



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA DEFORMAR UNALENTE ELÁSTICA

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN DISEÑO

PRESENTA

RAFAEL CRUZ AMADOR

DIRECTOR

DR. AGUSTÍN SANTIAGO ALVARADO

CO-DIRECTOR

DR. ANGEL SINUE CRUZ FÉLIX

HEROICA CIUDAD DE HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA

JUNIO 2023

Dedicatoria

A mis padres, cuya vida siempre será una bendición para mí, a mis hermanos, que me han enseñado tanto.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, que me enseñó a trabajar duro.

Agradecimientos

Quiero agradecer al Dr. Agustín Santiago Alvarado y al Dr. Angel Sinue Cruz Félix, que desde el principio confiaron en mí y me apoyaron. Muchas gracias M.T.A.M. Dulce María Clemente Guerrero, M.C. Víctor Manuel Cruz Martínez y Dr. Jorge González García, porque aceptaron amablemente la tarea de ser mis sinodales, gracias por hacer esto posible.

Doy gracias a la Universidad Tecnológica de la Mixteca por forjarme en altas temperaturas, gracias a las y los docentes que me dieron clases durante la carrera, su tiempo y energía dedicado en mí, me hicieron crecer.

Ofrezco mi reconocimiento al Jefe de Carrera: M.A.C. Itzcóatl Bolaños Gómez, y a todas las personas que forman el Instituto de Diseño, al cuerpo técnico de los talleres, al área administrativa, y a toda la gente interviene para que cada alumno de la institución tome sus clases en tiempo y forma,

Reconozco la labor de mis padres Luz María y Aristeo por apoyarme en todo momento, en la tempestad y en la calma, muchísimas gracias a mi hermano mayor, Armando, que me enseñó a tener coraje para salir adelante, al Enano que me vio de niño y siempre acude a mí cuando le necesito, a Mónica por decirme que siempre habría un plato de comida en su casa para mí si lo necesitaba.

Agradezco mucho a Nuria, Judith y Sol por impulsarme, ofrecer su apoyo, darme ánimo y mostrar entusiasmo en este proyecto.

Gracias a mi compañera de vida, Yesenia Ramos Martínez, que además de acrecentar mis sueños y darle humanidad a mi vida, me apoyó incondicionalmente en el cierre de este proceso.

Muchas gracias a todas las personas que de alguna forma intervinieron para que yo realizara esta tesis y en el proyecto de vida que comencé desde primer día que llegué a la UTM, y desde el corazón, gracias infinitas al Dios de Spinoza que me permitió llegar hasta aquí.

Resumen

Este trabajo surge como respuesta a la necesidad de montar una lente elástica a un mecanismo que la someta a condiciones específicas, esto mediante herramientas y métodos que a la ingeniería en diseño concierne. El proyecto, además de mostrar la resolución de dicho planteamiento a través del diseño y construcción de una montura optomecánica, puede ser de utilidad en el campo de la física óptica y aporta a investigaciones precedentes que fueron desarrolladas por académicos de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

El diseño en la montura es peculiar debido a la configuración de transmisión mecánica utilizada, por ello esta tesis es una aportación para aquellos interesados en el diseño y desarrollo de instrumentación optomecánica y forma un compendio de conocimientos científicos, empíricos y de principios de diseño que están intrínsecamente ligados a la ingeniería en diseño y aplicados al diseño optomecánico.

La tesis también aporta una documentación importante en la construcción de superficies esféricas de PDMS y la construcción de componentes mecánicas a través de la impresión en 3D con PLA y ABS.

El proyecto consiste en el diseño y manufactura de una montura opto-mecánica para estudiar aberraciones ópticas de bajo orden mediante una superficie óptica o lente similar a la córnea humana. La lente hecha de Polidimetilsiloxano (PDMS) Sylgard 184, fue sometida al estiramiento y compresión en cuatro puntos simétricos sobre el borde de esta.

Índice general

.....

