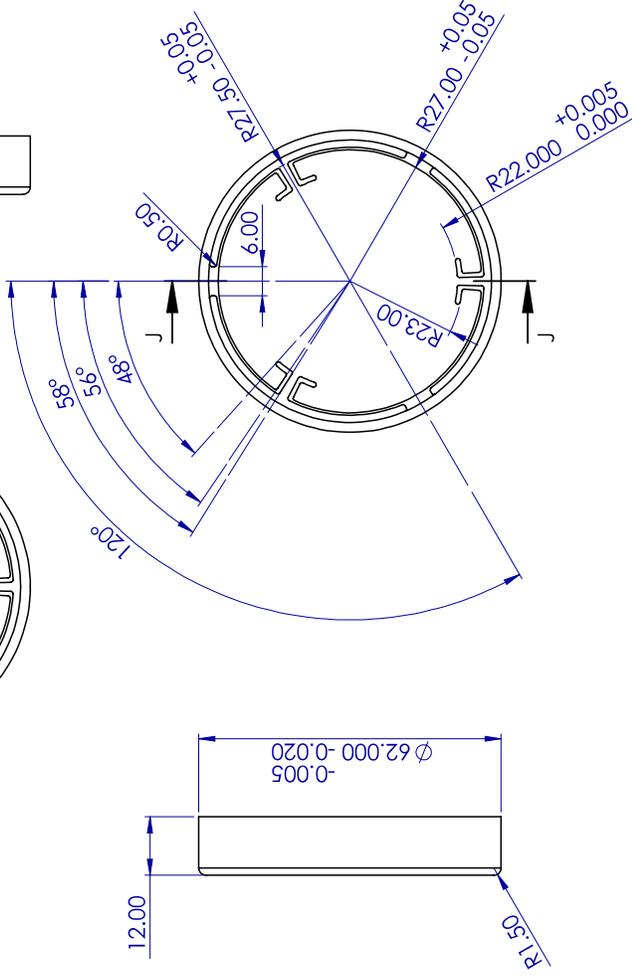
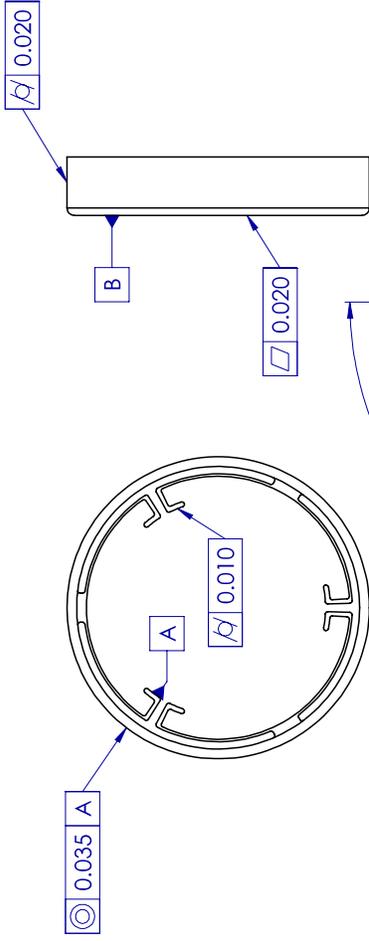
2

3

4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SECTION J-J

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN
 MM CON LAS SIGUIENTES
 TOLERANCIAS:
 LINEALES: ± 0.1 mm
 ANGULAR: ± 0.1 grados

NO. DE DIBUJO	NOMBRE	FECHA
1	Juan G	31/01/2021
2	Edgar C	01/02/2021

TÍTULO: ENSAMBLE CAM 5-6 (pieza 2)

MATERIAL: ALUMINIO 6061-T6
 ACABADO: Volar filos y rebabas

TAMAÑO: N.º DE DIBUJO
B 1.2 1

ESCALA: 1:1 PESO: 13.63 gr HOJA 3 DE 9

NOTA: LOS REDONDEOS INTERNOS DE LA PIEZA DEBERAN SER DE 0.5 mm

1

2

3

4

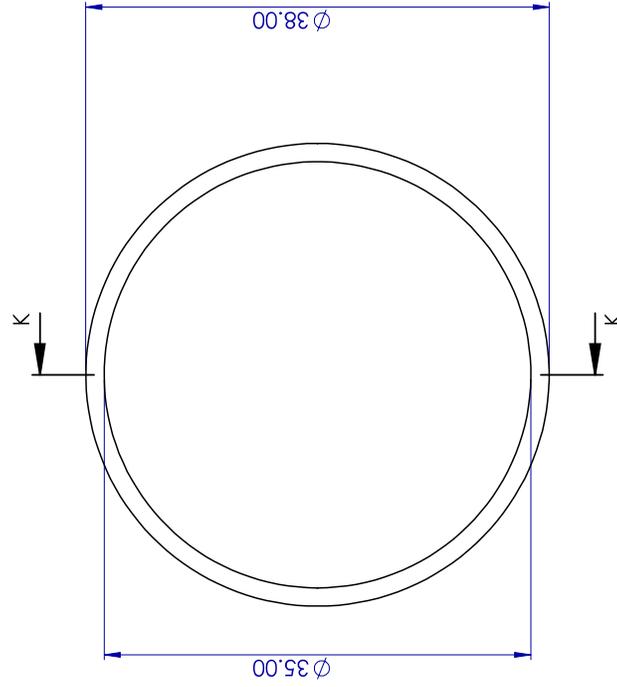
4

3

2

1

REVISIONES			
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA
			APROBADO



SECTION K-K

B

A

B

A

DIBUJADO	Juan G	31/01/2021	NOMBRE	Juan G	FECHA	31/01/2021
VERIFICADO	Edgar C	01/02/2021	VERIFICADO	Edgar C	01/02/2021	
INGENIERIA			INGENIERIA			
FABRICACION			FABRICACION			
CALIDAD			CALIDAD			
COMENTARIOS:						
MATERIAL Bunch Rubber 9262K656			TAMAÑO N.º DE DIBUJO B 1.4			
ACABADO			REV 1			
NO CAMBIA LA ESCALA						
ESCALA: 2.5:1			PESO: 0.2 gr			

TÍTULO:
**ENSAMBLE CAM 5-6
(pieza 4)**

TAMAÑO N.º DE DIBUJO
B 1.4

REV
1

ESCALA: 2.5:1 | PESO: 0.2 gr | HOJA 4 DE 9

3

2

1

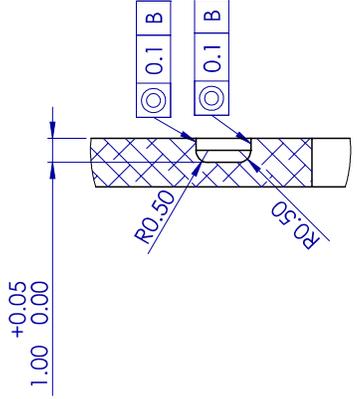
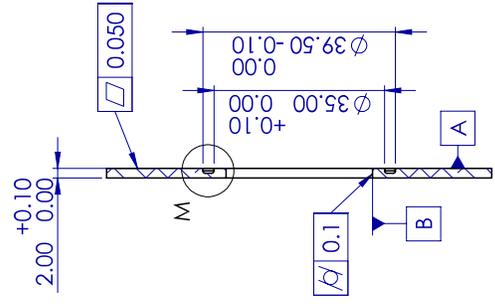
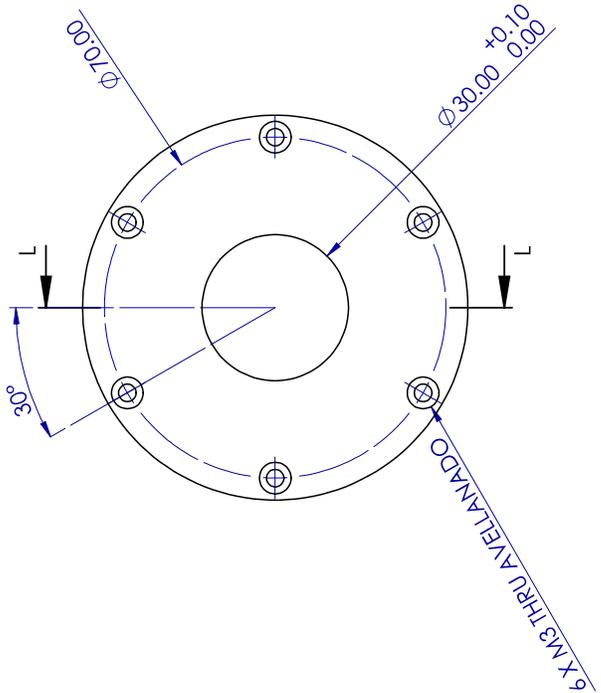
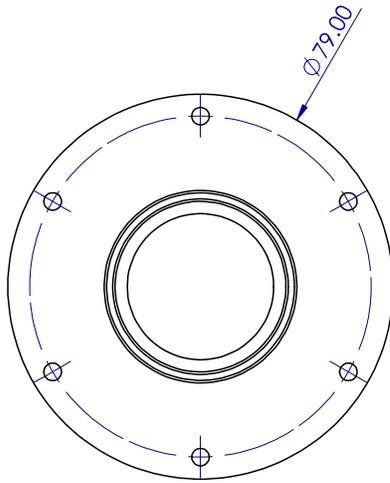
4

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



DETAIL M
SCALE 5 : 1

SECTION L-L

SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		Juan G	31/01/2021
INGENIERIA		Edgar C	01/02/2021
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6		TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
ACABADO		B	1.5
			REV
			1
NO CAMBIA LA ESCALA		ESCALA:	1:1 PESO: 21.40 gr HOJA 5 DE 9

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 5-6
(pieza 5)

3

2

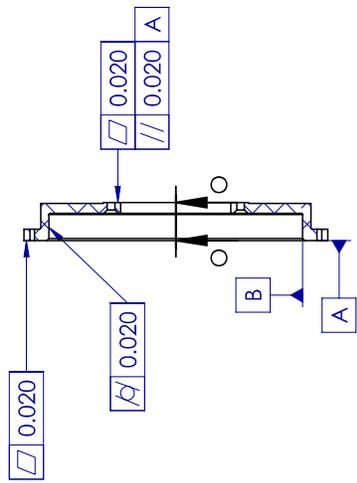
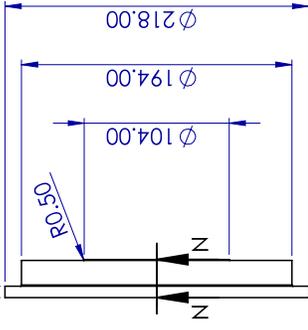
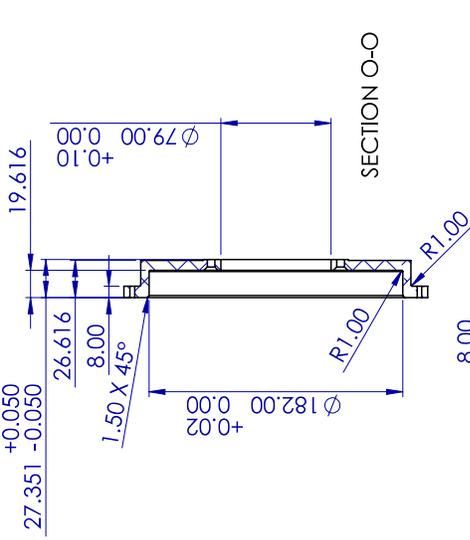
1

4

3

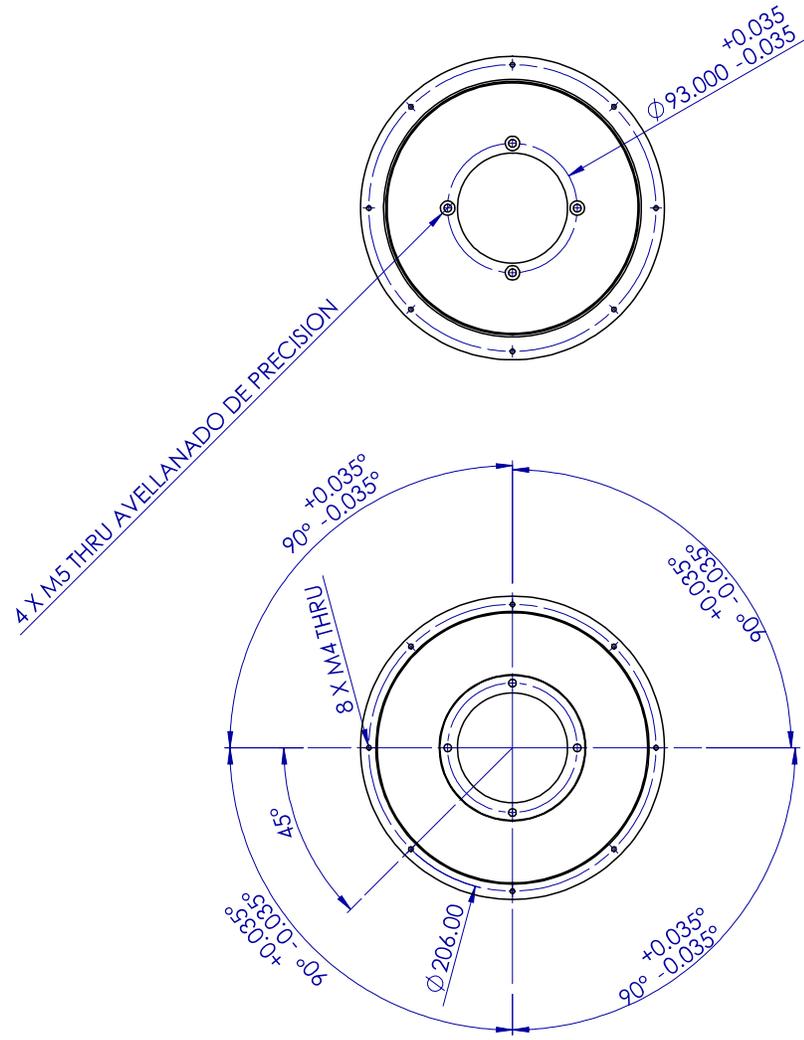
2

1



NOTA: LOS BARRENOS Y AVELLANADOS M5 DEBEN SER ELABORADOS CONCENTRICAMENTE CON SU EJE CON UNA PRECISION DE +/- 0.035 mm PARA GARANTIZAR LA ALINEACION DEL DETECTOR

REVISIONES		DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO
ZONA	REV.			



SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		NOMBRE	FECHA
LINEALES: +/- 0.1 mm		JUAN G	31/01/2021
ANGULAR: +/- 0.1 grados		EDGAR C	01/02/2021
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL: ALUMINIO 6061-T6			
ACABADO: VOLAR FILOS Y REBASAS			
TAMAÑO		N.º DE DIBUJO	REV
B		1.8	1
ESCALA: 1:3.5 PESO: 823.39 gr HOJA 6 DE 9			

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 5-6 (pieza 8)

3

2

1

1

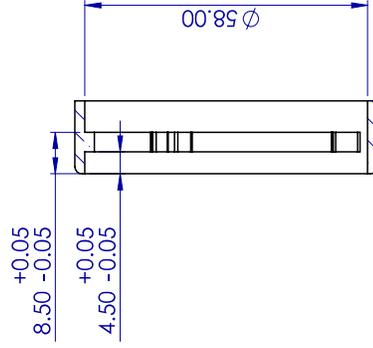
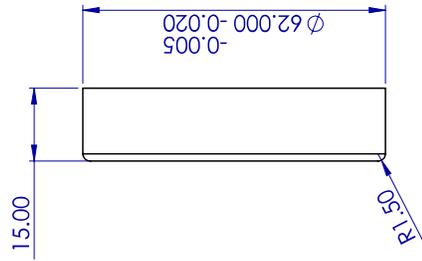
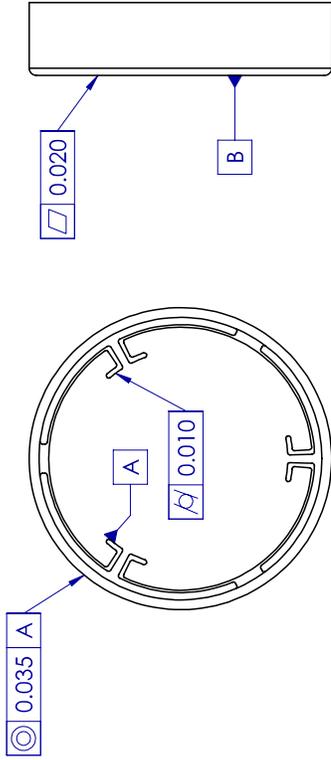
2

3

4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SECTION P-P

SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
ELABORADO	Juan G	31/01/2021	
VERIFICADO	Edgar C	01/02/2021	
INGENIERÍA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBASAS			
MATERIAL	TITANIO		
ACABADO			

TÍTULO:		TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV
ENSAMBLE CAM 5-6 (pieza 10)		B	1.10	1
ESCALA:	1:1	PESO:	28.42 gr	HOJA 7 DE 9

NOTA: LOS REDONDEOS INTERNOS DE LA PIEZA DEBERAN SER DE 0.5 mm

1

2

3

4

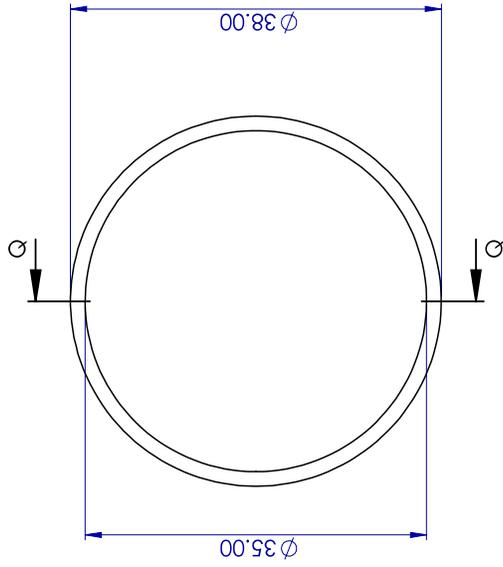
4

3

2

1

REVISIONES			
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA
			APROBADO



SECTION Q-Q

B

A

SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		Juan G	31/01/2021
LINEALES: +/- 0.1 mm		Edgar C	01/02/2021
ANGULAR: +/- 0.1 grados			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL	Bunch-N Rubber 9262K202	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
ACABADO		B	1.12
NO CAMBIE LA ESCALA		ESCALA:	2:1 PESO: 0.41 gr
		HOJA	8 DE 9

TÍTULO:
**ENSAMBLE CAM 5-6
(pieza 12)**

REV
1

3

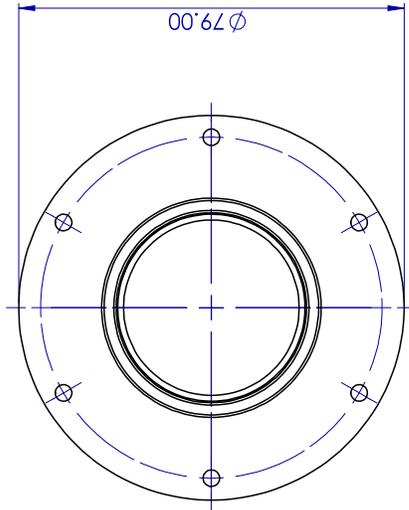
2

1

B

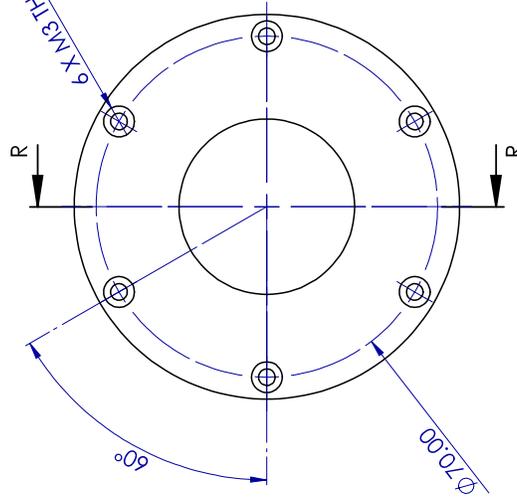
A

4

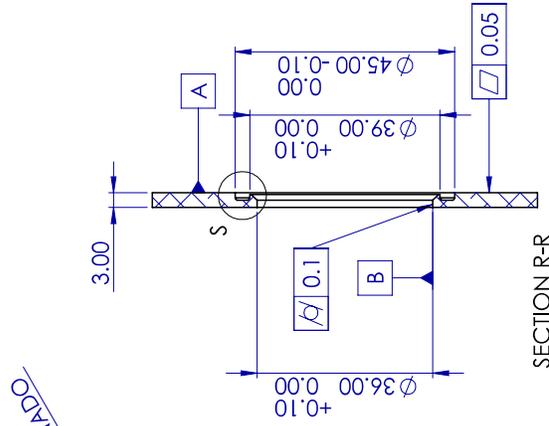


3

6xM3 THRU AVELANADO



2

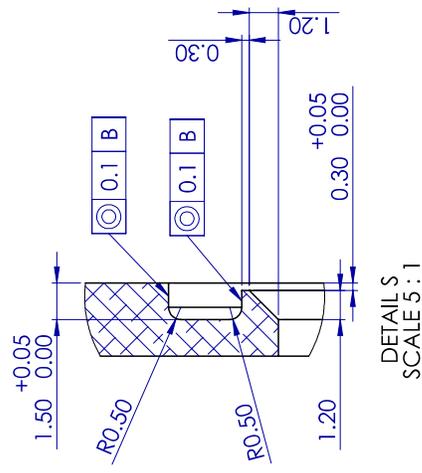


1

REVISIONES			
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA

AFROBADO

B



DETAILS
SCALE 5 : 1

A

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		NOMBRE	FECHA
LINEALES: +/- 0.1 mm ANGULAR: +/- 0.1 grados		Juan G	31/01/2021
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO		VERIFICADO	Edgar C 01/02/2021
COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBARAS		INGENIERIA	
NO CAMBIE LA ESCALA		CAUIDAD	

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 5-6
(pieza 13)

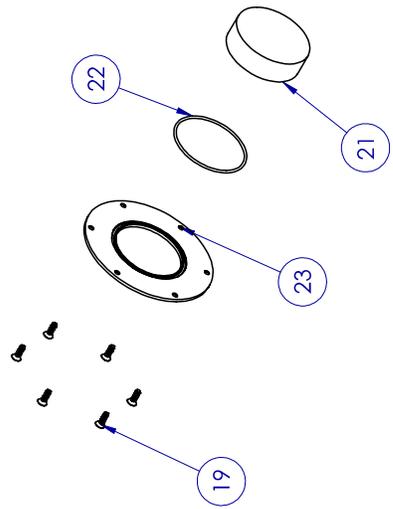
TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV
B	1.13	1
ESCALA: 1:1 PESO: 27.85 gr		HOJA 9 DE 9

3

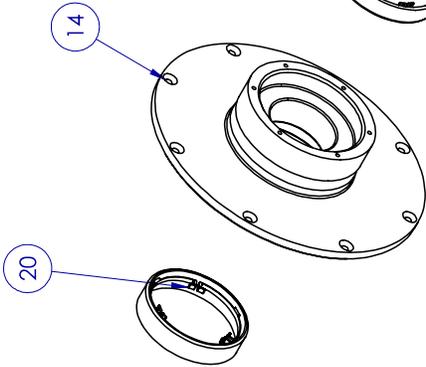
2

1

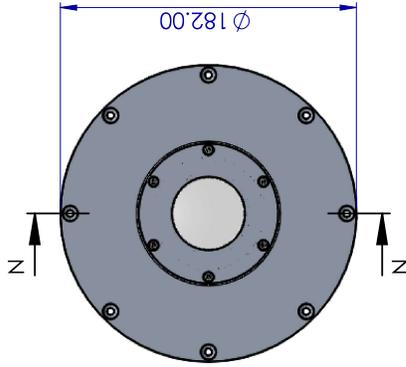
4



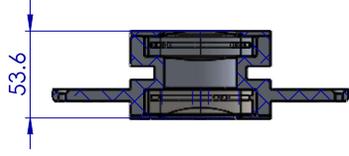
3



2



1



SECTION N-N

B

A

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	/MATERIAL
14	BRIDA CAM 3-4	1	ALUMINIO 6061-T6
15	ANILLO CAM 4	1	ALUMINIO 6061-T6
16	CAM 4	1	CAF2
17	O-RING CAM 4	1	Buna-N Rubber 9262K434
18	TAPA CAM 4	1	ALUMINIO 6061-T6 Black-Oxide Alloy Steel 91294A130
19	TORNILLOS M3 X 10	12	
20	ANILLO CAM 3	1	TITANIO
21	CAM 3	1	SLAL-18
22	O-RING CAM 3	1	Buna-N Rubber 9262K433
23	TAPA CAM3	1	ALUMINIO 6061-T6

NOMBRE	FECHA
Juan G	01/02/2021
Edgar C	02/02/2021
INGENIERIA	
FABRICACION	
CALIDAD	
COMENTARIOS:	

TÍTULO:
**ENSAMBLE CAM
3-4**

TAMAÑO N.º DE DIBUJO
B 2

REV
1

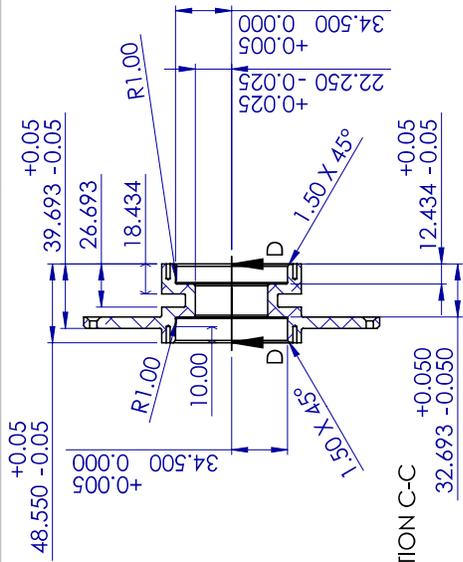
ESCALA: 1:3 PESO: 937.08 gr HOJA 1 DE 8

3

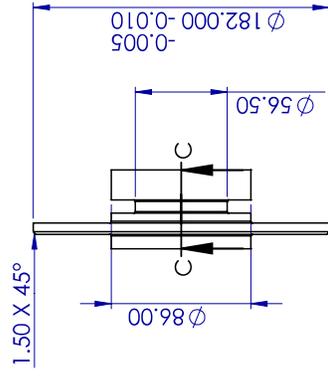
2

1

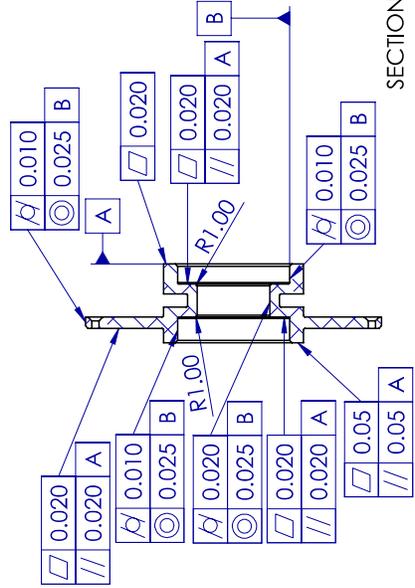
4



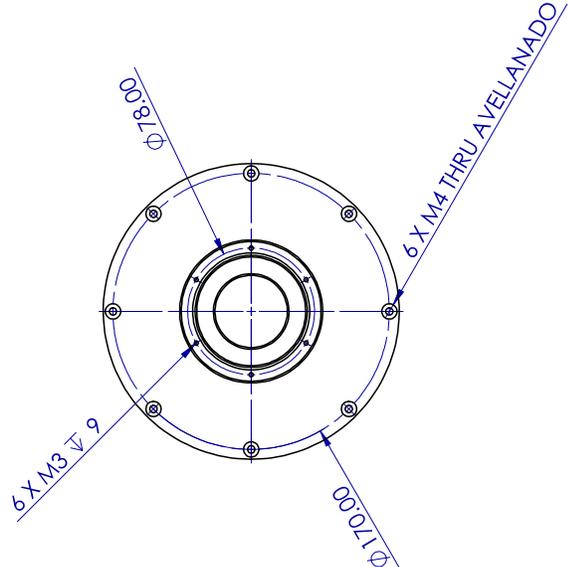
SECTION C-C



SECTION D-D



2



1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	EBUJUNDO	NOMBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm ANGULAR: ± 0.1 grados	Edgar C	Juan G	01/02/2021
	INGENIERÍA	Edgar C	02/02/2021
	FABRICACION		
	CALIDAD		
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO	COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBASAS		
	TAMAÑO	N° DE DIBUJO	REV
	B	2.14	1
	ESCALA: 1:3	PESO: 691.37 gr	HOJA 2 DE 8

3

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

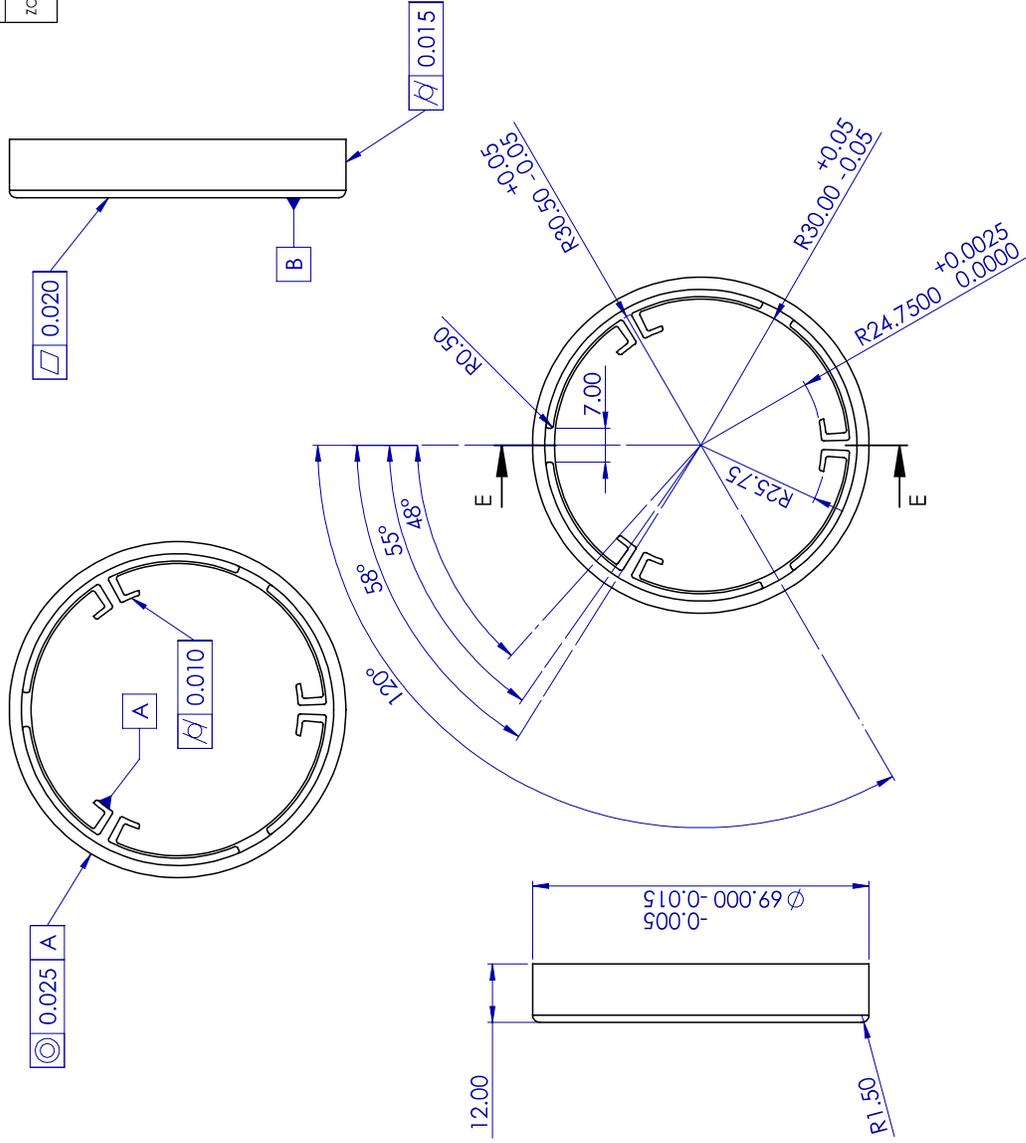
2

3

4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



NOTA: LOS REDONDEOS INTERNOS DE LA PIEZA DEBERAN SERDE 0.5 mm

SECTION E-E

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		NOMBRE	FECHA
LINEALES: +/- 0.1 mm		Juan G	01/02/2021
ANGULAR: +/- 0.1 grados		Edgar C	02/02/2021
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL	ALUMINIO 6061-T6	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
ZACABADO		B	2.15
NO CAMBIA LA ESCALA		ESCALA: 1:1 PESO: 18.16 gr HOJA 3 DE 8	

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 3-4
(pieza 15)

1

2

3

4

1

2

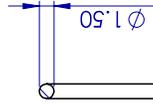
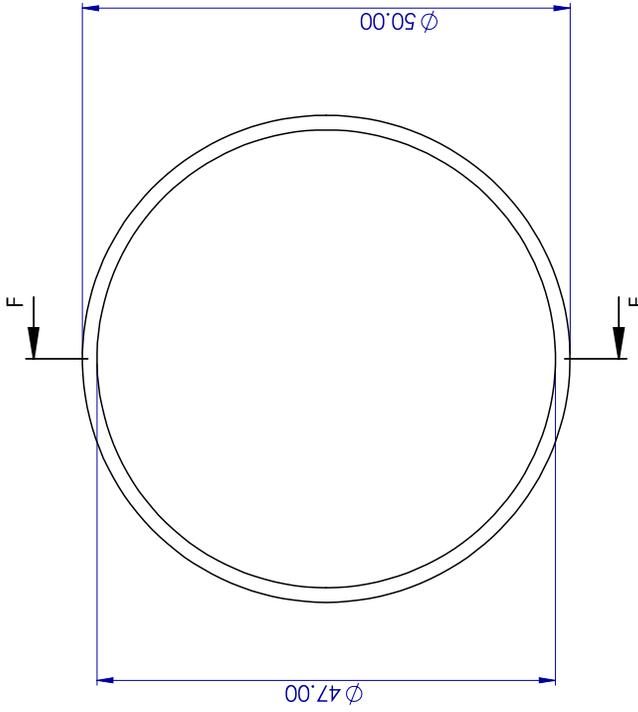
3

4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

B



SECTION F-F

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Juan G	01/02/2021	
VERIFICADO	Edgar C	02/02/2021	
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL	Butq-N Rubber 9262K434		
ACABADO			
NO CAMBIE LA ESCALA		TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
		B	2.17
		ESCALA: 2:1	PESO: 0.27 gr
			HOJA 4 DE 8

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 3-4
(pieza 17)

REV
1

1

2

3

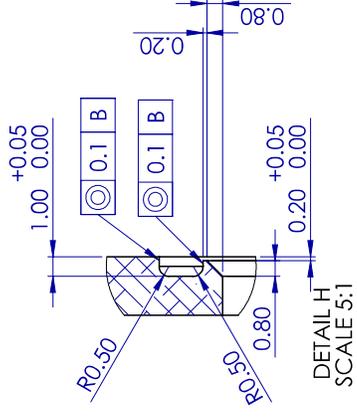
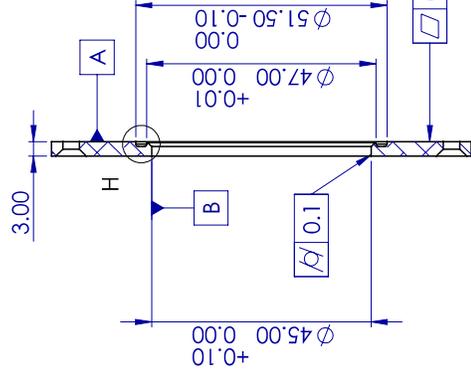
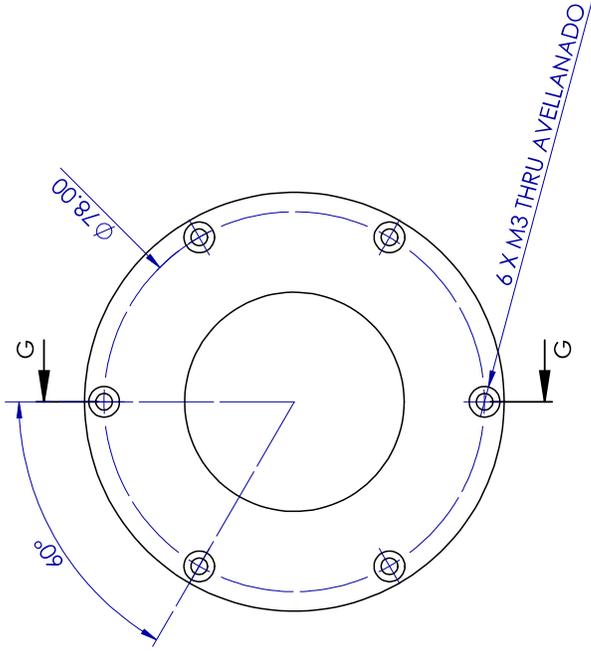
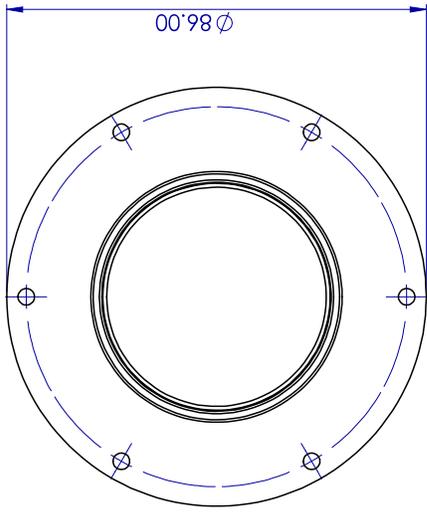
1

2

3

4

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SECTION G-G

DETAIL H
SCALE 5:1

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS CON SUS TOLERANCIAS:	NO
LINEALES: +/- 0.1 mm	NO
ANGULAR: +/- 0.1 grados	NO
MATERIAL: ALUMINIO 6061-T6 ACABADO	NO
COMENTARIOS: V OLAR FILOS Y REBASAS	NO
NO CAMBIE LA ESCALA	NO

EBUJUNDO	FECHA
VERIFICADO	FECHA
INGENIERIA	
FABRICACION	
CAJIDAD	
TAMANO N.º DE DIBUJO	
ESCALA: 1:1 PESO: 32.43 gr HOJA 5 DE 8	

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 3-4
(pieza 18)

REV	1
REV	1
REV	1

B

A

B

A

3

2

1

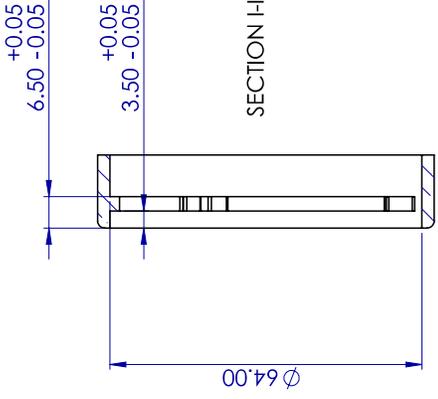
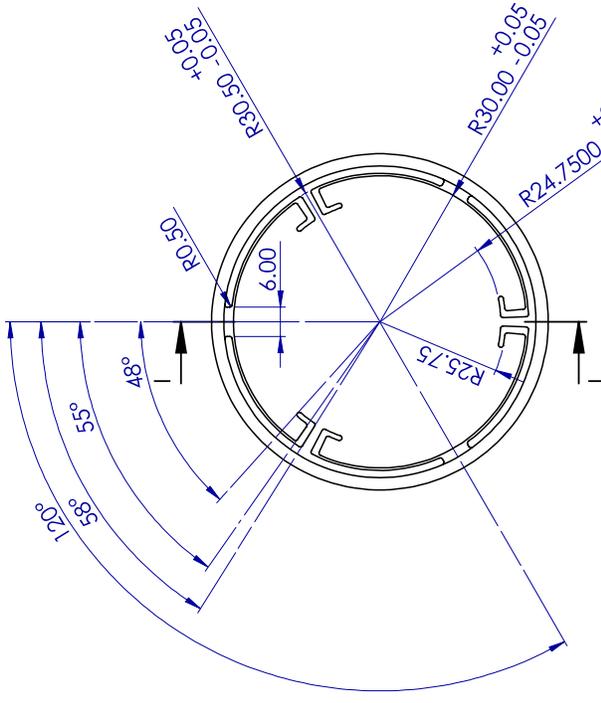
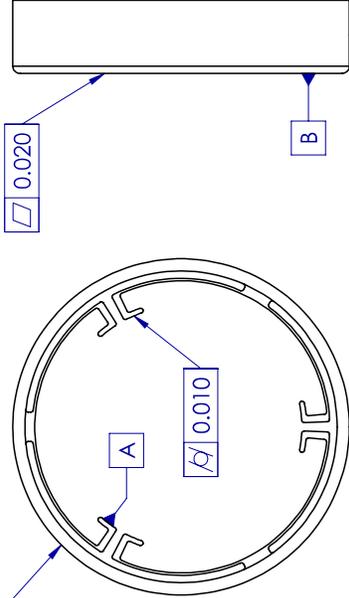
1

2

3

4

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		NOMBRE	FECHA
LINEALES: +/- 0.1 mm		Juan G	01/02/2021
ANGULAR: +/- 0.1 grados		Edgar C	02/02/2021
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBASAS			
MATERIAL	TITANIO	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
ACABADO		B	2.20
NO CAMBIA LA ESCALA		ESCALA:	1:1 PESO: 38.08 gr
			HOJA 6 DE 8

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 3-4
(pieza 20)

REV 1
TAMAÑO B 2.20

NOTA: LOS REDONDEOS INTERNOS DE LA PIEZA DEBERAN SER DE 0.5 mm

2

3

1

B

A

1

2

3

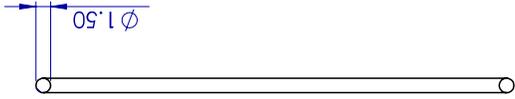
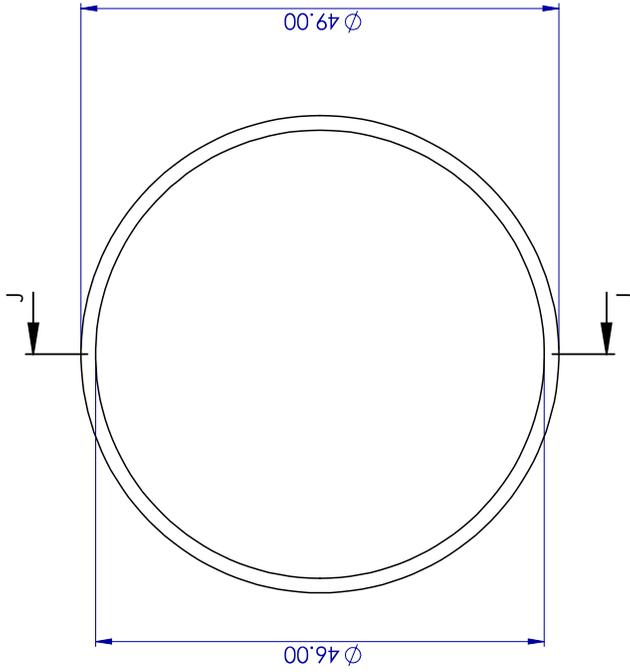
4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

B

B



SECTION J-J

A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Juan G	01/02/2021	
VERIFICADO	Edgar C	02/02/2021	
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL		TAMAÑO N.º DE DIBUJO	
GOMA Buna-N Rubber 9220K43350A		B 2.22	
ACABADO		REV	
		1	
NO CAMBIE LA ESCALA		ESCALA: 2:1 PESO: 0.26 gr HOJA 7 DE 8	

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 3-4
(pieza 22)

2

3

1

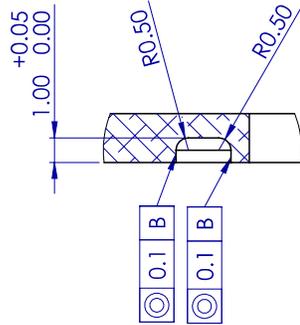
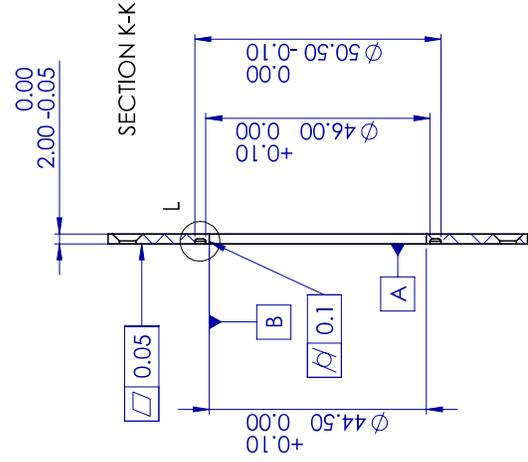
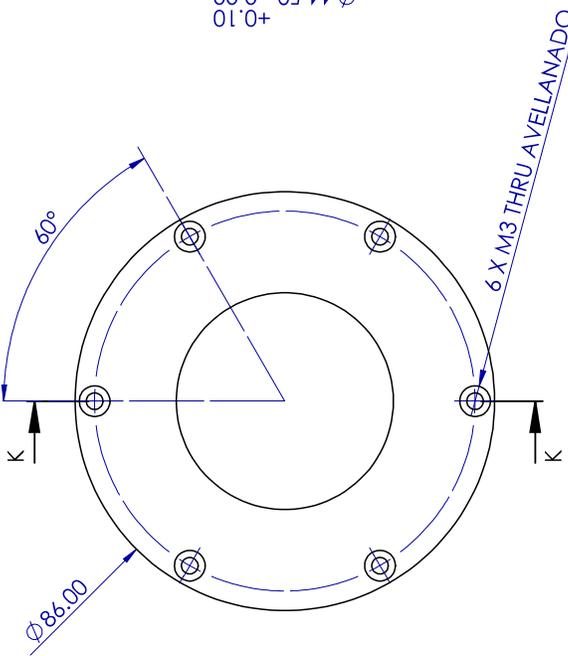
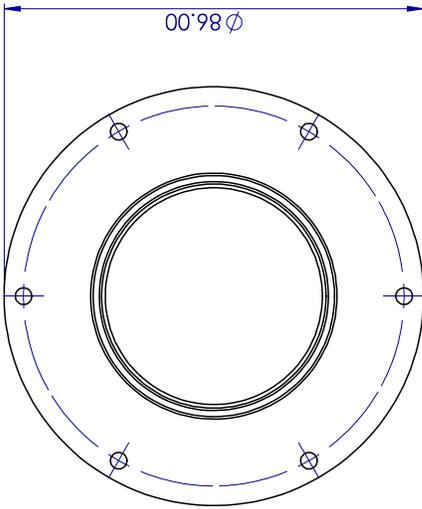
4

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



DETAIL L
SCALE 5:1

SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN TOLERANCIAS SIGUIENTES:		Juan G	01/02/2021
LINEALES: +/- 0.1 mm		Edgar C	02/02/2021
ANGULAR: +/- 0.1 grados			
MATERIAL: ALUMINIO 6061-T6 ACABADO		COMENTARIOS:	
		VOLAR FILOS Y REBASAS	
NO CAMBIA LA ESCALA		TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
		B	2.23
		ESCALA: 1:1	PESO: 21.56 gr
			HOJA 8 DE 8

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 3-4
(pieza 23)

REV 1
REV 2.23

3

2

1

B

A

B

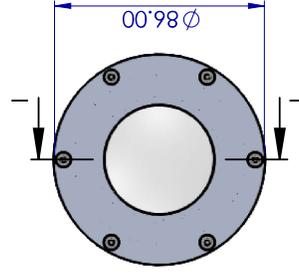
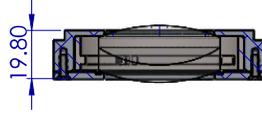
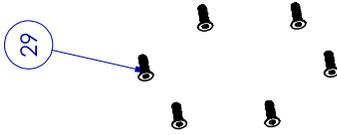
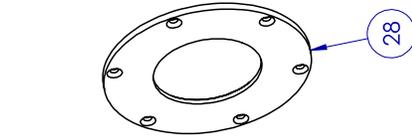
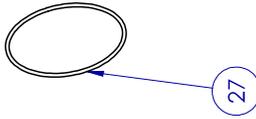
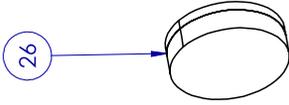
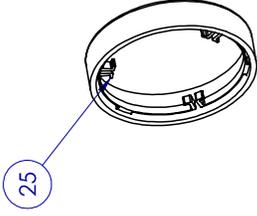
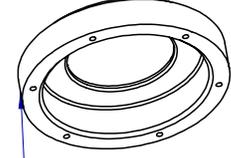
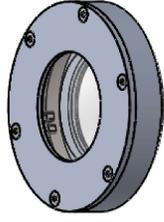
A

1

2

3

4



SECTION I-I

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	/MATERIALES
24	CELDA CAM 1-2	1	ALUMINIO 6061-T6
25	ANILLO CAM 1-2	1	TITANIO
26	CAM 1-2	1	DOBLETE (SLAL-18, CAF2)
27	O-RING CAM 1-2	1	Buna-N Rubber 9262K434
28	TAPA CAM 1-2	1	ALUMINIO 6061-T6
29	TORNILLOS M3 X 10	6	Black-Oxide Alloy Steel 91294A130

NOMBRE	FECHA
Juan G	01/02/2021
Edgar C	02/02/2021
INGENIERIA	
FABRICACION	
CAIDAD	
COMENTARIOS:	

TÍTULO:

ENSAMBLE
CELDA CAM 1-2

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

B

3

REV

1

ESCALA: 1:2 PESO: 248.25 gr HOJA 1 DE 5

1

2

3

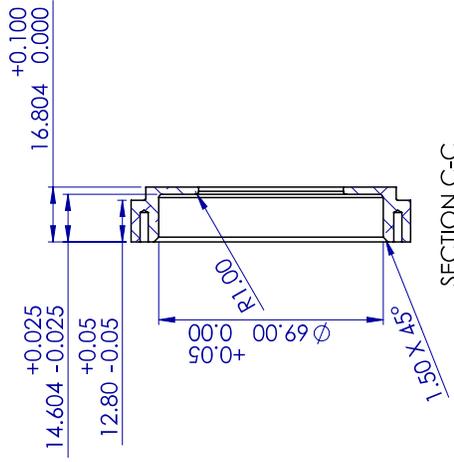
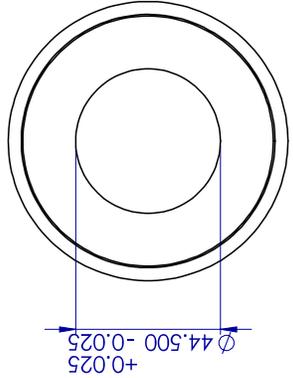
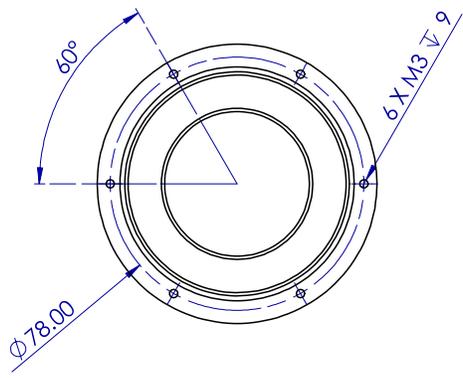
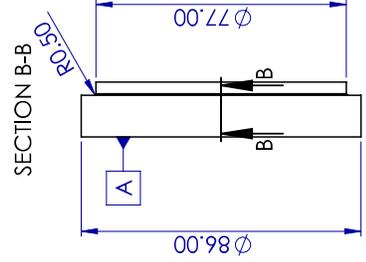
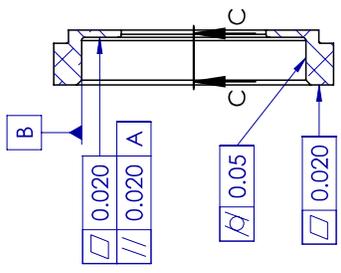
4