Capítulo 1

Preliminares

1.1	Introducción	25
1.2	Antecedentes	28
1.3	Planteamiento del problema.....	32
1.4	Justificación	38
1.5	Objetivos y metas	39
1.6	Metodología	40

Capítulo 2

Marco teórico

2.1	El ingeniero en diseño	45
2.2	Óptica geométrica	47
2.3	Principios de diseño mecánico	50
2.4	Principios de diseño optomecánico.	54
2.5	Normas de dibujo.	57
2.6	Diseño y construcción virtual VDC.....	58
2.7	Principales materiales de impresión.....	60
2.8	Tolerancias en la impresión 3D.....	61
2.9	Impresión 3D aplicada a la optomecánica.	64

Capítulo 3

Concepto y diseño

3.1	Características ingenieriles.....	67
3.2	Especificaciones finales.....	76
3.3	Diseño conceptual.	78
3.4	Conceptos de solución.	82
3.5	Reflexión sobre las posibles soluciones	87

Capítulo 4

Diseño de detalle

4.1 Prototipos y pruebas	95
4.2 Selección de prototipo.....	124
4.3 Optimización del borde de la lente	127
4.4 Diseño de bastidor	130
4.5 Prototipo final	135

Capítulo 5

Manufactura

5.1 Impresión de prototipo final	145
5.2 Manufactura de la lente	149
5.3 Ensamble	155

Capítulo 6

Resultados, conclusiones y trabajo a futuro

6.1 Resultados	159
6.2 Conclusiones	160
6.3 Trabajo a futuro	162
Referencias	163
Anexos	169

Índice de Figuras

.....

Figura 1.1. Globo ocular y sus componentes.....	26
Figura 1.2. Ojo humano visto como sistema óptico	27
Figura 1.3. La discretización de elementos finitos de un modelo específico de una córnea humana	28
Figura 1.4. Prototipo digital de montura optomecánica.....	29
Figura 1.5. Altura sagital del perfil corneal esférico. Cruz-Felix, et al. 2015.	29
Figura 1.6. Superficie de refracción con un diámetro de 10 mm. Fuente: Cruz-Felix, y et al. 2015.	30
Figura 1.7. Esquema del mecanismo de longitud focal variable, (a) lente sin compresión, (b) lente comprimida aplicando una fuerza mayor a 0 mediante los estrujadores. G. Bea- die, 2008.....	30
Figura 1.8. Sistema optomecánico realizado por academicos de la Universidad de Pisa, (a) dispositivo bioinspirado: la lente está rodeada por un actuador muscular anular arti- ficial, (b) en el sistema natural: la lente está rodeada por la zónula anular y el músculo ciliar. Federico Carpi, 2011	31
Figura 1.9. Aberraciones de bajo orden: (a) desenfoque, (b) astigmatismo a 0°, (c) astig- matismo a 45°. Angel S. Cruz-Felix, 2015.....	32
Figura 1.10. Dos puntos opuestos de la lente alineados al mismo eje, señalados median- te flechas.	33
Figura 1.11. a) Dos puntos opuestos de la lente alineados a un eje perpendicular al de los dos puntos en la Figura 1.10, b) Intersección de dos ejes perpendiculares sobre la superficie refractiva	34
Figura 1.12 Metodología propuesta para tesis.....	41
Figura 2.1. Actividad central del ingeniero en diseño. Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007.....	45
Figura 2.2. Conjunto de conocimientos para el diseño de la montura optomecánica ..	46
Figura 2.3. Ley de reflexión	47
Figura 2.4. Ley de refracción.....	48
Figura 2.5. Tipos de lentes.....	49
Figura 2.6. Sujeción de lente con anillo de retención.....	54
Figura 2.7. Sujeción de lente mediante brida y tornillo.....	55
Figura 2.8. Tolerancia de forma, (Reyes-Rodriguez, 2018).....	61
Figura 2.9. Tolerancias de forma y posición, (Reyes-Rodriguez, 2018).	62
Figura 2.10. Modelo para probar tolerancias dimensionales en la impresión 3D. Murillo Jaenes, 2017.	63
Figura 2.11. Impresión 3D aplicada a la optomecánica. Robledo 2015.	64
Figura 3.1. Montura AC-1A de la marca Newport®. Newport 2019.....	71

Figura 3.2. Montura SCL60C de la marca ThorLabs®. ThorLabs 2019.	72
Figura 3.3. Montura de lente ajustable 830-0030. EKSMA Optics 2019	73
Figura 3.4. Montura 12.7mm Maximum Optic Diameter X-Y Translating Optic. Edmund Optics 2019.....	73
Figura 3.5. Postes y adaptadores de la marca STANDA LTD®.....	74
Figura 3.6. Modelos de factibilidad técnica.....	76
Figura 3.7. Partes básicas para una lente.	78
Figura 3.8 Diagrama funcional general de montura optomecánica para introducir errores refractivos de bajo orden en una lente elástica.	78
Figura 3.9. Descomposición del diagrama funcional de la montura optomecánica para introducir errores refractivos de bajo orden en una lente elástica.	79
Figura 3.10. Cargas puntuales para ocasionar compresión: a) con 2 cargas, b) con 4 cargas.	80
Figura 3.11. Cargas puntuales para ocasionar tensión: (a) con 4 cargas y (b) con 2 cargas.....	80
Figura 3.12. Cargas puntuales mixtas para ocasionar tensión y compresión al mismo tiempo.....	81
Figura 3.13. Secuencia de la lente elástica aislada de la descomposición del diagrama funcional de la montura optomecánica.	82
Figura 3.14. Combinación de soluciones: geometría del borde de la lente, brida, tornillo.....	83
Figura 3.15. Combinación de soluciones: geometría del borde de la lente, brida, tornillo.....	83
Figura 3.16. Combinación de soluciones: aro, tenazas, biela.	84
Figura 3.17. Combinación de soluciones: aro, celda, tornillo.	84
Figura 3.18. Combinación de soluciones: geometría del borde de la lente, prisionero, cremallera.	85
Figura 3.19. Combinación de soluciones: geometría del borde de la lente, celda, cremallera.	85
Figura 3.20. Bocetos del prototipo MO4MP1.	88
Figura 3.21. Bocetos del prototipo MO4MP2.....	89
Figura 3.22. Bocetos del prototipo MO2MP3.	90
Figura 3.23. Bocetos del prototipo MO2MP3.	91
Figura 3.24. Bocetos del ensamble cabo-cremallera del prototipo MO2MP3.....	92
Figura 4.1. Lente del prototipo MO2MP1.....	95
Figura 4.2. Prototipo MO2MP1, (a) vista superior, (b) corte transversal, (c) vista inferior..	96
Figura 4.3. Explosivo del prototipo MO2MP1.....	97
Figura 4.4. Dimensiones del prototipo MO2MP1.	98
Figura 4.5. Mallado de la lente para MO4MP1.....	100
Figura 4.6. Sujeciones y deslizamientos de la lente.	100
Figura 4.7. Primer análisis de tensión MO4MP1.	101