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SECTION C-C

3

2

1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		Juan G	01/02/2021
CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		Edgar C	02/02/2021
LINEALES: +/- 0.1 mm	INGENIERIA		
ANGULAR: +/- 0.1 grados	FABRICACION		
	CALIDAD		
COMENTARIOS:			
MATERIAL	TAMAÑO N.º DE DIBUJO		
ALUMINIO 6061-T6	B 3.24		
ACABADO	VOLAR FILOS Y REBASAS		
NO CAMBIE LA ESCALA		ESCALA: 1:1.5 PESO: 93.21 gr	

TÍTULO:
CELDA CAM 1-2
(pieza 24)

REV 1
HOJA 2 DE 5

1

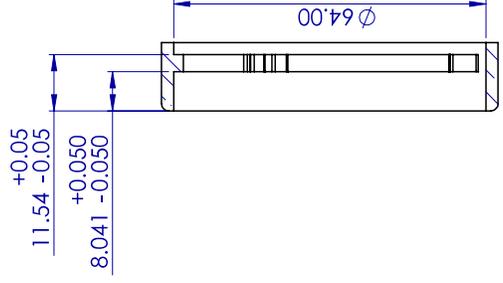
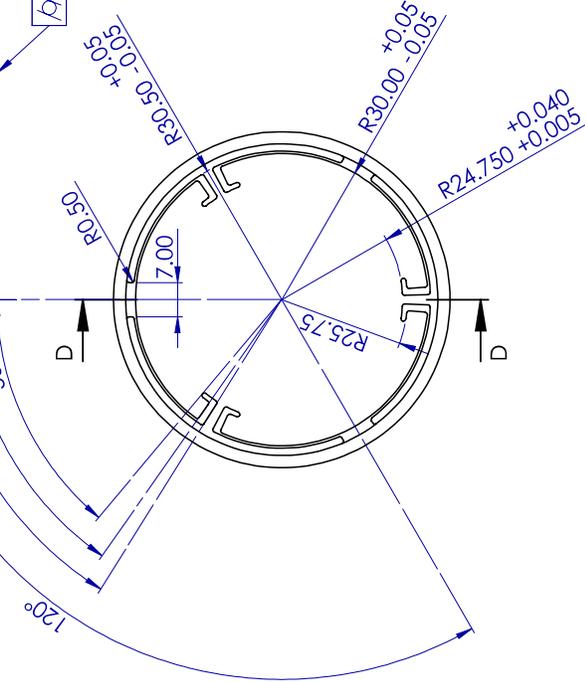
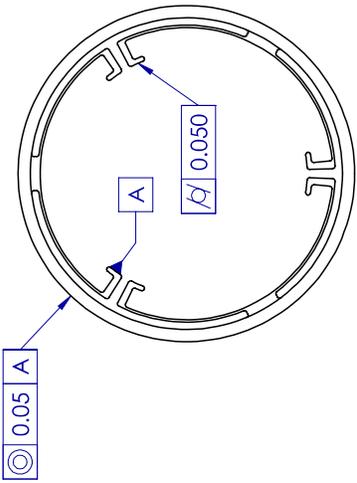
2

3

4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SECTION D-D

NOTA: LOS REDONDEOS INTERNOS DE LA PIEZA DEBERAN SER DE 0.5 mm

SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILÍMETROS Y DECIMALES		Juan G	01/02/2021
TOLERANCIAS:		Edgar C	02/02/2021
LINEALES: ± 0.1 mm		INGENIERIA	
ANGULAR: ± 0.1 grados		FABRICACION	
		CAJIDAD	
MATERIAL: TITANIO		COMENTARIOS:	TAMAÑO N.º DE DIBUJO
ACABADO		VOLAR FILOS Y REBASAS	B 3.25
			REV 1
NO CAMBIE LA ESCALA			ESCALA: 1:1 PESO: 36.09 gr HOJA 3 DE 5

1

2

3

4

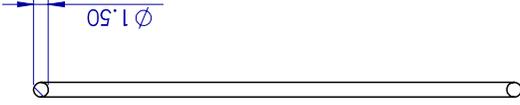
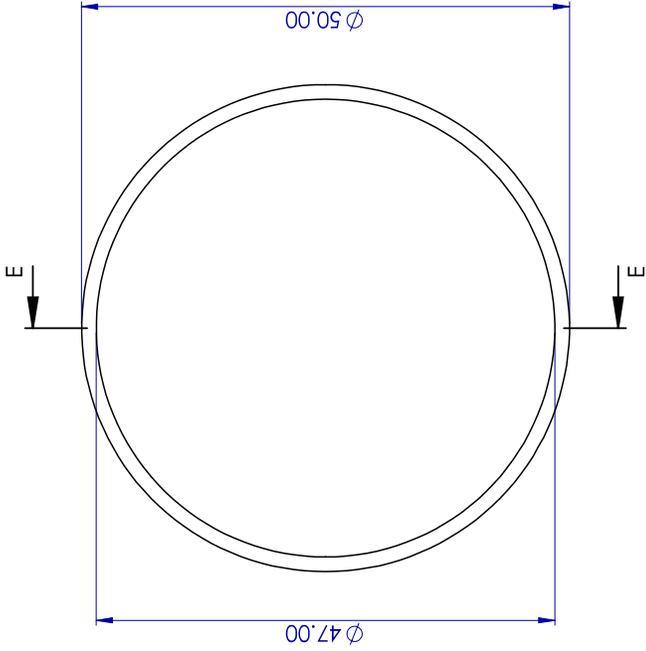
4

3

2

1

REVISIONES			
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA
			APROBADO



SECTION E-E

B

A

B

A

DIBUJADO	Juan G	NOMBRE	Juan G	FECHA	01/02/2021
VERIFICADO	Edgar C	VERIFICADO	Edgar C	FECHA	02/02/2021
INGENIERIA		INGENIERIA			
FABRICACION		FABRICACION			
CALIDAD		CALIDAD			
COMENTARIOS:					
MATERIAL	Bunch-N Rubber 9262K434	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV	
ACABADO			B	3.27	1
NO CAMBIA LA ESCALA					
ESCALA: 2:1 PESO: 0.27 gr HOJA 4 DE 5					

3

2

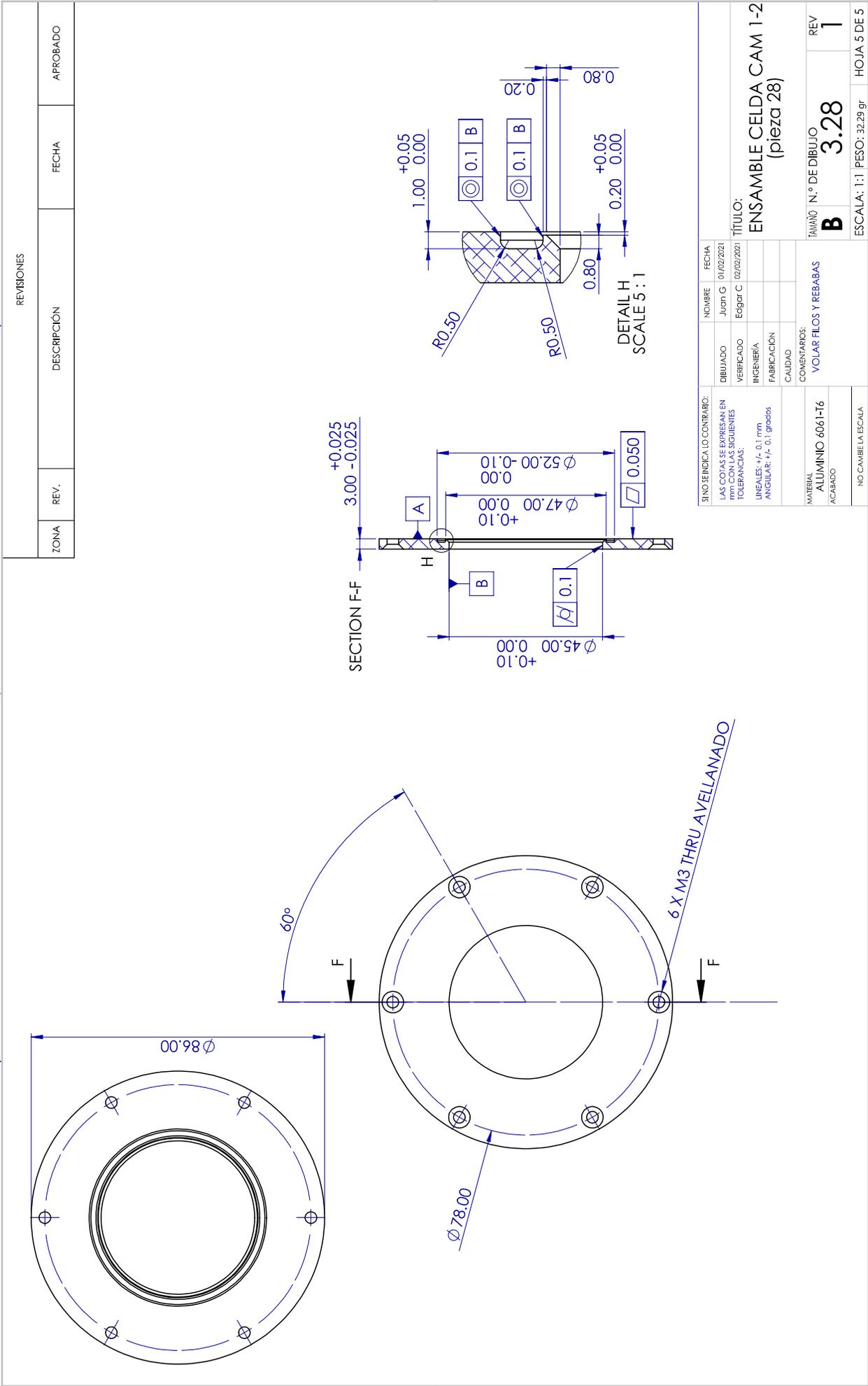
1

4

3

2

1



REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN
 MM CON LAS SIGUIENTES
 TOLERANCIAS:
 LINEALES: ± 0.1 mm
 ANGULAR: ± 0.1 grados

NO. DE DIBUJO	NOMBRE	FECHA
3.28	Juan G	01/02/2021
1	Edgar C	02/02/2021

TÍTULO:
ENSAMBLE CELDA CAM 1-2
 (pieza 28)

MATERIAL	COMENTARIOS	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV
ALUMINIO 6061-T6 ACABADO	VOLAR FILOS Y REBASAS	B	3.28	1

NO CAMBIE LA ESCALA

ESCALA: 1:1 PESO: 32.29 gr

3

2

1

B

A

B

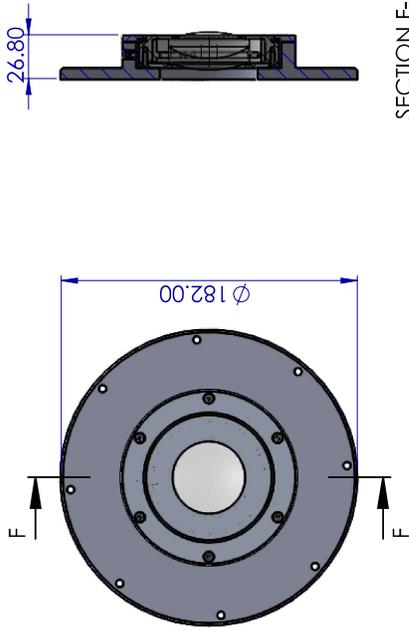
A

4

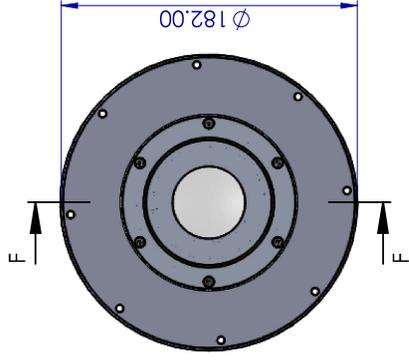
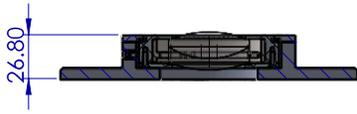
3

2

1



SECTION F-F



B

A

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	/MATERIALES
30	BRIDA CAM 1-2	1	ALUMINIO 6061-T6
E3	ENSAMBLE CELDA CAM 1-2	1	
31	O-RING SUJETADOR	1	Buno- 9262K714N Rubber
32	TORNILLOS M4 X 30	1	ALUMINIO 6061-T6
33	TUERCAS M4	6	Black-Oxide Alloy Steel 91294A130
34	BUJE DE AJUSTE	3	F3ESN1P
35	TORNILLO DE AJUSTE M3 X 0.2	3	F3ES8

NO. DE DIBUJO	FECHA
01/02/2021	Juan G
02/02/2021	Edgar C

TÍTULO:

ENSAMBLE CAM 1-2

COMENTARIOS:

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

B

4

REV

1

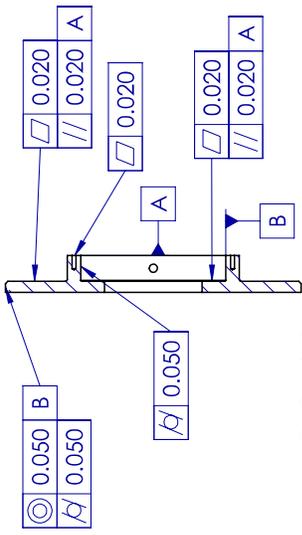
ESCALA: 1:3 PESO: 464.00 gr HOJA 1 DE 4

3

2

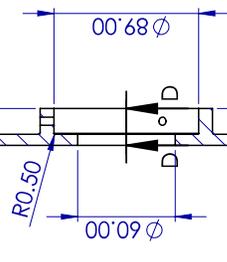
1

4

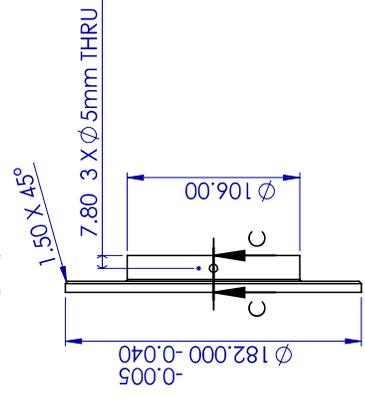


SECTION D-D

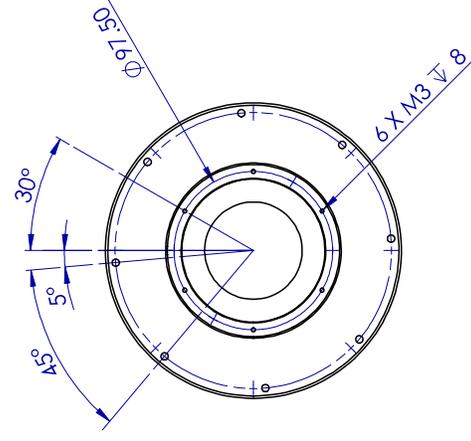
+0.025
-0.025
15.804



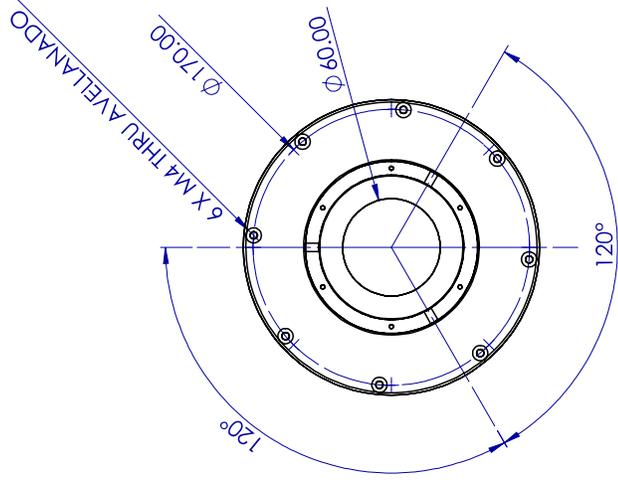
SECTION C-C



3



2



1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm.		Juan G	01/02/2021
LAS UNIDADES SON SIEMPRE EN mm.		Edgar C	02/02/2021
TOLERANCIAS:			
LINEALES: +/- 0.1 mm			
ANGULAR: +/- 0.1 grados			
MATERIAL		COMENTARIOS:	TAMAÑO
ALUMINIO 6061-T6		VOLAR FILOS Y REBABAS	N.º DE DIBUJO
ACABADO			REV

TÍTULO:
ENSAMBLE CAM 1-2 (pieza 30)

ESCALA: 1:3 PESO: 542.32 gr
HOJA 2 DE 4

4

3

2

1

B

A

B

A

3

2

1

4

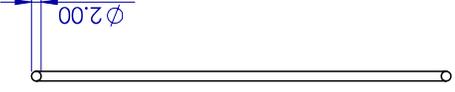
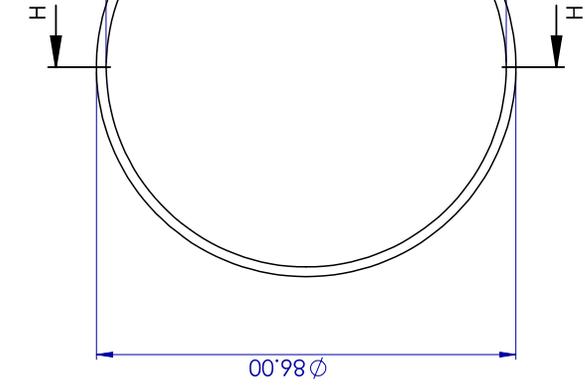
3

2

1

REVISIONES			
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA
			AFROBADO

B



SECTION H-H

A

A

PROYECTADO		NOMBRE	Juan G	FECHA	02/02/2021
VERIFICADO		VERIFICADO	Edgar C	FECHA	03/02/2021
INGENIERIA		INGENIERIA			
FABRICACION		FABRICACION			
CALIDAD		CALIDAD			
COMENTARIOS:					
MATERIAL		TAMAÑO			
Buno- 9262K714N Rubber		N.º DE DIBUJO		REV	
ACABADO		B		4.31	
NO CAMBIA LA ESCALA		ESCALA: 1:1		PESO: 0.83 gr	
				HOJA 3 DE 4	

TÍTULO:

ENSAMBLE CAM 1-2
(pieza 31)

3

2

1

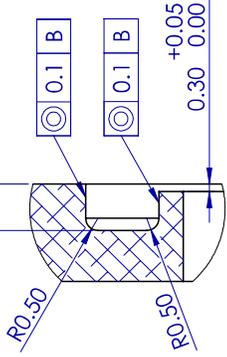
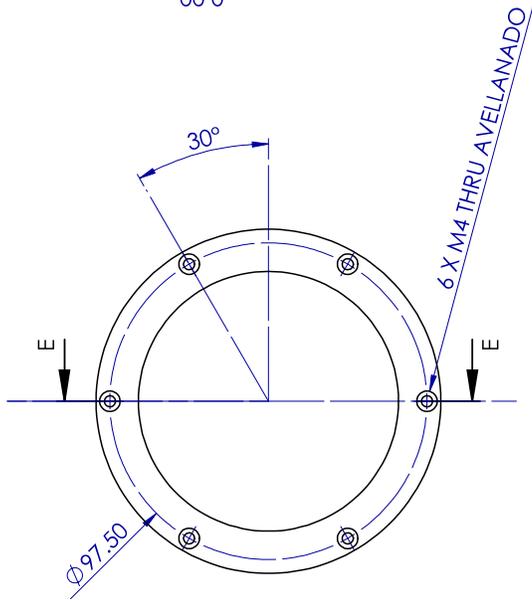
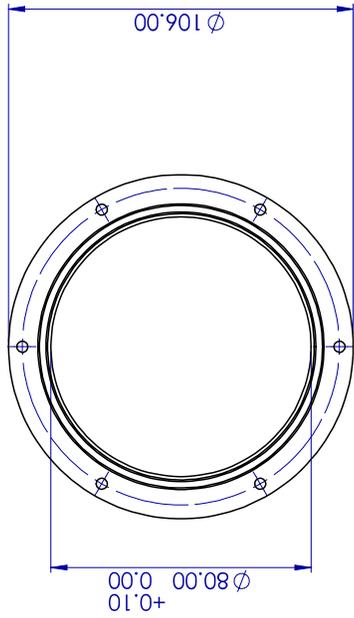
4

3

2

1

REVISIONES			
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA
			AFROBADO



DETAIL G
SCALE 5:1

SECTION E-E

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm. TOLERANCIAS: LINEALES: +/- 0.1 mm ANGULAR: +/- 0.1 grados	COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBASAS	MATERIAL: ALUMINIO 6061-T6 ACABADO	NO CAMBIE LA ESCALA
EBUJANDO VERIFICADO	NOMBRE Juan G Edgar C	FECHA 01/02/2021 02/02/2021	TÍTULO: ENSAMBLE CAM 1-2 (pieza 32)
INGENIERIA FABRICACION CALIDAD	TAMAÑO N.º DE DIBUJO	REV 4.32	HOJA 4 DE 4
ESCALA: 1:1.5 PESO: 40.20 gr			

3

2

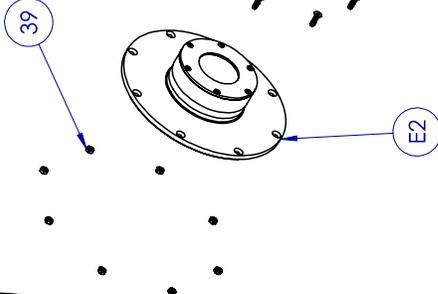
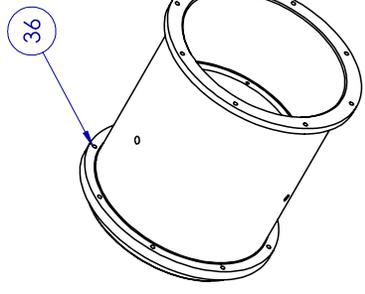
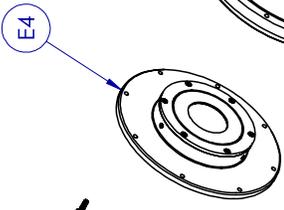
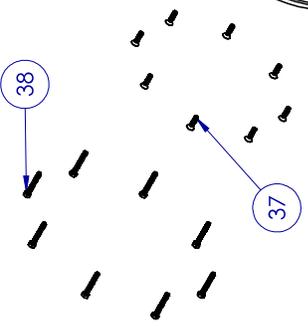
1

B

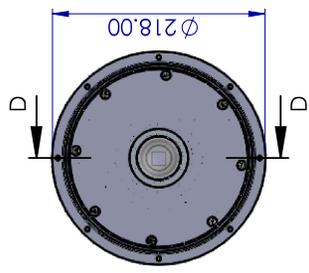
A

4

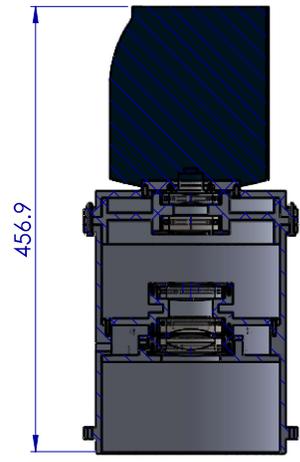
38



3

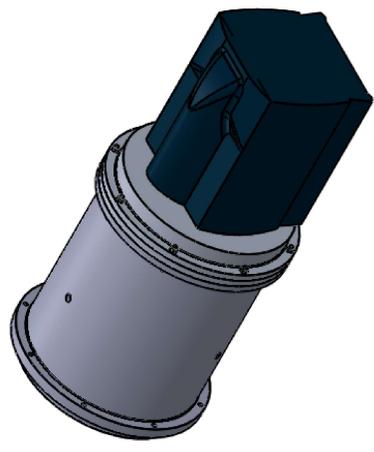


2



SECTION D-D

1



B

A

N.º DE DIBUJO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	/MATERIALES
36	BARRIL CAM 1-2-3-4	1	ALUMINIO 6061-T6
E4	ENSAMBLE CAM 1-2	1	
37	BRIDA CAM 3-4	16	Black-Oxide Alloy Steel 91294A194
E2	ENSAMBLE CAM 3-4	1	
E1	ANILLO CAM 4	1	
38	ENSAMBLE CELDA CAM 1-2	8	Steel 91280A148
39	TUERCAS M4	8	18-8 Stainless Steel 91828A231

NOMBRE	FECHA
Juan G	01/02/2021
Edgar C	02/02/2021
INGENIERIA	
FABRICACION	
CAIDAD	
COMENTARIOS:	