Figura 4.8. Primer análisis de desplazamiento MO4MP1.	101
Figura 4.9. Primer análisis de deformaciones unitarias MO4MP1.	102
Figura 4.10. Segundo análisis estático MO4MP1: (a) tensión, (b) desplazamiento, (c) deformaciones unitarias.....	103
Figura 4.11. Tercer análisis estático MO4MP1: (a) tensión, (b) desplazamiento, (c) deformaciones unitarias.	104
Figura 4.12. Lente con cabos del modelos MO4MP2.....	105
Figura 4.13. Modelo MO4MP2: (a) vista superior, (b) vista frontal y (c) vista inferior..	106
Figura 4.14. Modelo MO4MP2: (a) vista lateral, (b) corte longitudinal y (c) vista en perspectiva.	107
Figura 4.15. Dimensiones del modelo MO4MP2: (a) vista frontal, (b) vista lateral y (c) vista inferior.....	108
Figura 4.16. Sujeciones y deslizamientos de la lente MO4MP2. (a) carga mediante los prisioneros, (b) sujeción por las cuatro paredes de un cabo, (c) sujeción en los cuatro cabos.	109
Figura 4.17. Mallado de la lente MO4MP2.....	110
Figura 4.18. Primer análisis estático MO4MP2: (a) tensión, (b) desplazamiento, (c) deformaciones unitarias.	111
Figura 4.19. Segundo análisis estático MO4MP2: (a) tensión, (b) desplazamiento, (c) deformaciones unitarias.....	112
Figura 4.20. Segundo análisis estático MO4MP2: (a) tensión, (b) desplazamiento, (c) deformaciones unitarias.....	113
Figura 4.21. Lente para modelo MO2MP1.....	114
Figura 4.22. Prototipo MO2MP1: (a) vista inferior, (b) vista en perspectiva.	115
Figura 4.23. Prototipo MO2MP1: (a) vista lateral (b) vista posterior.	116
Figura 4.24. Prototipo MO2MP1: (a) vista explosionada (b) corte transversal.	117
Figura 4.25. Dimensiones generales del prototipo MO2MP1: (a) vista frontal, (b) vista lateral y (c) vista inferior.....	118
Figura 4.26. Parámetros del mallado del prototipo MO2MP1.....	119
Figura 4.27. Sujeciones de la lente del MO2MP: (a) sujeción en los cordones del borde de la lente, (b) sujeción en el extremo de uno de los cabos.....	120
Figura 4.28. Primer análisis de tensión del modelo MO2MP1.....	120
Figura 4.29. Primer análisis de desplazamiento del modelo MO2MP1.	121
Figura 4.30. Primer análisis de deformaciones unitarias del modelo MO2MP1.....	121
Figura 4.31. Segundo análisis estático del modelo MO2MP1: (a) tensión, (b) desplazamiento y (c) deformaciones unitarias.....	122
Figura 4.32. Tercer análisis estático del modelo MO2MP1: (a) tensión, (b) desplazamiento y (c) deformaciones unitarias.....	123
Figura 4.33. Variaciones en el diseño de la lente del modelo MO2MP1: a) lente 2, b) lente 3, c) lente 4.....	127
Figura 4.34. Optimización de la lente para el prototipo MO2MP1: (a) lente 2, (b) lente 3 y (c) lente 4.....	129

Figura 4.35. Mallado y análisis de tensión.	132
Figura 4.36. Tabla de escenarios y gráfica de la relación espesor-tensión-masa.	133
Figura 4.37. Bastidor final: (a) vista lateral, (b) vista en perspectiva.	134
Figura 4.38. Vista en perspectiva del prototipo final M02MP1.	135
Figura 4.39. Montura optomecánica final: (a) vista superior, (b) vista frontal y (c) vista inferior.	136
Figura 4.40. Montura optomecánica final: (a) vista lateral, (b) vista posterior.	137
Figura 4.41. Corte transversal y longitudinal de la montura optomecánica final.	138
Figura 4.42. Corte sobre el eje longitudinal de un par de cabos de la lente de la montura optomecánica final.	139
Figura 4.43. Vista explosionada.	140
Figura 4.44. Vista explosionada 2.	141
Figura 5.1. Pruebas de impresión de engrane: (a) impreso en ABS y (b) impreso en PLA.	145
Figura 5.2. Impresora 3D.	146
Figura 5.3. Base adaptada a la impresión: (a) dos vistas en perspectiva con estructura de apoyo, (b) dos vistas en perspectiva del modelo original.	147
Figura 5.4. Pruebas en moldes.	149
Figura 5.5. Preparación de superficie para maquinado.	150
Figura 5.6. Montaje de material para maquinar y primeros cortes.	151
Figura 5.7. Moldes maquinados y acabado final: (a) molde hembra, (b) molde macho, (c) ensamble de los moldes, (d) pulido de los moldes.	152
Figura 5.8. Curado de la lente.	153
Figura 5.9. Lente desmoldada.	154
Figura 5.10. Ensamble de la montura optomecánica para introducir errores refractivos de bajo orden.	155
Figura 6.1. Montura optomecánica en función. (a) Lente en reposo. (b) Deformación de la lente aplicando cargas mecánicas sobre los cuatro cabos en dirección hacia el centro geométrico de la lente. (c) Deformación lente tirando de los cuatro cabos hacía el exterior.	159

Índice de Tablas

.....