TÍTULO: ENSAMBLE CAMARA

TAMAÑO N.º DE DIBUJO: B 5

REV: 1

ESCALA: 1:5 PESO:6781.50 gr HOJA 1 DE 2

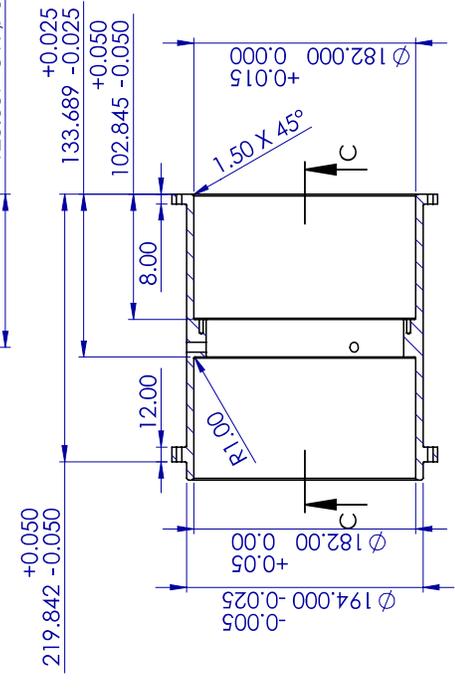
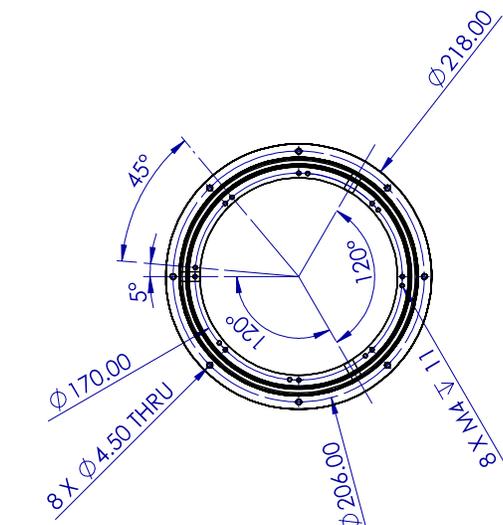
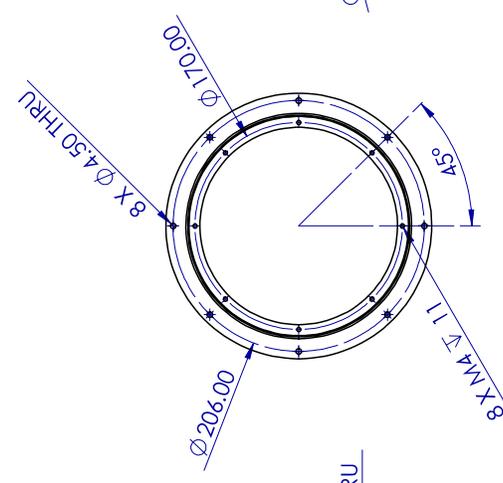
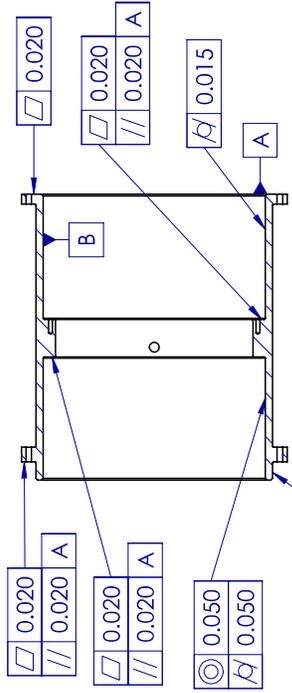
3

2

1

4 3 2 1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		Juan G	01/02/2021
CON SUS RESPECTIVAS TOLERANCIAS:		Edgar C	02/02/2021
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL		VOLAR FILOS Y REBABAS	
ALUMINIO 6061-T6			
ACABADO			
NO CAMBIE LA ESCALA			

TÍTULO:		ENSAMBLE	
CAMARA (pieza 36)		CAMARA (pieza 36)	
TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV	
B	5.36	1	
ESCALA: 1:4 PESO: 3097.06 gr		HOJA 2 DE 2	

3 2 1

1

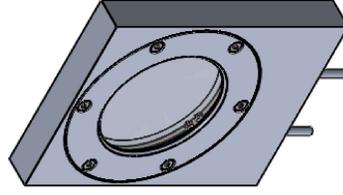
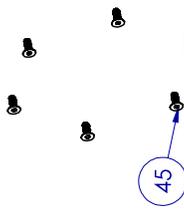
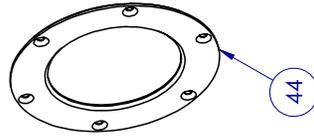
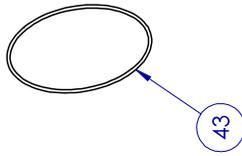
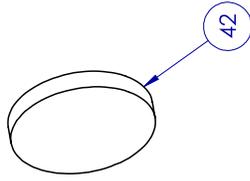
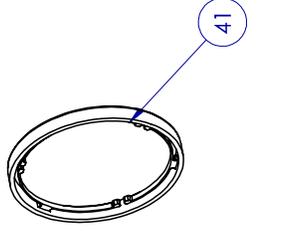
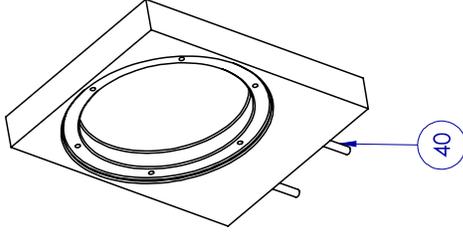
2

3

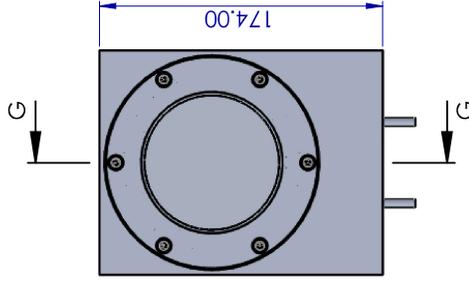
4

B

A



SECTION G-G



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	/MATERIALES
40	TAPA 2 CUBO M1	1	ALUMINIO 6061-T6
41	TORNILLOS M4 X 18	1	TITANIO
42	TAPA 3 CUBO M1	1	SK1300 FUSED SILICA
43	O-RING M1	1	Buna-N Rubber 1302N078
44	TAPA M1	1	ALUMINIO 6061-T6
45	TORNILLOS M4 X 10	6	Black-Oxide Alloy Steel 91294A190

NOMBRE	FECHA
Juan G	02/02/2021
Edgar C	03/02/2021
INGENIERIA	
FABRICACION	
CAJIDAD	
COMENTARIOS:	

TÍTULO:

MONTURA M1

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

B

6

REV

1

ESCALA: 1:3 PESO: 1392,41 gr HOJA 1 DE 6

1

2

3

4

3

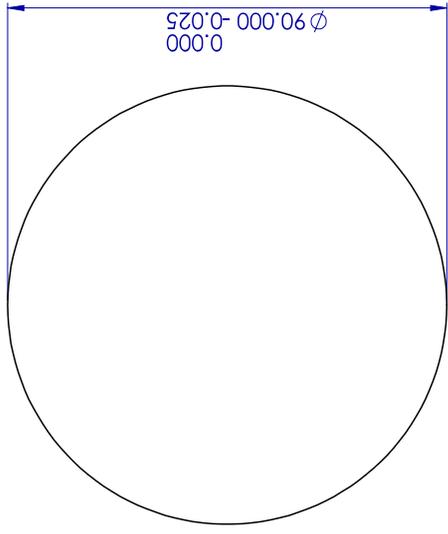
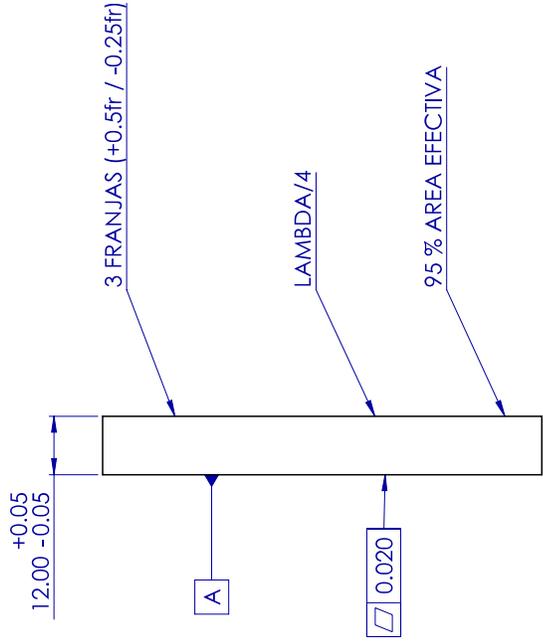
2

1

REVISIONES			
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA
			APROBADO

B

B



A

A

SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Juan G	02/02/2021	
VERIFICADO	Edgar C	03/02/2021	
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL	SK 1300 FUSED SILICA		
ZACABADO			
NO CAMBIE LA ESCALA			

TÍTULO:

**MONTURA M1
(pieza 42)**

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

B

REV **1**

ESCALA: 1:1 PESO: 187.61 gr HOJA 4 DE 6

3

2

1

1

2

3

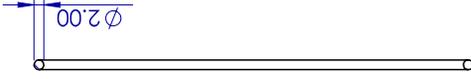
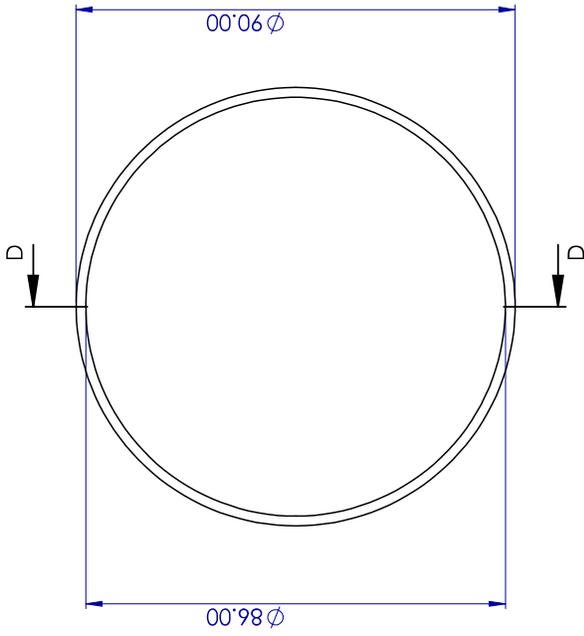
4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

B

B



SECTION D-D

A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Juan G	02/02/2021	
VERIFICADO	Edgar C	03/02/2021	
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL	Buna-N Rubber 1302N078	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
ACABADO		B	6.43
		REV	1
NO CAMBIAR LA ESCALA		ESCALA: 1:1 PESO: 0.87 gr HOJA 5 DE 6	

TÍTULO:
MONTURA M1
(pieza 43)

2

3

1

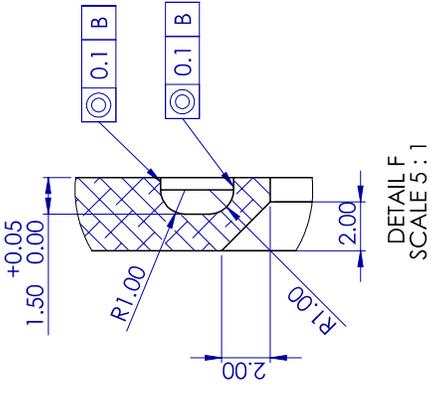
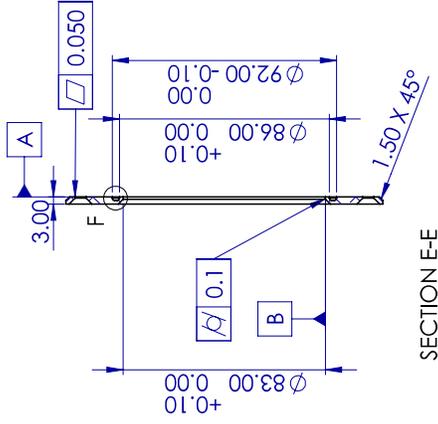
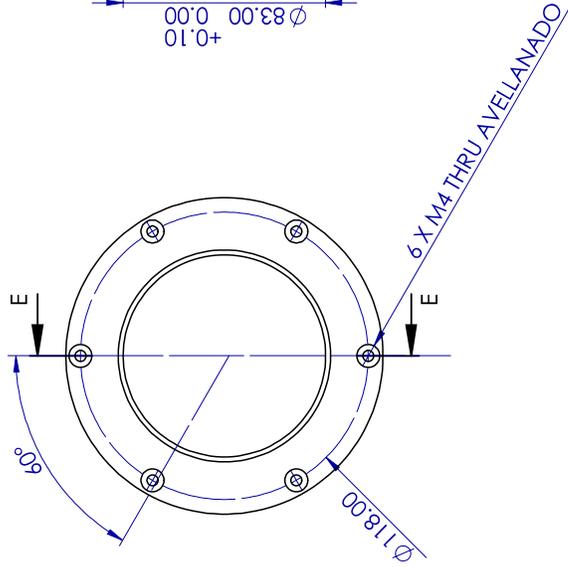
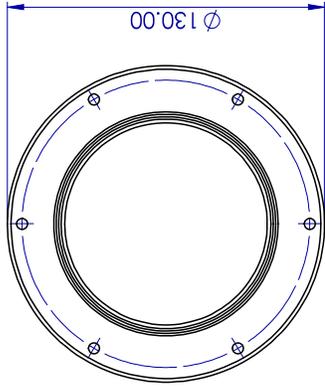
4

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



DETAIL F
SCALE 5 : 1

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	NOMBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm ANGULAR: ± 0.1 grados	Juan G	02/02/2021
MATERIAL Aluminio 6061-T6 ACABADO	VERIFICADO	FECHA
COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBASAS	Edgar C	03/02/2021
INGENIERIA	FABRICACION	CAJIDAD
TÍTULO: MONTURA M1 (pieza 44)	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
ESCALA: 1:2 PESO: 56.24 gr	B	6.44
NO CAMBIE LA ESCALA	REV	1
	HOJA	6 DE 6

3

2

1

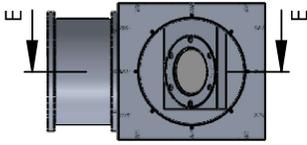
B

A

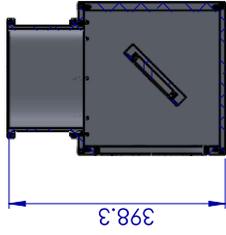
B

A

4

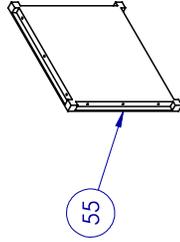


B



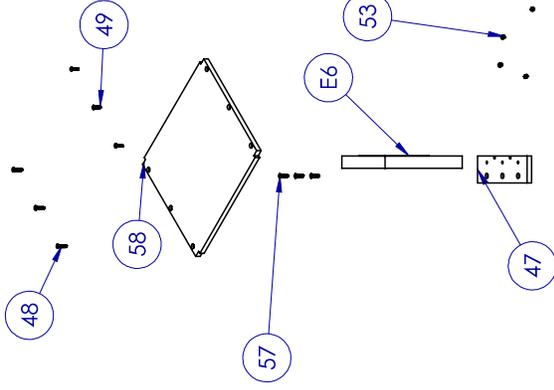
SECTION E-E

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

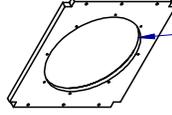
47

1

54

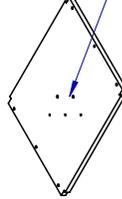
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

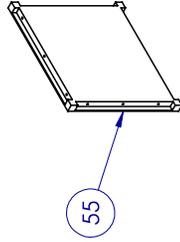
57

E6

53

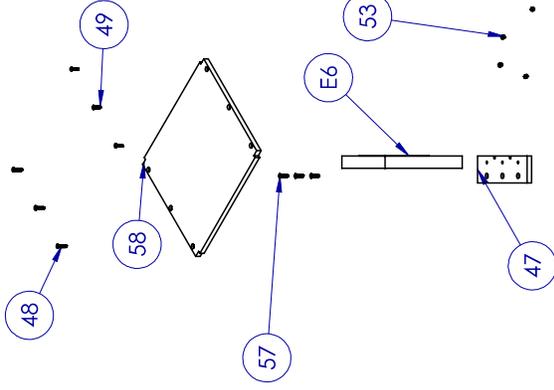
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

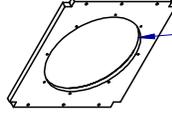
47

1

54

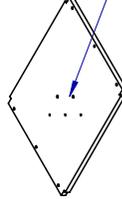
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

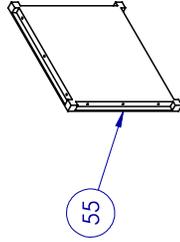
57

E6

53

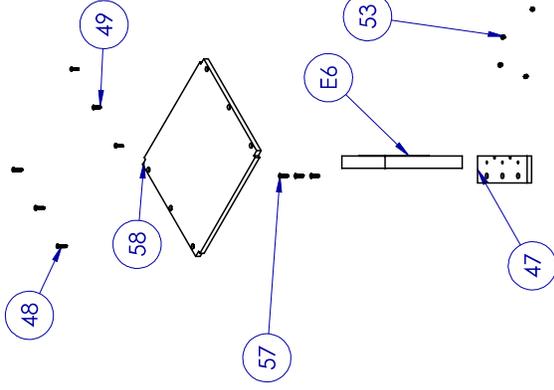
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

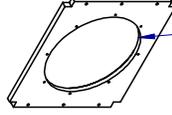
47

1

54

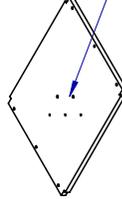
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

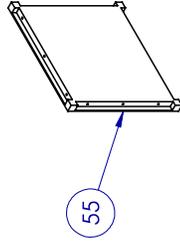
57

E6

53

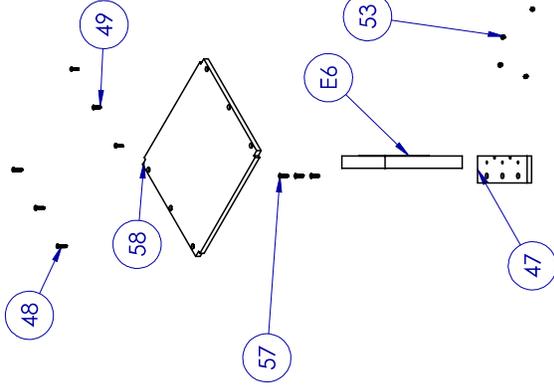
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

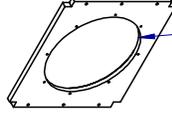
47

1

54

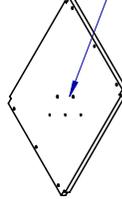
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

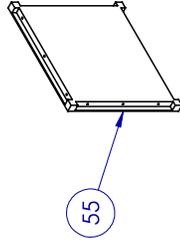
57

E6

53

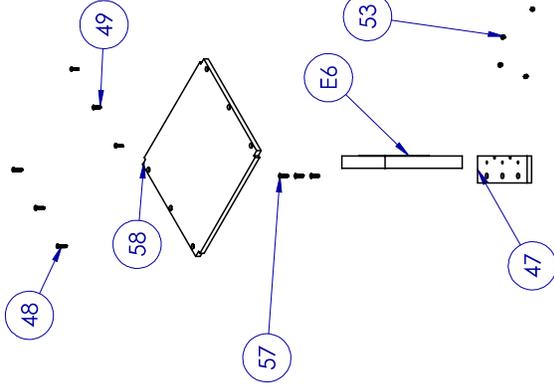
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

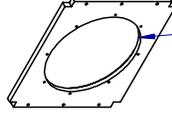
47

1

54

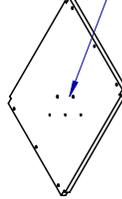
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

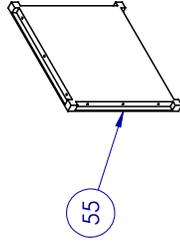
57

E6

53

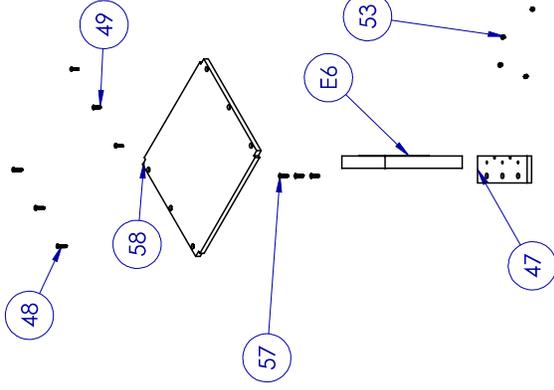
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

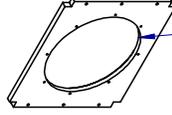
47

1

54

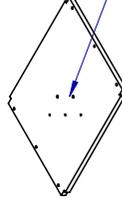
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

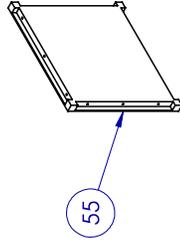
57

E6

53

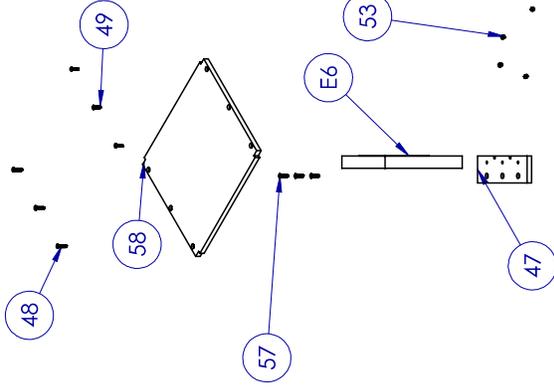
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

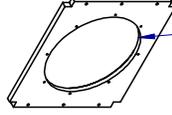
47

1

54

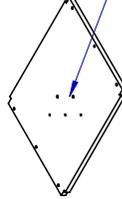
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

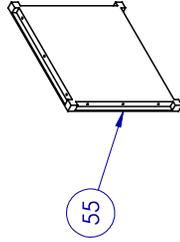
57

E6

53

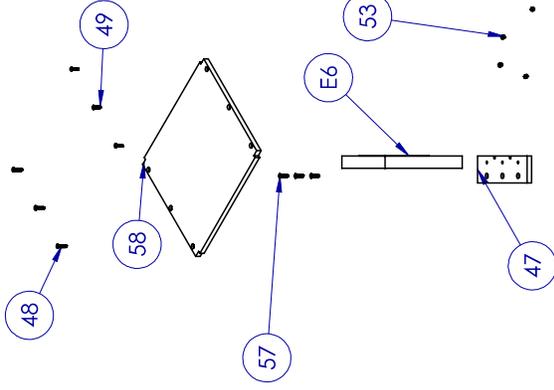
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

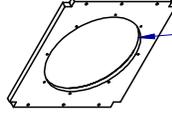
47

1

54

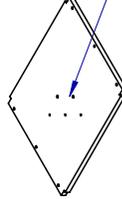
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

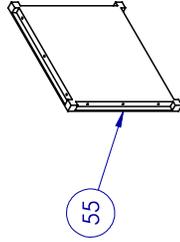
57

E6

53

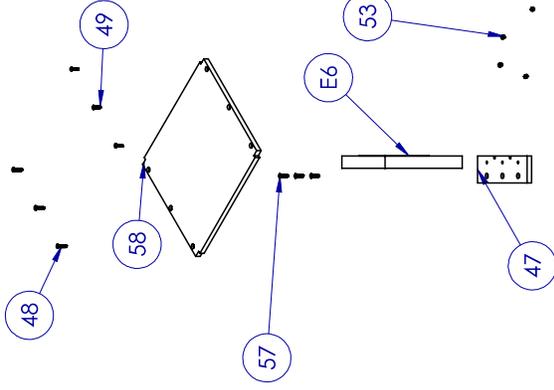
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

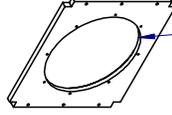
47

1

54

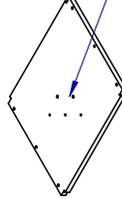
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

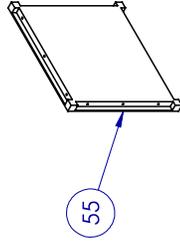
57

E6

53

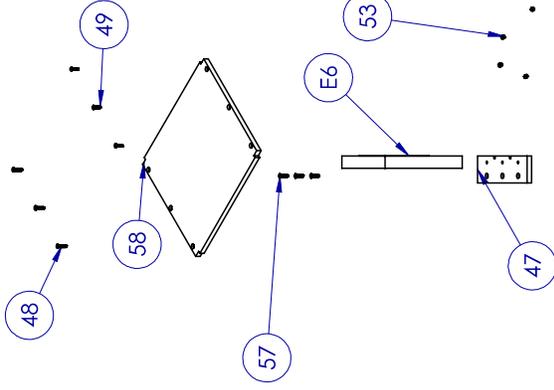
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

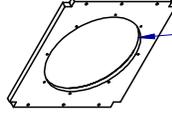
47

1

54

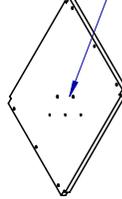
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

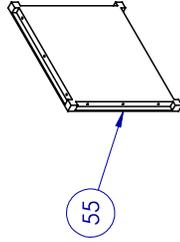
57

E6

53

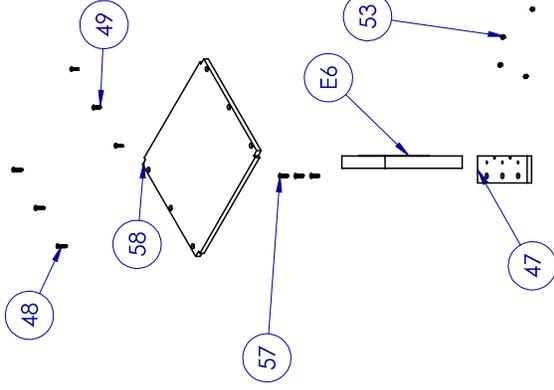
47

3



55

2



48

58

49

57

E6

53

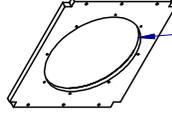
47

1

54

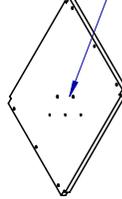
52

48



51

46



48

48

49

4

48

58

49

57

E6

53

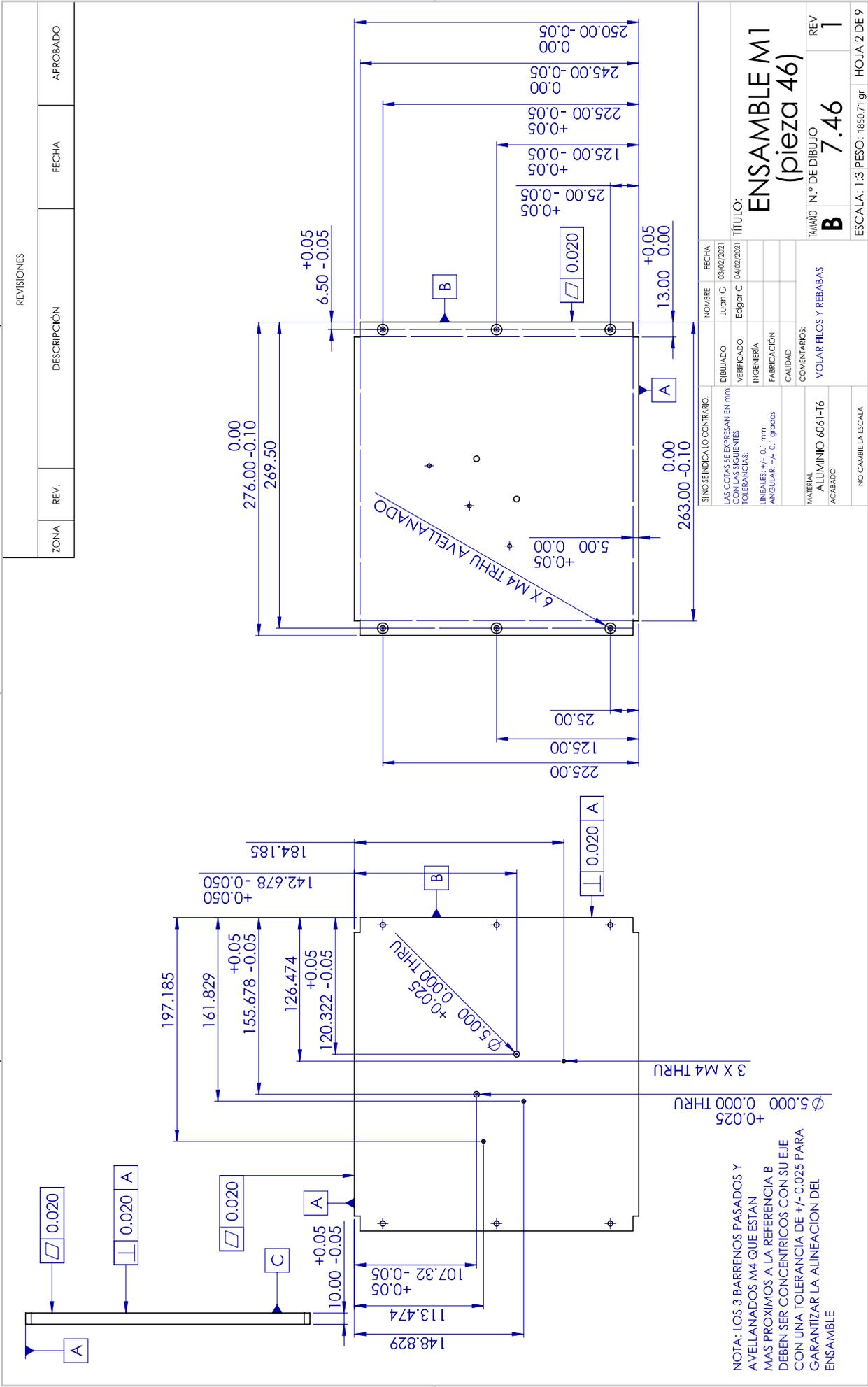
47

1

2

3

4



REVISIONES

DESCRIPCIÓN

REV.

ZONA

FECHA

APROBADO

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm.		Juan G	03/02/2021
COMAS SUCESIONES		Edgar C	04/02/2021
TOLERANCIAS:			
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL		VOLAR FILOS Y REBABAS	
ACABADO		ALUMINIO 6061-T6	
NO CAMBIA LA ESCALA			

NOTA: LOS 3 BARRENOS PASADOS Y AVELLANADOS M4 QUE ESTAN MAS PROXIMOS A LA REFERENCIA B DEBEN SER CONCENRICOS CON SU EJE CON UNA TOLERANCIA DE +/- 0.025 PARA GARANTIZAR LA ALINEACION DEL ENSAMBLE

TÍTULO:
**ENSAMBLE M1
(pieza 46)**

TAMAÑO N.º DE DIBUJO
B 7.46
REV 1
ESCALA: 1:3 PESO: 1850.71 gr HOJA 2 DE 9

1

2

3

4

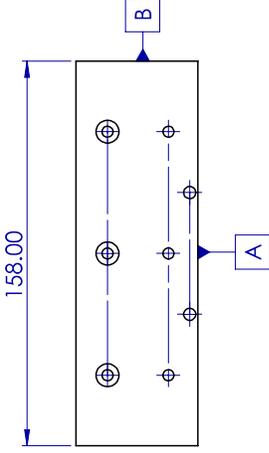
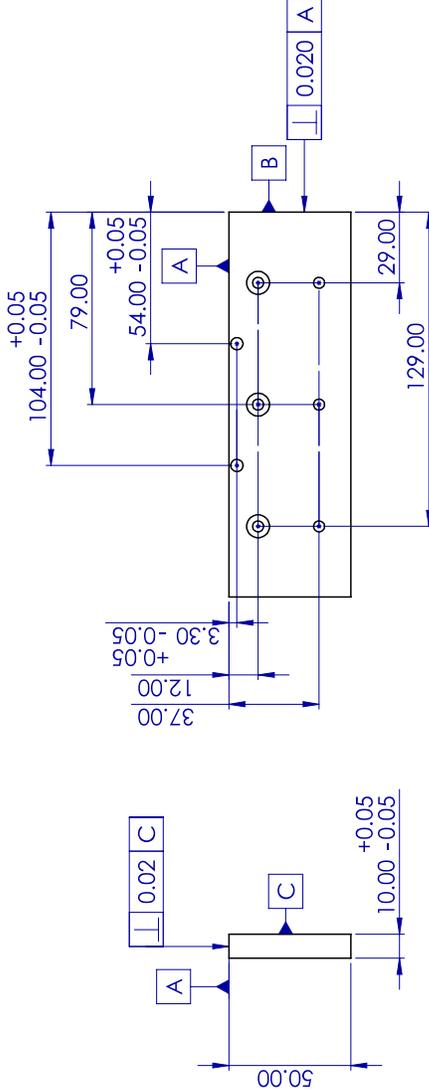
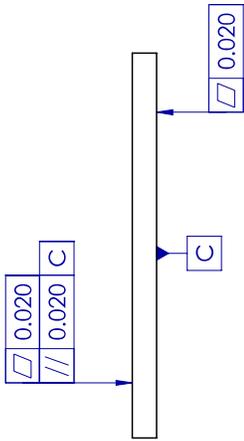
4

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	NOMBRE	FECHA
INGENIERIA	Juan G	05/02/2021
FABRICACION	Edgar C	06/02/2021
ANGULAR: +/- 0.1 grados		
COMENTARIOS:		
MATERIAL	VOLAR FLOS Y REBASAS	
ACABADO	ALUMINIO 6061-T6	
ESCALA: 1:2 PESO: 77.31 gr	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
	B	7.47
		REV
		1
		HOJA 3 DE 9

ENSAMBLE M1
(pieza 47)

3

2

1

B

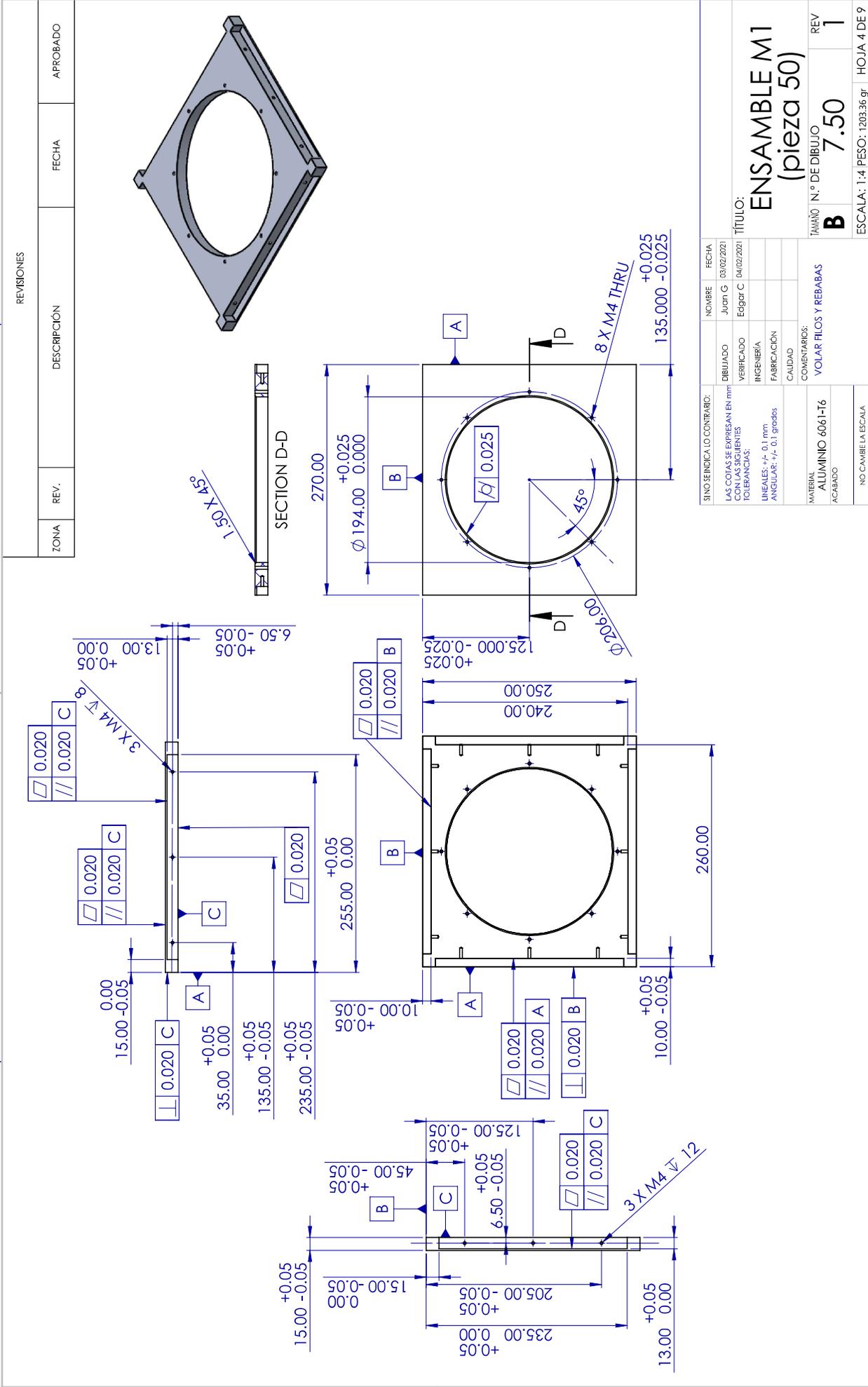
A

4

3

2

1



REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

SINO SE INDICA LO CONTRARIO:	NOMBRE	FECHA
ELABORADO	Juan G	03/02/2021
VERIFICADO	Edgar C	04/02/2021
INGENIERÍA		
FABRICACIÓN		
CALIDAD		
COMENTARIOS:	VOLAR FILOS Y REBABAS	
MATERIAL	ALUMINIO 6061-T6	
ZACABADO		
NO CAMBIA LA ESCALA		

TÍTULO: **ENSAMBLE M1 (pieza 50)**

TAMAÑO N.º DE DIBUJO: **B** 7.50 **1** REV

ESCALA: 1:4 PESO: 1203.36 gr HOJA 4 DE 9

3

2

1

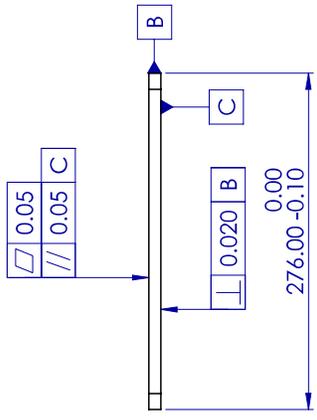
4

3

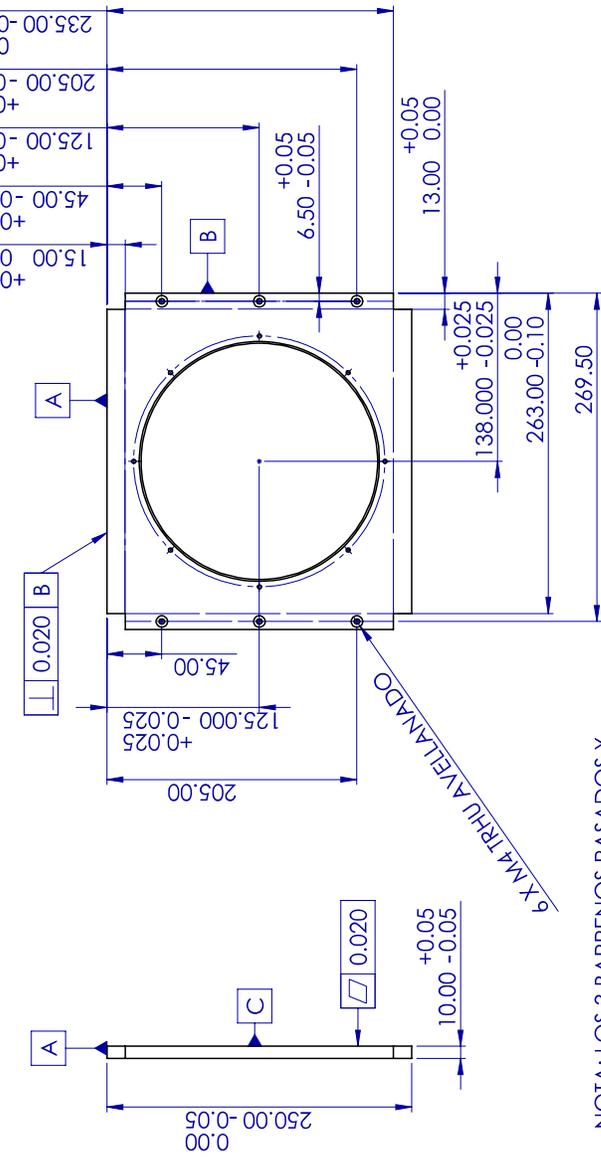
2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SECTION C-C



NOTA: LOS 3 BARRENOS PASADOS Y
 AVELLANADOS M4 QUE ESTAN
 MAS PROXIMOS A LA REFERENCIA B
 DEBEN SER CONCENRICOS CON SU EJE
 CON UNA TOLERANCIA DE +/- 0.025 PARA
 GARANTIZAR LA ALINEACION DEL
 ENSAMBLE

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS ESPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	NOMBRE	FECHA
LINEALES: +/- 0.1 mm ANGULAR: +/- 0.1 grados	Juan G	04/02/2021
	Edgar C	05/02/2021
	INGENIERIA	
	FABRICACION	
	CAUIDAD	
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO	COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBABAS	
	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
	B	7.51
	REV	1
NO CAMBIE LA ESCALA	ESCALA: 1:4 PESO: 1056.62 gr	HOJA 5 DE 9

3

2

1

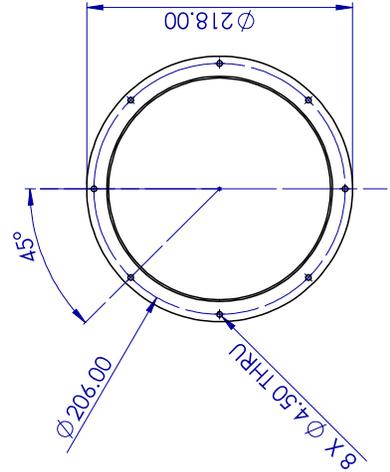
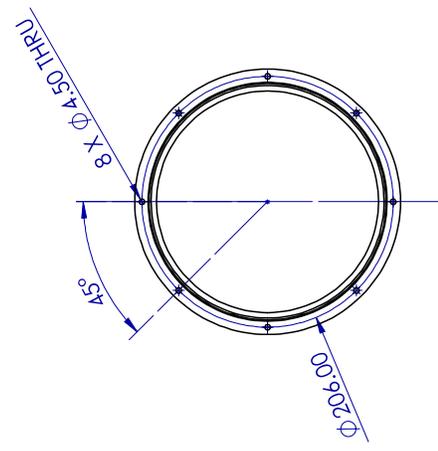
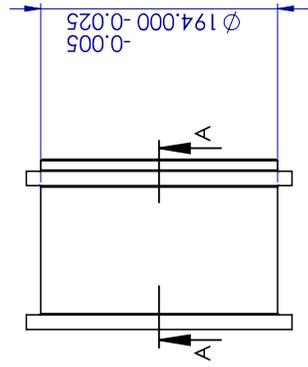
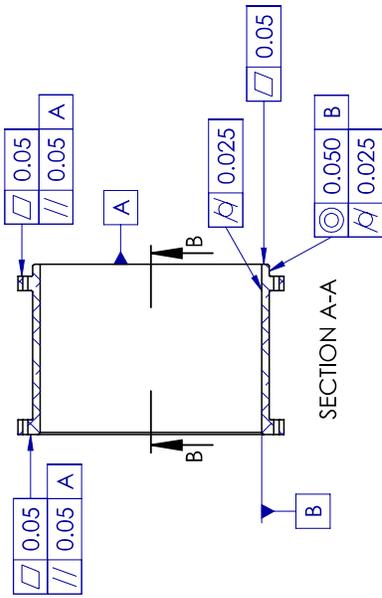
1

2

3

4

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



B

A

B

A

1

2

3

4

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm. CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS: LINEALES: +/- 0.1 mm ANGULAR: +/- 0.1 grados		EBUJADO VERIFICADO INGENIERIA FABRICACION CALIDAD	NOMBRE Juan G. Edgar C.	FECHA 05/02/2021 06/02/2021
TÍTULO: ENSAMBLE M1 (pieza 52)		TAMAÑO N.º DE DIBUJO B 7.52		
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6		COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBABAS		
ACABADO		REV 1		
ESCALA: 1:4 PESO: 1830,55 gr HOJA 6 DE 9				
NO CAMBIE LA ESCALA				

4

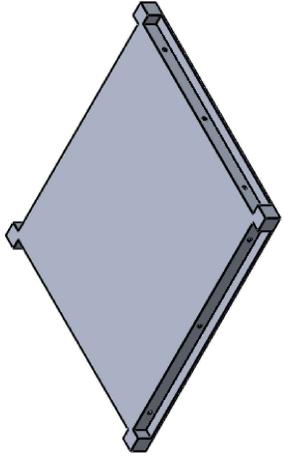
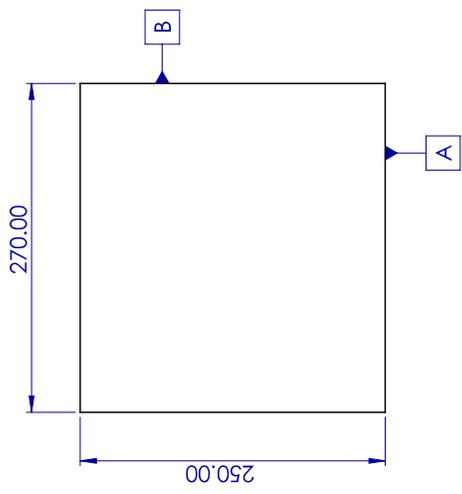
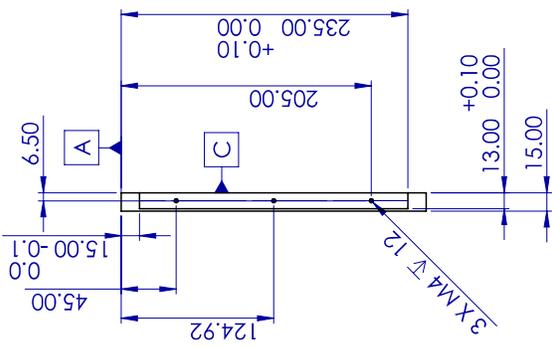
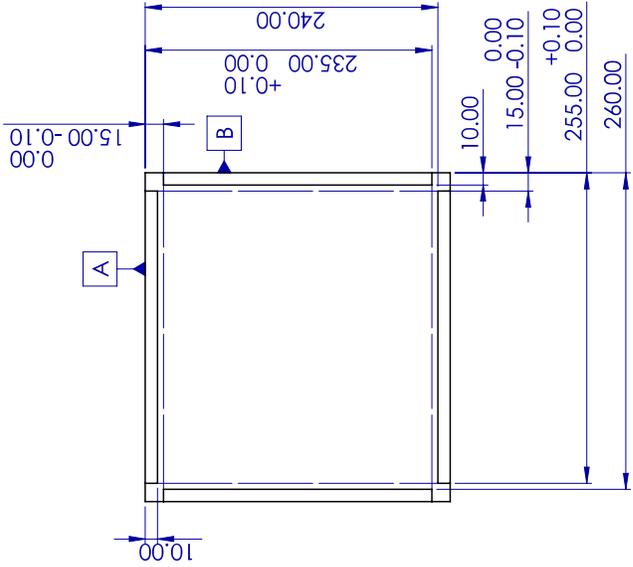
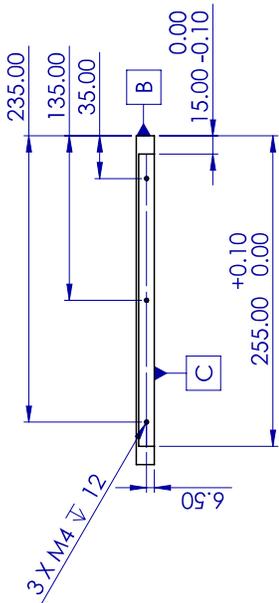
3

2

1

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COIAS SE EXPRESAN EN mm		Juan G	04/02/2021
CON LAS SIGUIENTES		Edgar C	05/02/2021
TOLERANCIAS:			
LINEALES: ± 0.1 mm			
ANGULAR: ± 0.1 grados			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL		VOLAR FILOS Y REBABAS	
ALUMINIO 6061-T6			
ACABADO			
NO CAMBIE LA ESCALA			

TÍTULO:

ENSAMBLE M1
(pieza 55)

TAMAÑO N.º DE DIBUJO
B 7.55 1

ESCALA: 1:4 PESO: 2407.41 gr HOJA 7 DE 9

3

2

1

B

A

4

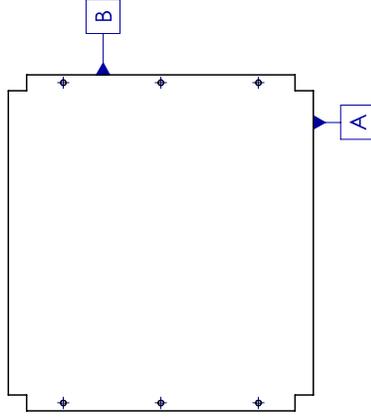
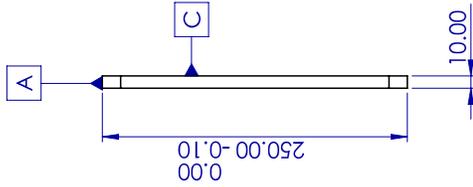
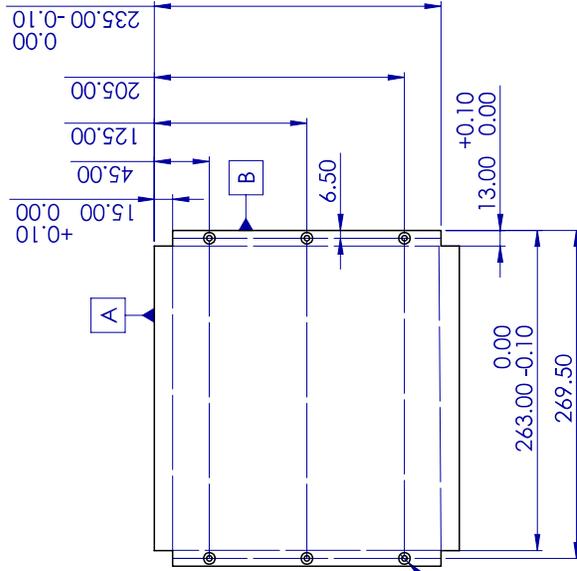
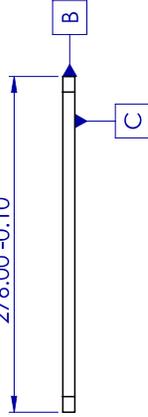
3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

276.00
0.00
-0.10



6 X M4 TRHU AVELANADO

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COYAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		NO. DIBUJO	NOMBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm		VERIFICADO	Juan G	04/02/2021
ANGULAR: ± 0.1 grados		INGENIERIA	Edgar C	05/02/2021
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO		FABRICACION		
COMENTARIOS: VOLAR HILOS Y REBASAS		CAIDAD		
TAMAÑO N.º DE DIBUJO		TÍTULO:		
REV		ENSAMBLE M1 (pieza 56)		
B		7.56		
ESCALA: 1:4 PESO: 1638.43 gr		HOJA 8 DE 9		

3

2

1

B

A

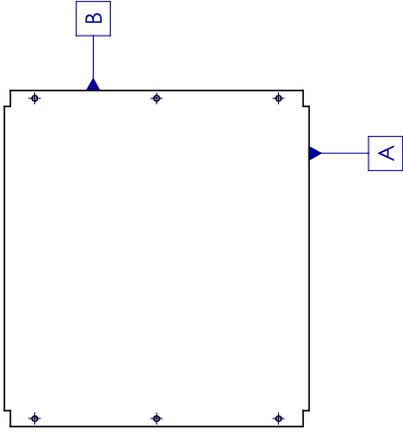
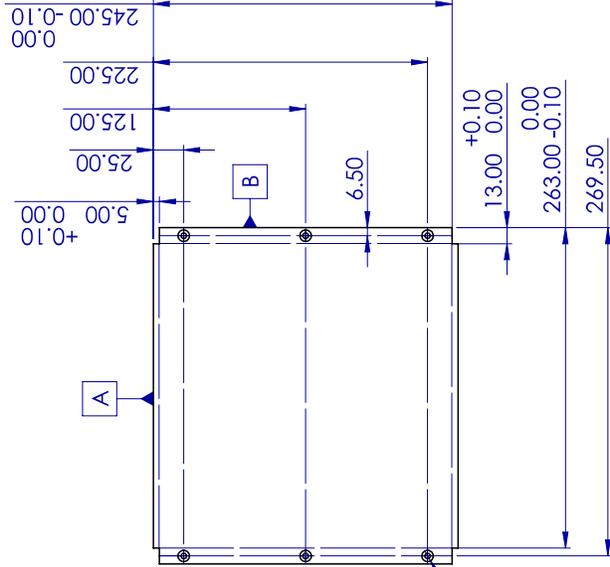
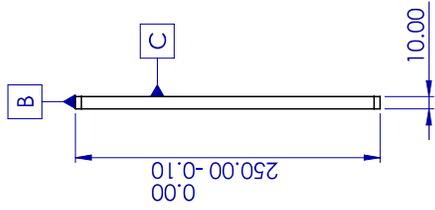
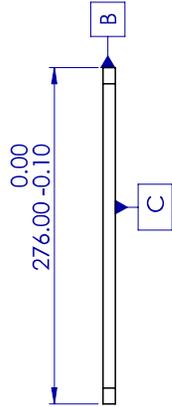
4

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



6 X M4 TRIU AVELLANADO

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	NOMBRE	FECHA
INGENIERIA	Juan G	05/02/2021
FABRICACION	Edgar C	06/02/2021
CAJIDAD		
COMENTARIOS:		
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO	VOLAR FILOS Y REBASAS	
	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
	B	7.58
		REV
		1
ESCALA: 1:4 PESO: 1852.47 gr		HOJA 9 DE 9

TÍTULO:
**ENSAMBLE M1
(pieza 58)**

3

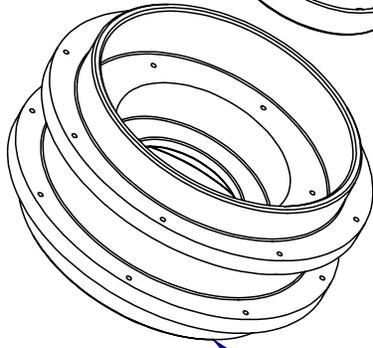
2

1

B

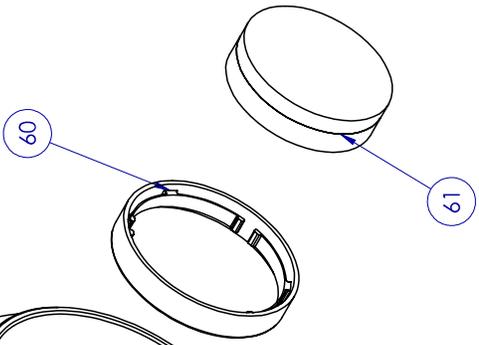
A

4

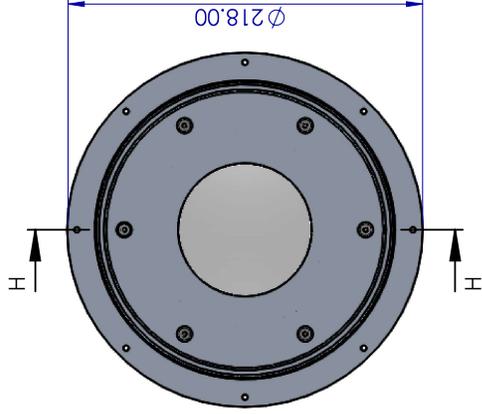


B

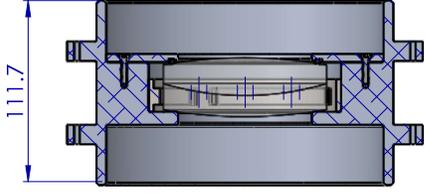
3



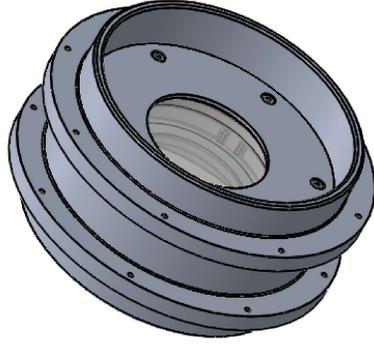
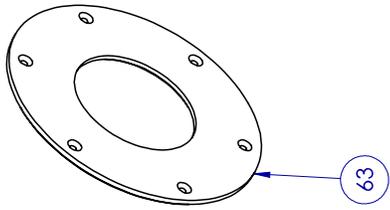
2



1



SECTION H-H



A

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	/MATERIALES
59	BARRIL COL 1-2	1	ALUMINIO 6061-T6
60	ANILLO COL 1-2	1	TITANIO
61	COL 1-2	1	DOBLETE (SLAL-18, CAF2)
62	O-RING COL 1-2	1	Durometer 70A (Medium) 1302N548
63	TAPA COL 1-2	1	ALUMINIO 6061-T6
64	TORNILLOS M4 X 18	6	Black-Oxide Alloy Steel 91294A195

NOMBRE	FECHA
Juan G	05/02/2021
Edgar C	06/02/2021
INGENIERIA	
FABRICACION	
CALIDAD	
COMENTARIOS:	

TÍTULO:
ENSAMBLE COL 1-2

TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV
B	8	1

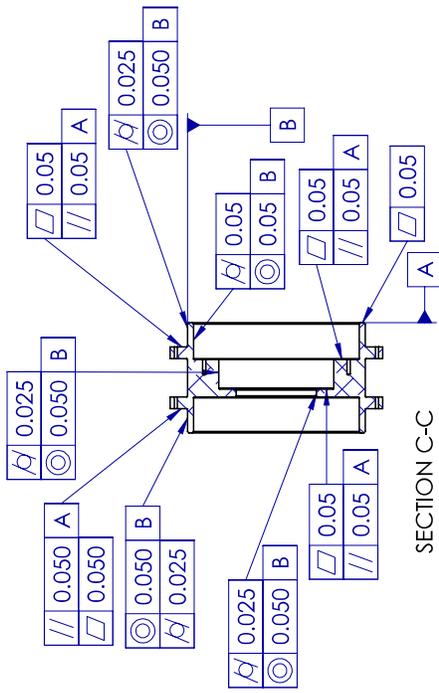
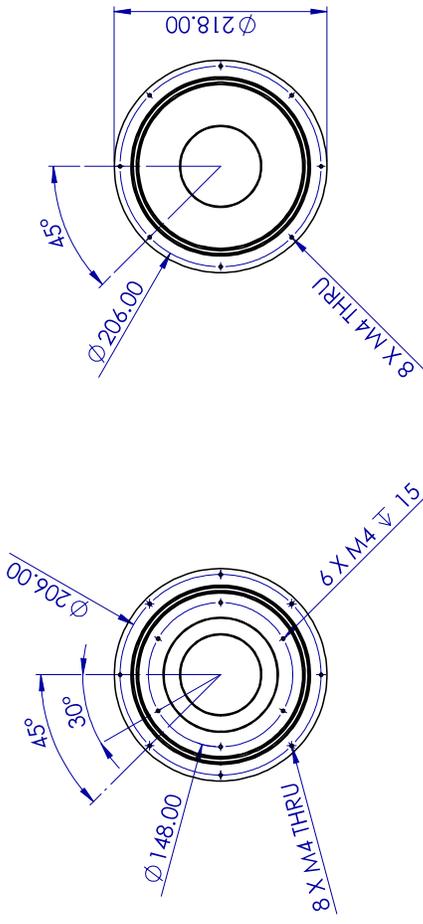
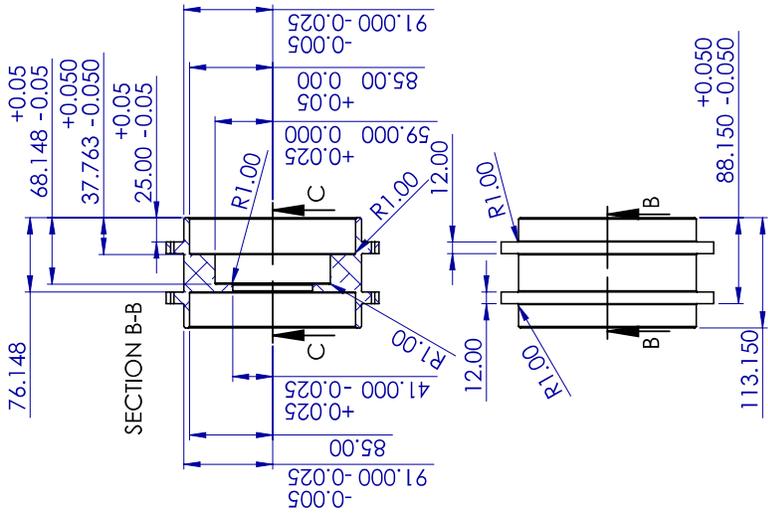
ESCALA: 1:3 PESO: 4030.35 gr HOJA 1 DE 5

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm.		Juan G	05/02/2021
CON SUS DECIMALES		Edgar C	06/02/2021
TOLERANCIAS:			
LINEALES: +/- 0.1 mm			
ANGULAR: +/- 0.1 grados			
MATERIAL		COMENTARIOS:	TAMAÑO N.º DE DIBUJO
ALUMINIO 6061-T6		VOLAR FILOS Y REBABAS	B 8.59
ACABADO			REV 1
NO CAMBIA LA ESCALA			ESCALA: 1:5 PESO: 307423 gr HOJA 2 DE 5

TÍTULO:
ENSAMBLE COL 1-2
(pieza 59)

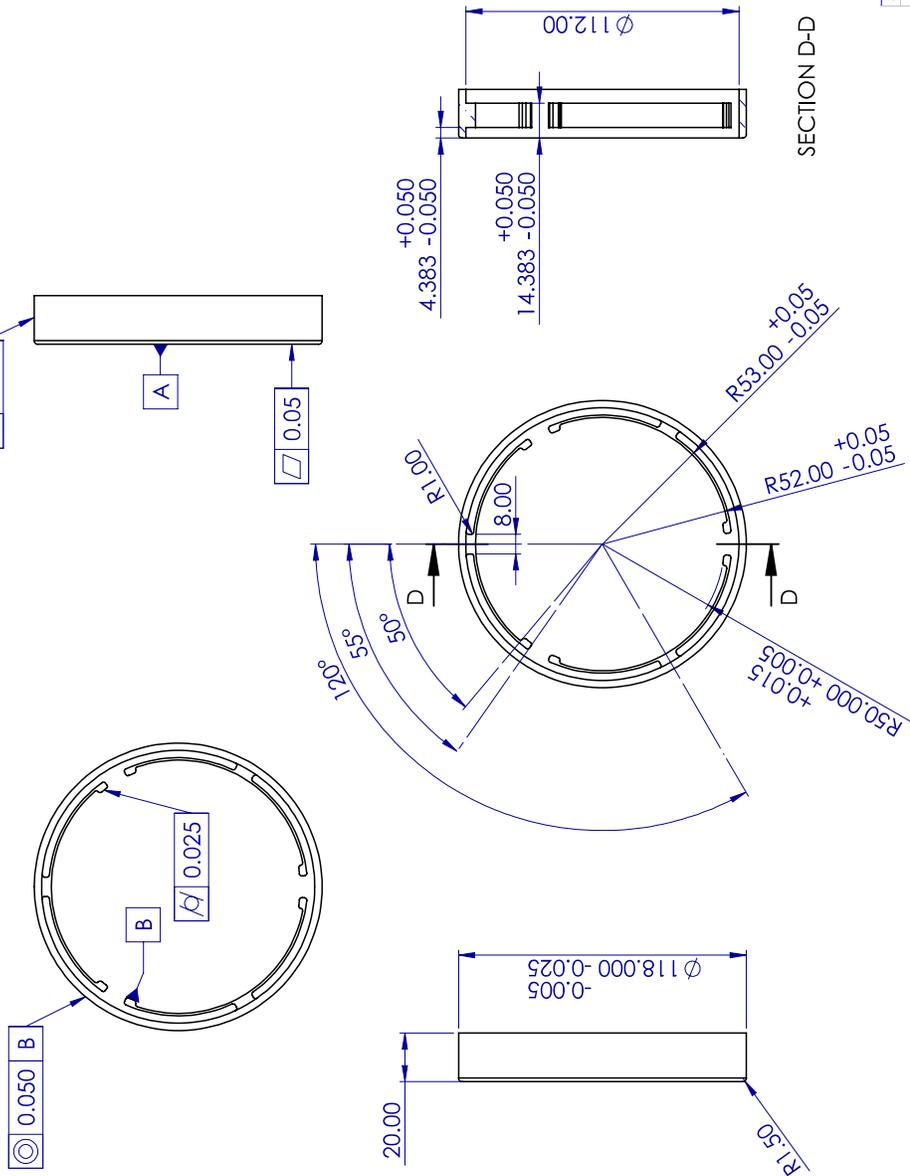
4

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



NOTA : TODOS LOS REDONDEOS NO ACOTADOS DEBEN TENER EL MISMO RADIO DE 1 mm. ES IMPORTANTE RESPETAR ESTA ACLARACION.

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm. UNIDADES: mm. TOLERANCIAS: LINEALES: +/- 0.1 mm ANGULAR: +/- 0.1 grados		EBUJUNDO VERIFICADO	NOMBRE Juan G Edgar C	FECHA 06/02/2021 07/02/2021	
MATERIAL TITANIO		INGENIERIA		TÍTULO: ENSAMBLE COL 1-2 (pieza 60)	
ACABADO NO CAMBIA LA ESCALA		COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBASAS		TAMAÑO N.º DE DIBUJO B 8.60	
				REV 1	
				ESCALA: 1:2 PESO: 118.58 gr HOJA 3 DE 5	

3

2

1

B

A

4

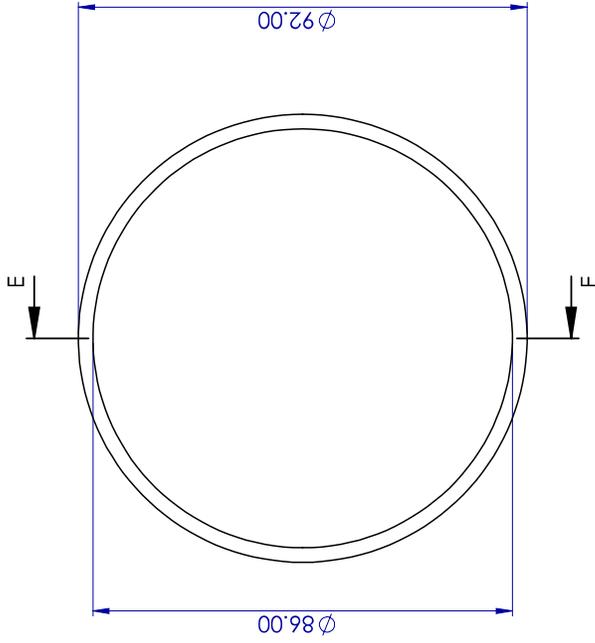
3

2

1

REVISIONES			
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA
			AFROBADO

B



SECTION E-E

A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:	NOMBRE	FECHA
EBUJUNDO	Juan G	06/02/2021
VERIFICADO	Edgar C	07/02/2021
INGENIERIA		
FABRICACION		
CALIDAD		
COMENTARIOS:	TAMANO N.º DE DIBUJO	
MATERIAL Diametro: 70x (material) 1.5023548	REV	
ACABADO	B 8.61 1	
NO CAMBIE LA ESCALA	ESCALA: 1:1 PESO: 1.98 gr HOJA 4 DE 5	

TÍTULO:
ENSAMBLE COL 1-2
(pieza 61)

3

2

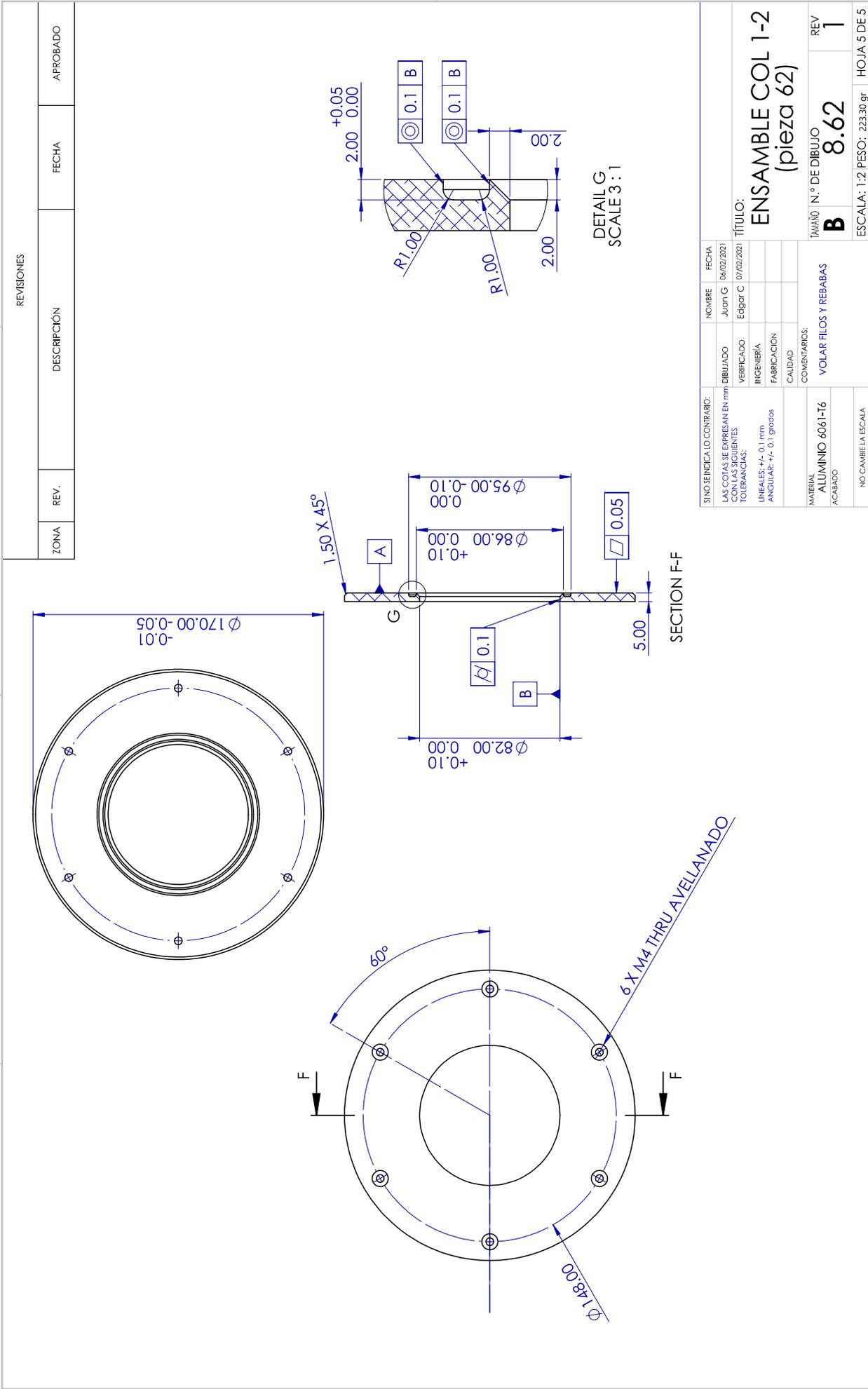
1

4

3

2

1



B

A

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:		NOMBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm ANGULARES: ± 0.1 grados		Juan G	06/02/2021
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO		VERIFICADO	EDGAR C
COMENTARIOS: VOLAR HILOS Y REBABAS		INGENIERIA	
NO CAMBIE LA ESCALA		FABRICACION	
		CALIDAD	
TÍTULO: ENSAMBLE COL 1-2 (pieza 62)		TAMAÑO N.º DE DIBUJO B 8.62	
		REV 1	
		ESCALA: 1:2 PESO: 233.30 gr HOJA 5 DE 5	

3

2

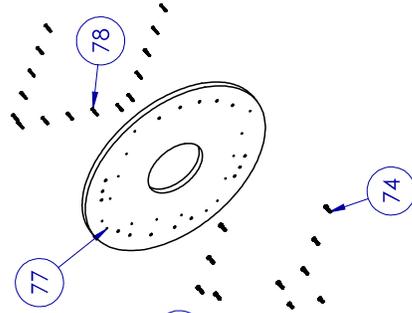
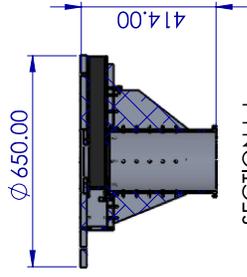
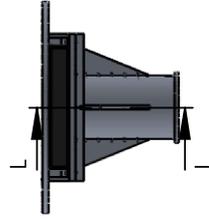
1

4

3

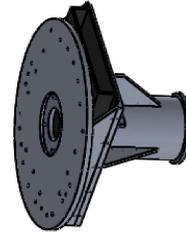
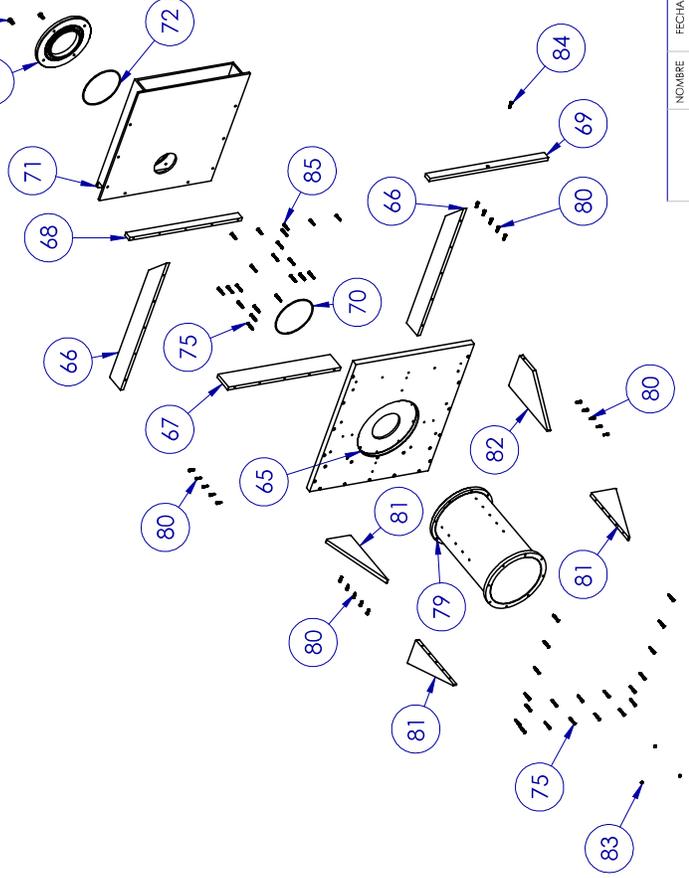
2

1



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	/MATERIALES
65	TAPA 3 GUIADOR	1	ALUMINIO 6061-T6
66	TAPA 2 GUIADOR	2	ALUMINIO 6061-T6
67	TAPA 1 GUIADOR	1	ALUMINIO 6061-T6
68	POSICIONADOR DE RUEDA DE FILTROS	1	ALUMINIO 6061-T6
69	COSTILLA 1	1	ALUMINIO 6061-T6
70	O-RING SELLO	1	Durometer 70A (Medium) 9262K335
71	RUEDA DE FILTROS	1	ALUMINIO 6061-T6
72	O-RING SELLO	1	Durometer 70A (Medium) 9262K335
73	SELLO RUEDA DE FILTROS	1	ALUMINIO 6061-T6
74	TORNILLOS M4 X 25	13	18-8 Stainless Steel 91287A117
75	TORNILLOS M4 X 30	41	Black-Oxide Alloy Steel 91294A200
76	TORNILLOS 1/4(0.25 Inch)	4	18-8 Stainless Steel 92314A315
77	FLANTCH GUIADOR	1	ALUMINIO 6061-T6
78	TORNILLOS M4 X 30	15	Black-Oxide Alloy Steel 91294A200
79	SEPARADOR COLIMADOR-RUEDA DE FILTROS	1	ALUMINIO 6061-T6
80	TORNILLOS M4 X 15	20	18-8 Stainless Steel 91287A115
81	CARTABON 1	3	ALUMINIO 6061-T6
82	CARTABON 2	1	ALUMINIO 6061-T6
83	TUERCAS M4 X 4	4	18-8 Stainless Steel 91828A231
84	TORNILLOS M4 X 20	1	Black-Oxide Alloy Steel 91294A196
85	TORNILLOS M4 X 5	5	Black-Oxide Alloy Steel 91294A198

B



A

NOMBRE	FECHA
Juan G	05/02/2021
Edgar C	06/02/2021

TÍTULO:

**ENSAMBLE ACOPLE
SISTEMA GUIADOR**

TAMAÑO N.º DE DIBUJO

B

9

REV

1

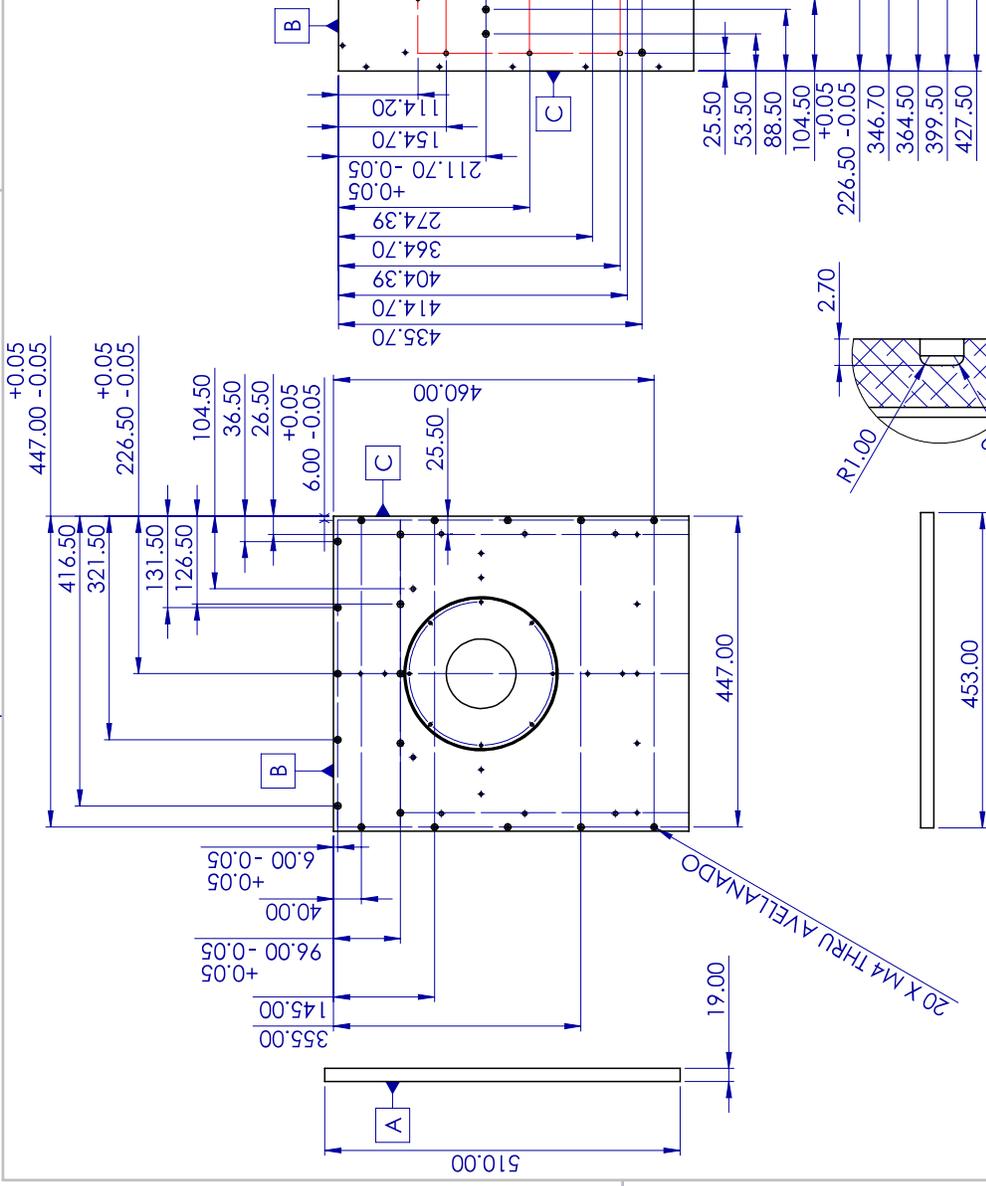
ESCALA: 1:1.5 PESO: 41855.63 gr. HOJA 1 DE 13

3

2

1

REVISIONES		DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO
ZONA	REV.			



SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		Juan G	06/02/2021
TOLERANCIAS		Edgar C	07/02/2021
LINEALES: +/- 0.1 mm			
ANGULAR: +/- 0.1 grados			
MATERIAL		COMENTARIOS:	
ALUMINIO 6061-T6		VOLAR FILOS Y REBABAS	
ACABADO		NO CAMBIE LA ESCALA	

TÍTULO:		TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV
ENSAMBLE ACOPLE SISTEMA GUIADOR (pieza 65)		B	9.65	1
ESCALA: 1:7 PESO: 10430.27 gr		HOJA 2 DE 13		

NOTA: LOS BARRENOS Y AVELLANADOS M4 QUE TIENEN UNA UBICACION DE PRECISION DEBEN SER CONCENTRICOS CON SU EJE CON UNA TOLERANCIA DE +/- 0.05 mm PARA QUE EL INSTRUMENTO SEA ENSAMBLADO CORRECTAMENTE

DETAIL E
SCALE 2 : 1

4

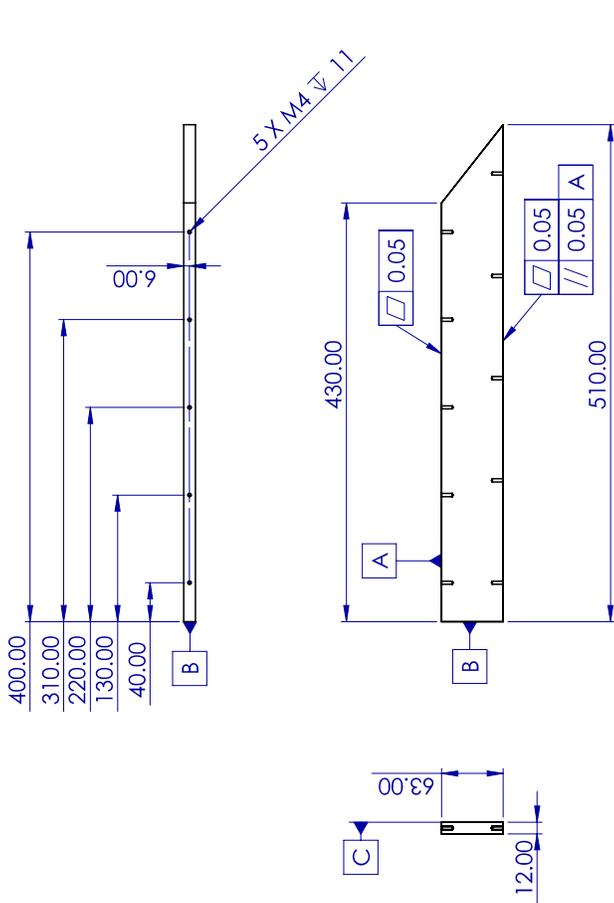
3

2

1

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

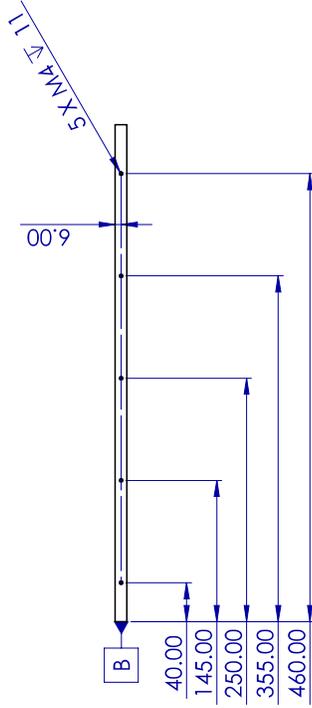


B

B

A

A



SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	NOMBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm ANGULAR: ± 0.1 grados	Juan G	06/02/2021
	VERIFICADO	
	INGENIERIA	Edgar C 07/02/2021
	FABRICACION	
	CALIDAD	
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO	COMENTARIOS: VOLAR FLOS Y REBABAS	TAMAÑO N° DE DIBUJO B 9.66
NO CAMBIE LA ESCALA		ESCALA: 1:5 PESO: 956.75 gr
		HOJA 3 DE 13

TÍTULO:
ENSAMBLE ACOPLE SISTEMA GUIADOR
(pieza 66)

2

3

1

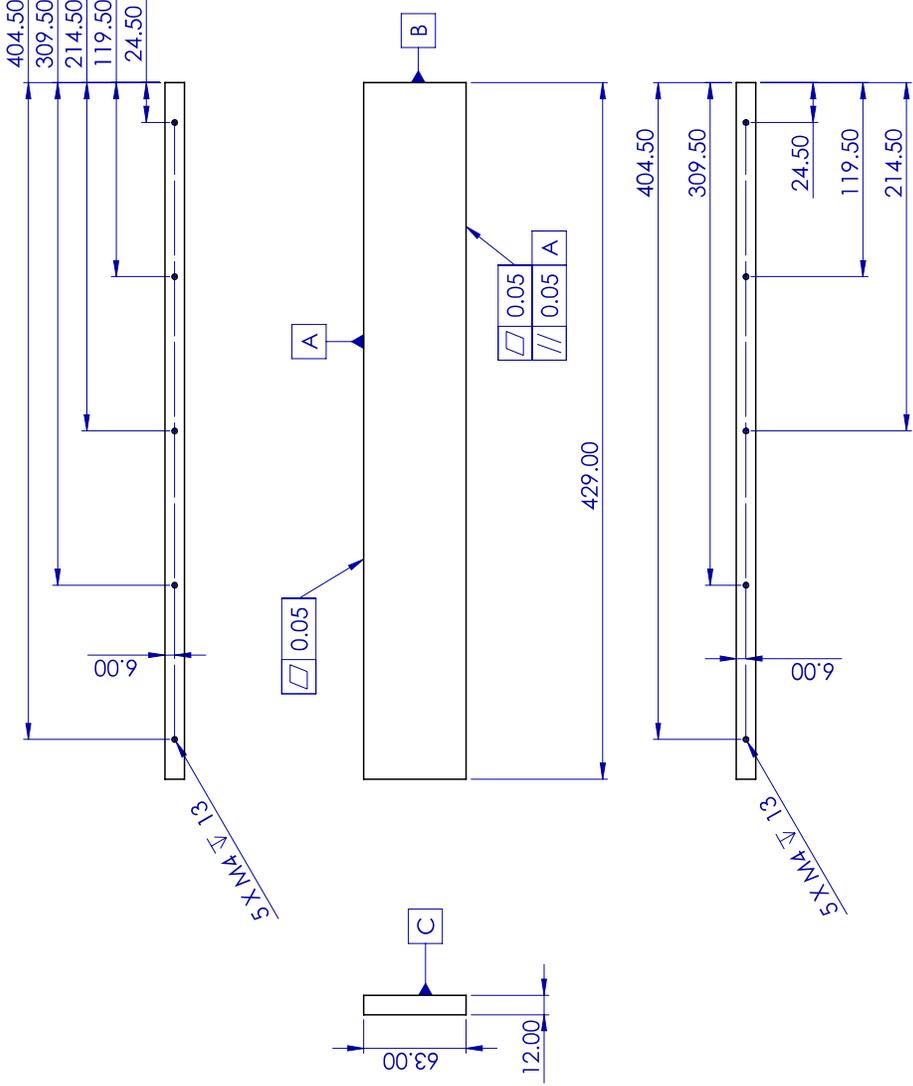
4

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



B

A

3

2

1

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	NO M M M	NOMBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm ANGULAR: ± 0.1 grados	VERIFICADO	Juan G	06/02/2021
	INGENIERIA	Edgar C	07/02/2021
	FABRICACION		
	CALIDAD		
MATERIAL	COMENTARIOS:	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
ALUMINIO 6061-T6	VOLAR FILOS Y REBASAS	B	9.67
ZACABADO			REV
			1
NO CAMBIE LA ESCALA		ESCALA: 1:3 PESO: 872.60 gr	HOJA 4 DE 13

1

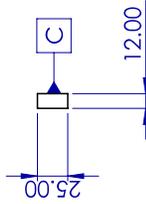
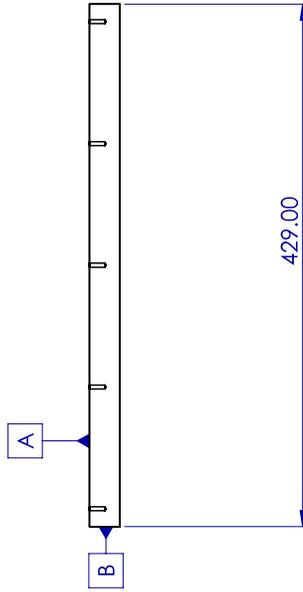
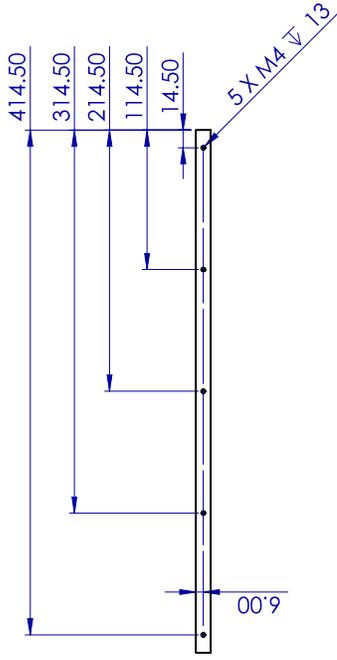
2

3

4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



B

A

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	DBUJADO	NOMBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm ANGULAR: ± 0.1 grados	VERIFICADO	Juan G	06/02/2021
	INGENIERIA	Edgar C	07/02/2021
	FABRICACION		
	CALIDAD		
MATERIAL	COMENTARIOS:		
ALUMINIO 6061-T6	VOLAR FILOS Y REBABAS		
ZACABADO			
NO CAMBIE LA ESCALA			
TÍTULO:	TAMAÑO		
ENSAMBLE ACOUPLE SISTEMA GUIADOR (pieza 68)	N.º DE DIBUJO		
	B 9.68		
	REV		
	1		
ESCALA: 1:4 PESO: 345.95 gr	HOJA 5 DE 13		

2

3

4

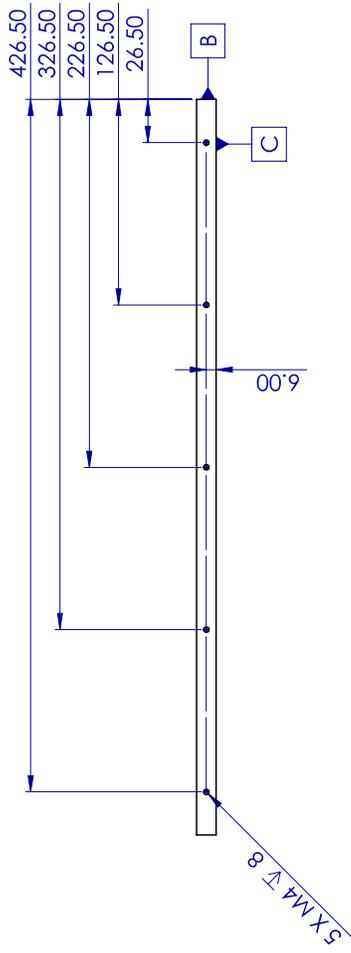
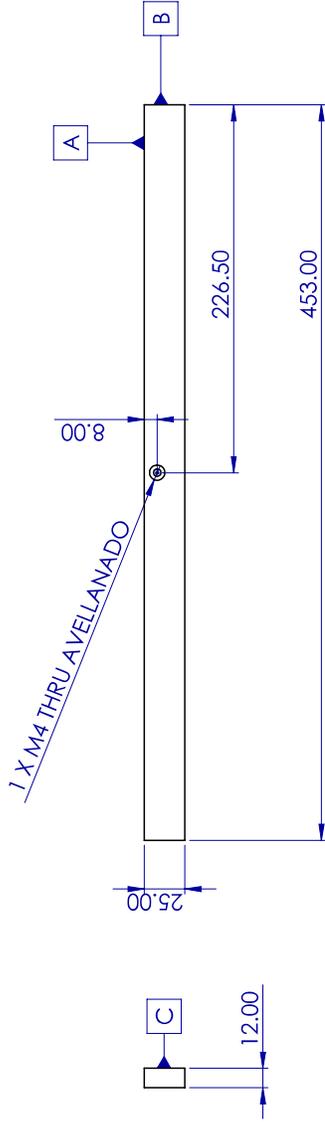
4

3

2

1

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



B

A

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	NOMBRE	FECHA
LINEALES: +/- 0.1 mm ANGULAR: +/- 0.1 grados	Juan G	06/02/2021
	Edgar C	07/02/2021
	INGENIERIA	
	FABRICACION	
	CALIDAD	
	COMENTARIOS:	
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO	VOLAR FILOS Y REBASAS	
NO CAMBIA LA ESCALA		
TAMAÑO	N° DE DIBUJO	REV
B	9.69	1
ESCALA: 1:3 PESO: 365.30 gr		
HOJA 6 DE 13		

3

2

1

1

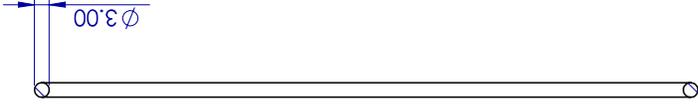
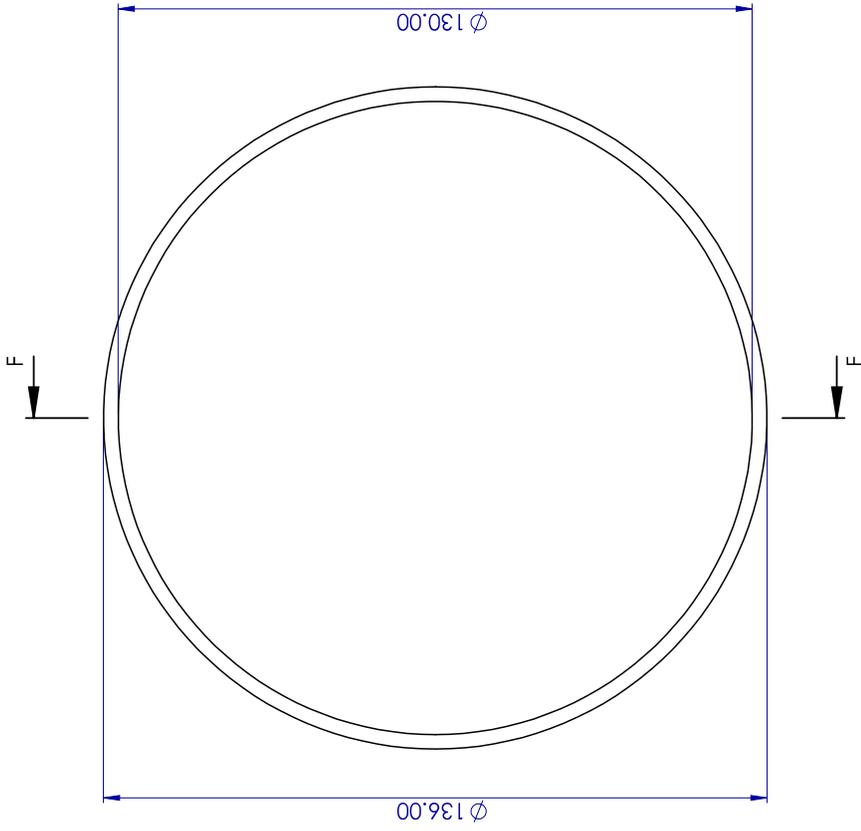
2

3

4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SECTION F-F

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Juan G	06/02/2021	
VERIFICADO	Edgar C	07/02/2021	
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL	Diameter 70A		
ACABADO	(Medium) 9262K335		
NO CAMBIE LA ESCALA		TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
		B	9.70
		ESCALA: 1:1	PESO: 2.95 gr
		HOJA 7 DE 13	

TÍTULO:
ENSAMBLE ACOUPLE SISTEMA GUIADOR
(pieza 70)

REV
1

1

2

3

4

1

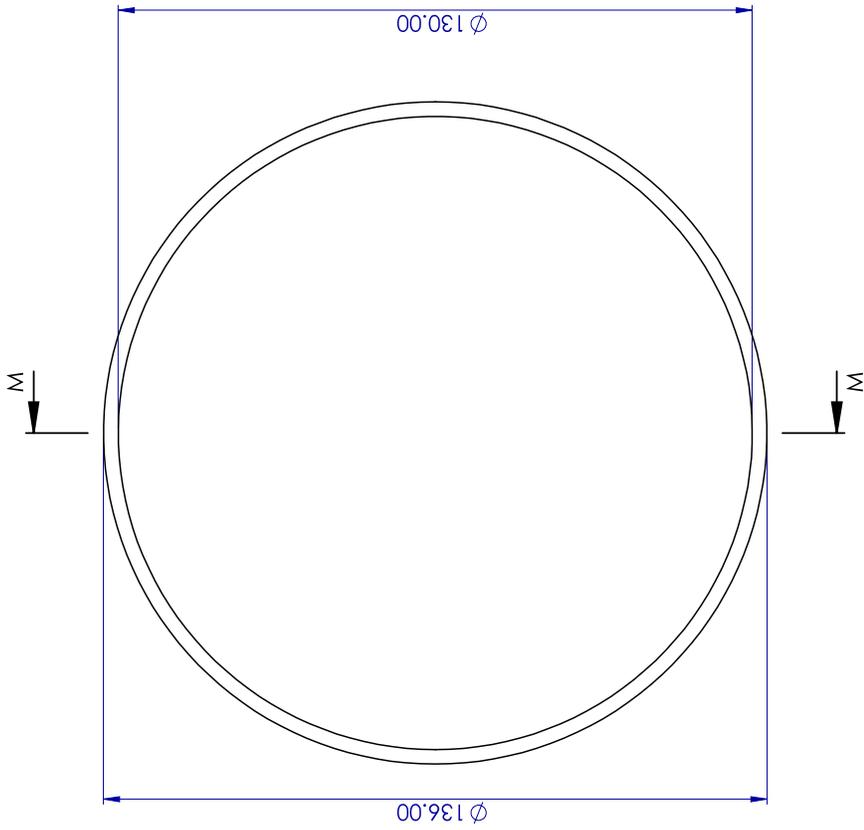
2

3

4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SECTION M-M

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Juan G	06/02/2021	
VERIFICADO	Edgar C	07/02/2021	
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL	Durómetro 70A (Medium) 9262X335		
ACABADO	NO CAMBIA LA ESCALA		
TÍTULO:	ENSAMBLE ACOPLE SISTEMA GUIADOR (pieza 71)		
TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV	
B	9.71	1	
ESCALA:	1:1 PESO: 2.95 gr		HOJA 8 DE 13

1

2

3

4

1

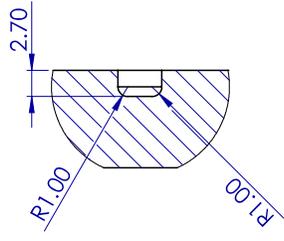
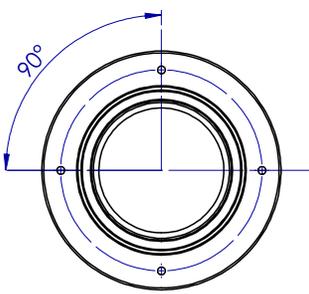
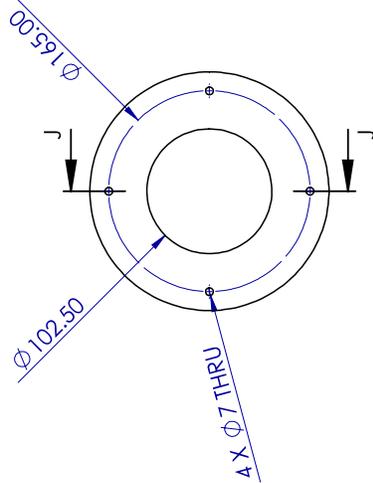
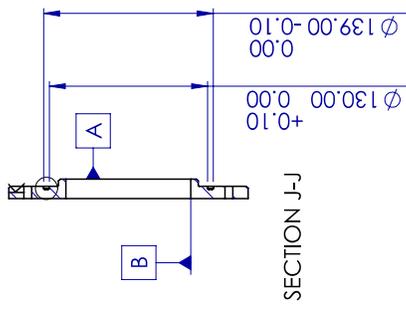
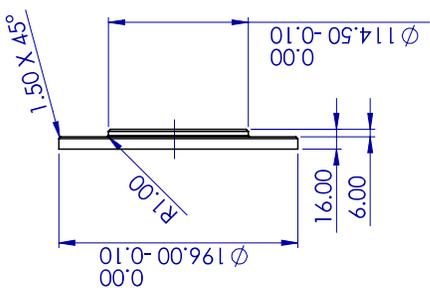
2

3

4

REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



DETAIL K
SCALE 2 : 1

SECTION J-J

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	NOMBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm ANGULAR: ± 0.1 grados	Juan G	06/02/2021
	VERIFICADO	Edgar C 07/02/2021
	INGENIERIA	
	FABRICACION	
	CALIDAD	
MATERIAL	COMENTARIOS:	TAMAÑO
ALUMINIO 6061-T6	VOLAR FILOS Y REBABAS	N.º DE DIBUJO
ACABADO		B
NO CAMBIA LA ESCALA		REV
		1
		ESCALA: 1:4 PESO: 224.25 gr
		HOJA 9 DE 13

TÍTULO:
ENSAMBLE ACOPLE SISTEMA GUIADOR
(pieza 72)

TAMAÑO N.º DE DIBUJO
B 9.72

ESCALA: 1:4 PESO: 224.25 gr
HOJA 9 DE 13

1

2

3

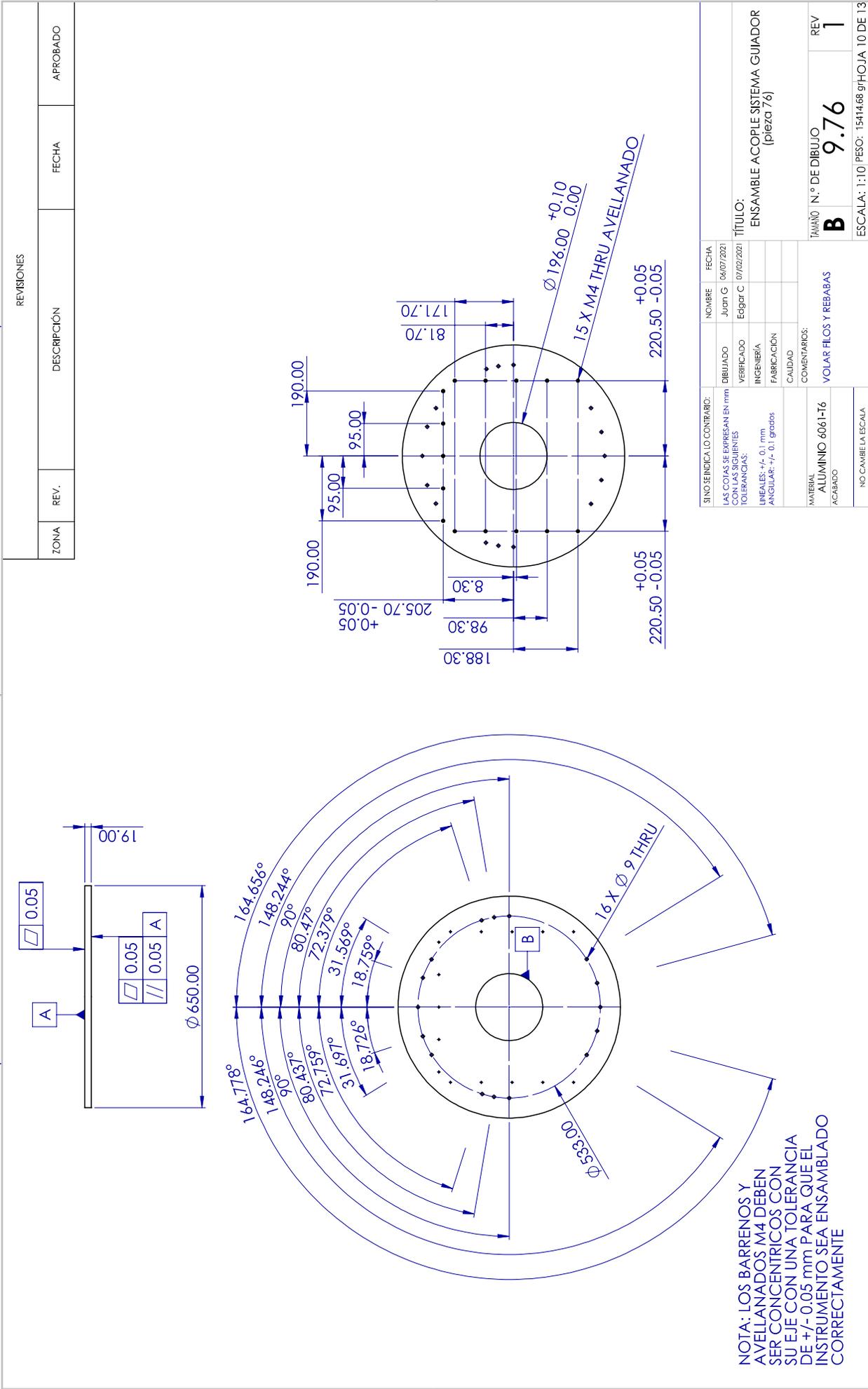
4

4

3

2

1



B

A

3

2

1

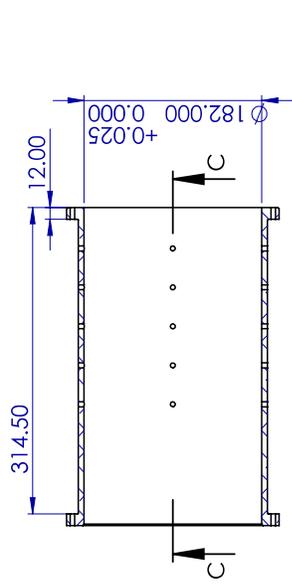
4

3

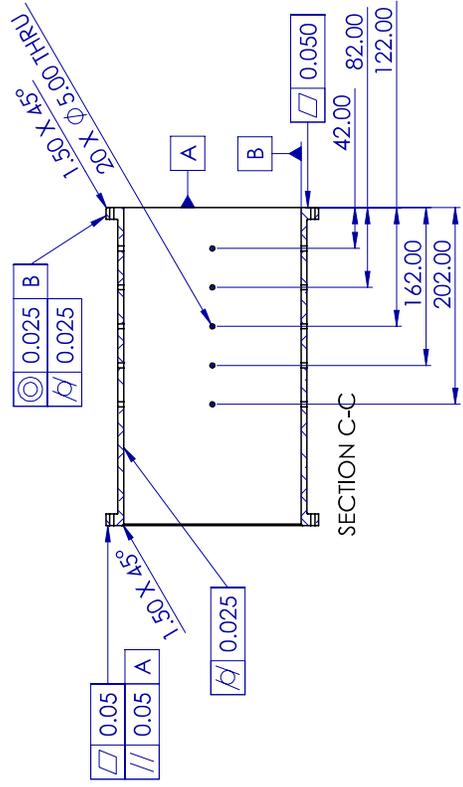
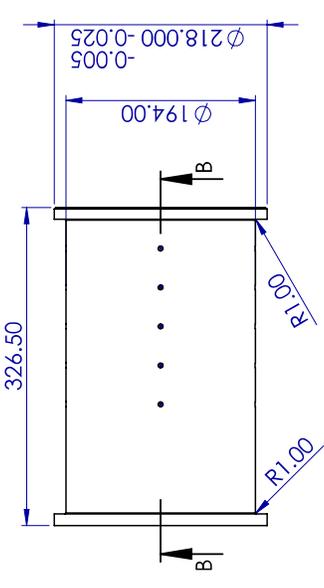
2

1

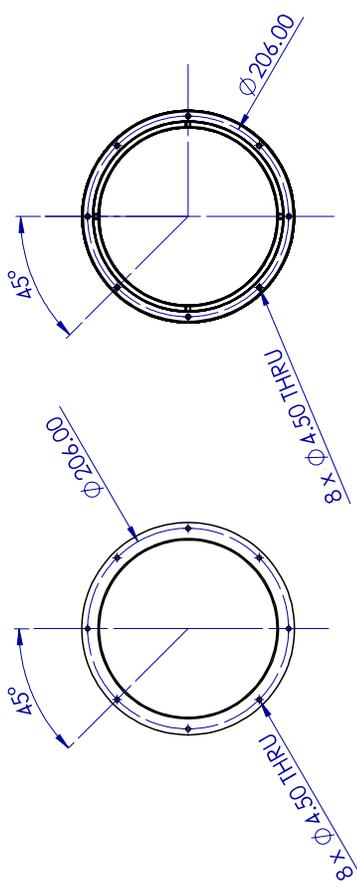
REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



SECTION B-B



SECTION C-C



SINO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm.		Juan G	06/02/2021
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm.		Edgar C	07/02/2021
TOLERANCIAS:			
INGENIERIA			
FABRICACION			
CALIDAD			
COMENTARIOS:			
MATERIAL	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO	REV
ALUMINIO 6061-T6	B	9.78	1
ACABADO	VOLAR FILOS Y REBABAS		
NO CAMBIE LA ESCALA			
ESCALA: 1:5 PESO: 3609.49 gr HOJA 11 DE 13			

3

2

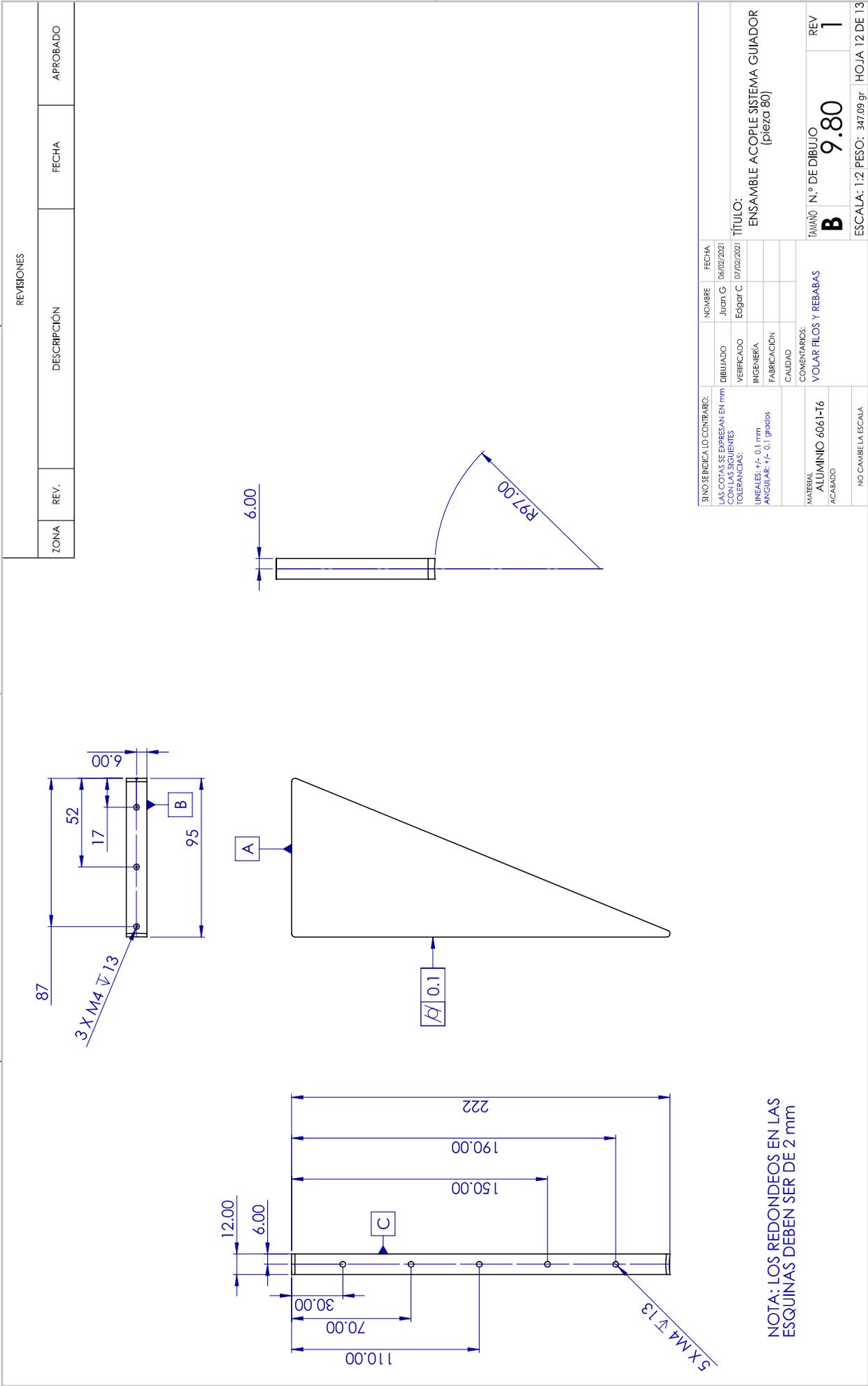
1

4

3

2

1



REVISIONES

ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm CON LAS SIGUIENTES TOLERANCIAS:	NOBRE	FECHA
LINEALES: ± 0.1 mm	Juan G	06/02/2021
ANGULAR: ± 0.1 grados	Edgar C	07/02/2021
	INGENIERIA	
	FABRICACION	
	CALIDAD	
MATERIAL: ALUMINIO 6061-T6 ACABADO	COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBASAS	TAMAÑO N.º DE DIBUJO B 9.80
NO CAMBIE LA ESCALA		ESCALA: 1:2 PESO: 347.09 gr HOJA 12 DE 13

TÍTULO:
ENSAMBLE ACOUPLE SISTEMA GUIADOR
(pieza 80)

REV 1

3

2

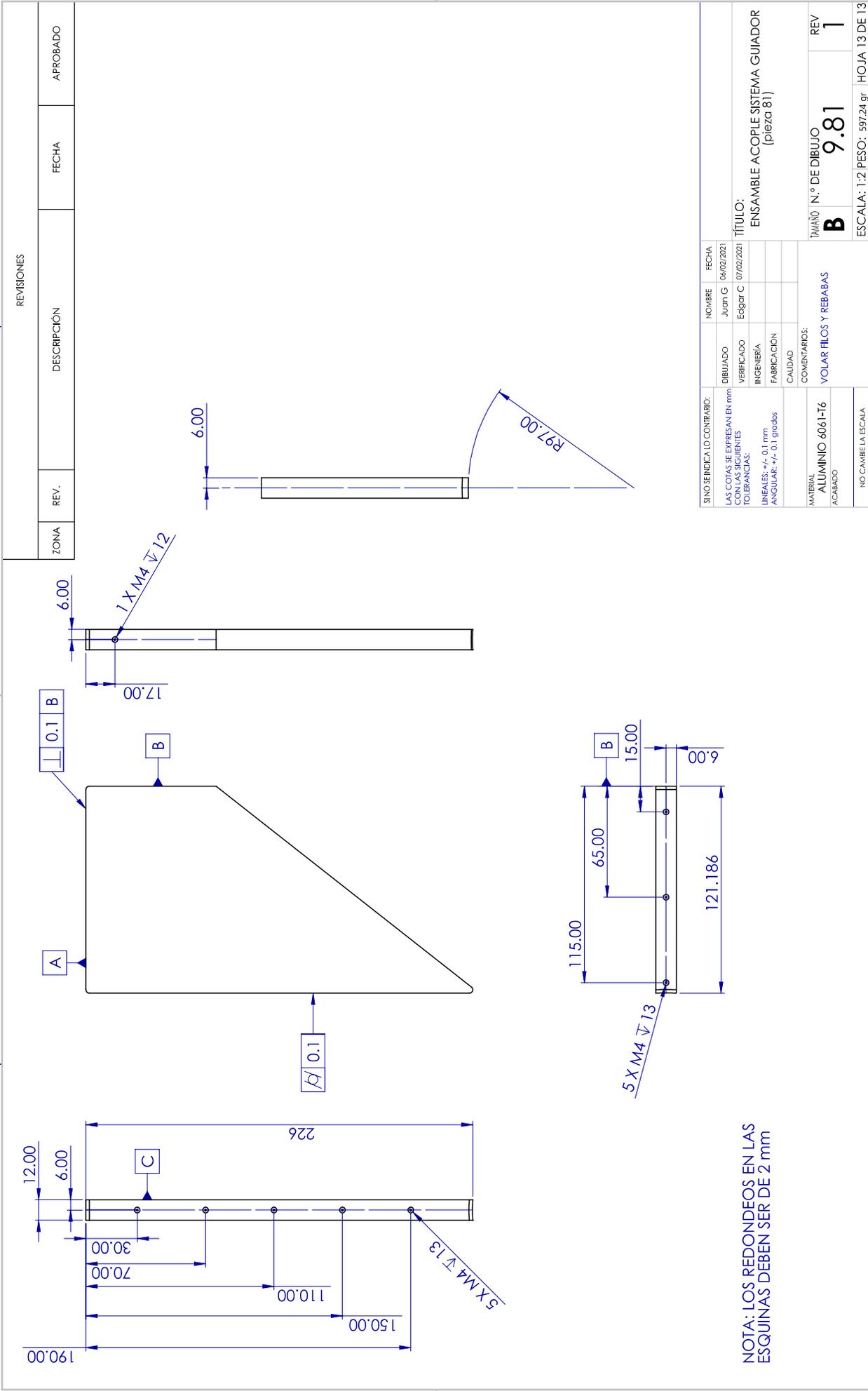
1

1

2

3

4



NOTA: LOS REDONDEOS EN LAS
ESQUINAS DEBEN SER DE 2 mm

SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm. TOLERANCIAS: INGENIERÍA FABRICACIÓN CALIDAD		NO. DE DIBUJO	FECHA
VERIFICADO		06/02/2021	
INGENIERÍA		Edgar C	07/02/2021
FABRICACIÓN			
CALIDAD			
COMENTARIOS: VOLAR FILOS Y REBABAS			
MATERIAL ALUMINIO 6061-T6 ACABADO		TAMAÑO	N.º DE DIBUJO
		B	9.81
		REV	1
NO CAMBIA LA ESCALA		ESCALA: 1:2 PESO: 597.24 gr HOJA 13 DE 13	

1

2

3

4

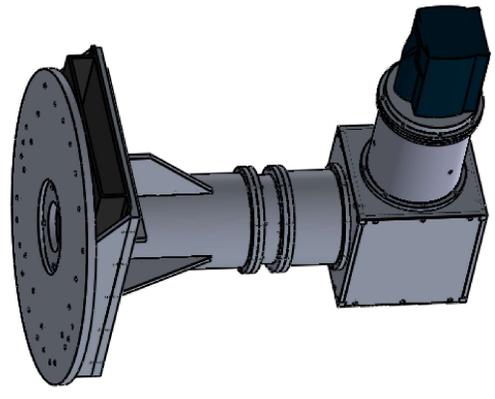
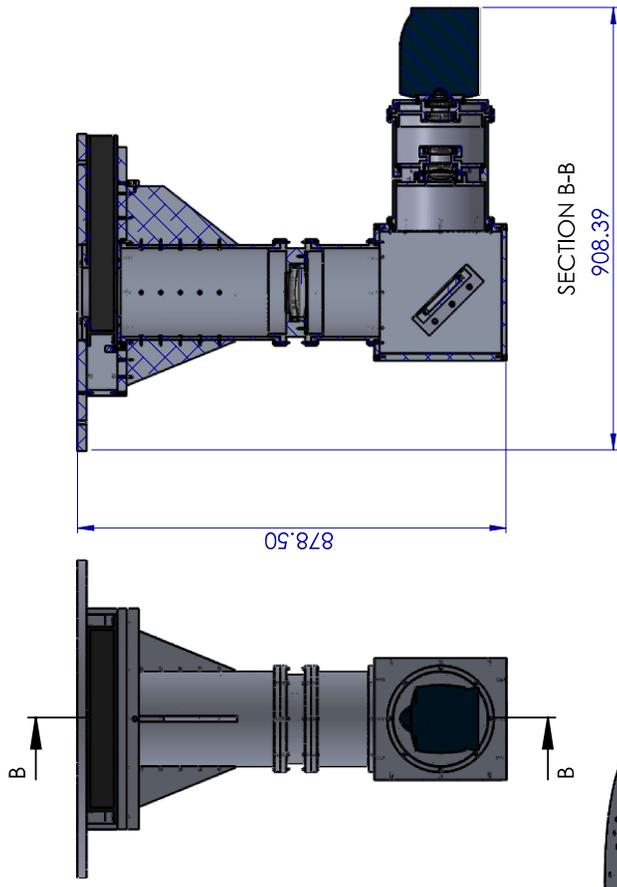
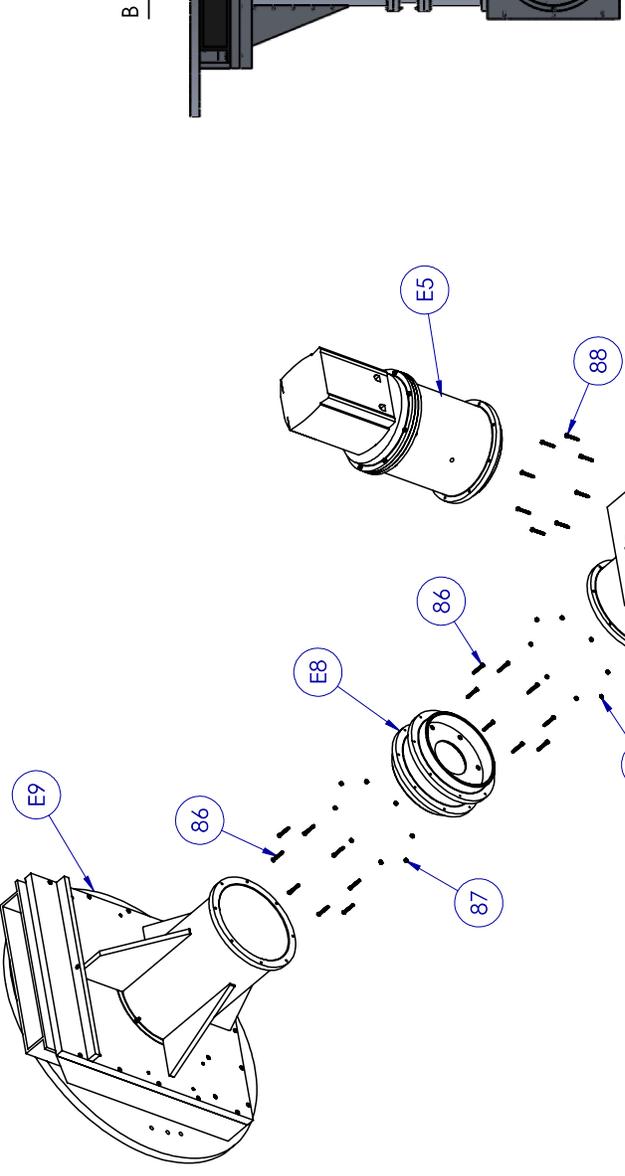
1

2

3

4

REVISIONES				
ZONA	REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA	APROBADO



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	MATERIAL
E7	ENSAMBLE M1	1	18-8 Stainless Steel 91287A115
86	TORNILLOS M4 X 16	16	18-8 Stainless Steel 91287A115
E8	ENSAMBLE COL 1-2	1	18-8 Stainless Steel 91828A231
87	TUERCAS M4 X 16	16	18-8 Stainless Steel 91828A231
E9	ACOPLE SISTEMA GUIADOR	1	
E5	ENSAMBLE CAMARA	1	
88	TORNILLOS M4 X 30	8	Black-Oxide Alloy Steel 91294A200

NOMBRE	FECHA
Juan G	07/02/2021
Edgar C	08/02/2021

TÍTULO:
ENSAMBLE COMPLETO REDUCTOR FOCAL

TAMAÑO N.º DE DIBUJO
B 10

REV
1

ESCALA: 1:10 PESO: 67868.83 gr HOJA 1 DE 1

1

2

3

3

Bibliografía

- [1] Rafael Ortiz Aguilero. *Análisis de la óptica de MEGARA*. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica. sta. María Tonanzintla, Puebla, México, 2012.
- [2] Anees Ahmad. *Handbook of optomechanical engineering*. CRC Press, 1996.
- [3] Gregory S Aldering and Gregory D Bothun. Fast focal-reducing camera for ccd imaging. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 103(670):1296, 1991.
- [4] Farah Alejandro, Cantó Jorge, Palencia Juan, and Rivera Hernán. Diseño optomecánico del barril de la cámara de osiris.
- [5] Mete Bayar. Mechanical design aspects of optomechanical engineering. In *Optical Systems in Engineering I*, volume 193, pages 92–100. International Society for Optics and Photonics, 1979.
- [6] Mete Bayar. Lens barrel optomechanical design principles. *Optical Engineering*, 20(2):202181, 1981.
- [7] Christophe Buisset, Alexis Deboos, Thierry Lépine, Saran Poshyachinda, and Boonrucksar Soonthornthum. Design and performance estimate of a focal reducer for the 2.3 m thai national telescope. *Optics express*, 24(2):1416–1430, 2016.
- [8] Liliana Perea Centeno. Características ccd. <https://astro.inaoep.mx/observatorios/oagh/camara-directa/ccd>, 2019.
- [9] Alejandro Cornejo and Daniel Malacara. Design of a ritchey-chrétien telescope for the inaoe. *Boletín del Instituto de Tonantzintla*, 1:35–44, 1974.
- [10] Alejandro Farah, Carlos Tejada, Jesus Gonzalez, Francisco J Cobos, Beatriz Sanchez, Javier Fuentes, and Elfego Ruiz. Osiris camera barrel optomechanical design. In *Ground-based Instrumentation for Astronomy*, volume 5492, pages 880–890. International Society for Optics and Photonics, 2004.
- [11] Edward H Geyer and Bruno Nelles. Focal reducer techniques for direct imaging and field spectroscopy with large telescopes. In *International Astronomical Union Colloquium*, volume 79, pages 575–583. Cambridge University Press, 1984.
- [12] Frédéric Grandmont, Laurent Drissen, and Simon Thibault. Sitelle, a wide-field imaging fts at the cfh telescope. In *Fourier Transform Spectroscopy*, page FTuB2. Optical Society of America, 2011.

- [13] Eugene Hecht et al. *Optics*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 2002.
- [14] INAOE-OAGH. Archivos de diseño internos inaoe-oagh 2002. page 1, 2002.
- [15] José Carlos M. Robles José Benito Ruíz. Introducción a mtf modulation transfer function. [urlhttps://unanodefoto.webcindario.com/02;ntroduccion_mtf.php](https://unanodefoto.webcindario.com/02;ntroduccion_mtf.php), 2020.
- [16] Henry C King. *The history of the telescope*. Courier Corporation, 2003.
- [17] Juhee Lim, Seunghyuk Chang, Soojong Pak, Youngju Kim, Won-Kee Park, and Myungshin Im. Focal reducer for cquean (camera for quasars in early universe). *Journal of The Korean Astronomical Society*, 46(4):161–172, 2013.
- [18] Daniel Malacara-Hernández and Zacarías Malacara-Hernández. *Handbook of optical design*. CRC Press, 2016.
- [19] Ian S McLean. *Electronic imaging in astronomy: detectors and instrumentation*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [20] Manuel Maldonado Medina, María Luisa García-Vargas, Armando Gil de Paz, Ernesto Sánchez-Blanco Mancera, Ana Pérez Calpena, Jesús Gallego Maestro, Esperanza Carrasco Licea, Francisco M Sánchez Moreno, and José M Vílchez Medina. Megara spectrograph for the gtc: mechanical and opto-mechanical design. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*, volume 8446, page 844655. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [21] José Ramón Valdés Parra. El observatorio astrofísico “guillermo haro”. *saberes compartidos*, 2007.
- [22] Debi C Prasad. Optical design of a focal reducer. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 22:331–337, 1994.
- [23] Revista de divulgación científica y tecnológica de la universidad de Nuevo Leon. <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=11632>, 4 de Febrero de 2023.
- [24] José Sasián. *Introduction to Lens Design*. Cambridge University Press, 2019.
- [25] Daniel J Schroeder. *Astronomical optics*. Elsevier, 1999.
- [26] Katie Schwertz. Field guide to optomechanical design and analysis. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2012.
- [27] Wolfgang Singer, Michael Totzeck, and Herbert Gross. *Handbook of optical systems, volume 3: Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. John Wiley & Sons, 2006.
- [28] Warren J Smith. *Modern optical engineering*. Tata McGraw-Hill Education, 2008.
- [29] Optimax Systems. Manufacturing tolerance chart. [urlhttps://www.optimaxsi.com/innovation/optical-manufacturing-tolerance-chart/](https://www.optimaxsi.com/innovation/optical-manufacturing-tolerance-chart/), 2020.
- [30] tayabeixo.org. http://www.tayabeixo.org/portadas/m8_romero.htm, 4deFebrerode2023.

- [31] Paul R Yoder. *Mounting optics in optical instruments*, volume 181. SPIE press, 2008.
- [32] Paul R Yoder Jr. *Opto-mechanical systems design*. CRC press, 2005.