Tabla 1.1. Requerimientos generales.	35
Tabla 1.2 Requerimientos del usuario.....	35
Tabla 1.3. Requerimientos del mecanismo.	36
Tabla 1.4. Requerimientos para la lente.	36
Tabla 1.5. Declaración de la misión del proyecto.	37
Tabla 2.1. Consideraciones generales para la montura de ventanas y filtros.....	56
Tabla 2.2. Estructura de modelos DEEPAND.	59
Tabla 2.3. Principales materiales de impresión (Berchon, 2014).	60
Tabla 2.4. Perfiles de impresión en 3D para FDM. Murillo Jaenes, 2017.....	63
Tabla 2.5. Desviación según la calidad de impresión 3D. Murillo Jaenes, 2017	63
Tabla 3.1. Lista de necesidades del usuario del optomecanismo y su importancia.	67
Tabla 3.2. Lista de métricas para el optomecanismo.	68
Tabla 3.3. Matriz de necesidades-métricas.	69
Tabla 3.4. Tabla de comparación con la competencia (benchmarking) basada en métricas.	70
Tabla 3.5. Especificaciones objetivo.....	75
Tabla 3.6. Especificaciones finales.....	77
Tabla 3.7. Soluciones a subproblemas tomando en cuenta los conceptos de solución de la secuencia de la lente elástica del diagrama general.	86
Tabla 4.1. Propiedades mecánicas del PDMS.	99
Tabla 4.2. Parámetros del mallado M04MP1.....	99
Tabla 4.3. Parámetros de mallado M04MP2.....	109
Tabla 4.4. Matriz de selección y evaluación.....	125
Tabla 4.5. Escala de evaluación.	126
Tabla 4.6. Tabla comparativa de los análisis.....	128
Tabla 4.7. Tabla de propiedades físicas del motor 28BYJ-48.	130
Tabla 4.8. Propiedades del ABS y propiedades del mallado.	131

Capítulo 1

Preliminares

.....

1.1 Introducción

“Se entiende por optomecánica a la fabricación y utilización de componentes y dispositivos ópticos” (Robledo, 2015).

Esta tesis contiene principios básicos de diseño industrial aplicados a la optomecánica y se apoya en la óptica enfocada al estudio del ojo humano. Optomecánica es la composición de dos palabras de origen griego; opto, que significa visión, y la palabra mecánica que proviene de mekhanikos y significa; relativo a la máquina. El diseño optomecánico es la prefiguración de elementos, soporte y posicionamiento de un sistema óptico desarrollado mediante herramientas ingenieriles.

La optomecánica también es definida como ciencia, ingeniería y / o arte de mantener formas y posiciones adecuadas de los elementos funcionales de los requisitos de rendimiento de un sistema óptico (Ahmad, 2017).

Algunos ejemplos de diseño optomecánico en la vida cotidiana son; el retrovisor de un auto, las cámaras de vigilancia, un telescopio o un par de anteojos para personas con problemas visuales, astigmatismo u otra aberración. En este último caso el diseño del armazón tiene la función de favorecer la alineación del eje óptico de los lentes con el eje imaginario de los ojos del usuario, así el desempeño visual mejora evitando las consecuencias de un mal funcionamiento.

En contexto: el ojo humano es un sistema óptico positivo o convergente que forma una imagen invertida del mundo externo sobre la capa sensible de la retina, situada al fondo del globo ocular (Marín, 2006).

Una definición alterna describe a la visión como la percepción del cerebro de las imágenes a través del sistema óptico compuesto por el globo ocular, la superficie del globo ocular está formada por dos segmentos conjuntivos de diferente tamaño: uno anterior, la córnea, y otro cristalino (M.D. Peces Peña, 2012).

En la Figura 1.1 de lado izquierdo se puede observar la ubicación de la córnea en el globo ocular, enseguida se encuentra el iris que posee una abertura, por este pasa la luz hacia el interior del ojo. El iris controla instintivamente el diámetro de la pupila para regular la intensidad luminosa que recibe el ojo. Después de la pupila se encuentra el cristalino, que está unido por ligamentos, y de esta manera el ojo queda dividido en dos partes: la posterior que contiene humor vítreo y la anterior que contiene humor acuoso. La córnea y el cristalino a través de la refracción forman las imágenes dentro del ojo en la retina. La última mencionada contiene fibras nerviosas denominadas conos y bastones sensibles a la luz. Dentro de la retina se encuentra la fovea, en la que se ubican estos conos que sirven para identificar el color, sobre ella se forman la imagen que es enviada al cerebro. Finalmente, los millones de nervios que van al cerebro se combinan para formar un nervio óptico que se conecta con el cerebro (Juan Rafael León Rojas, 2013).

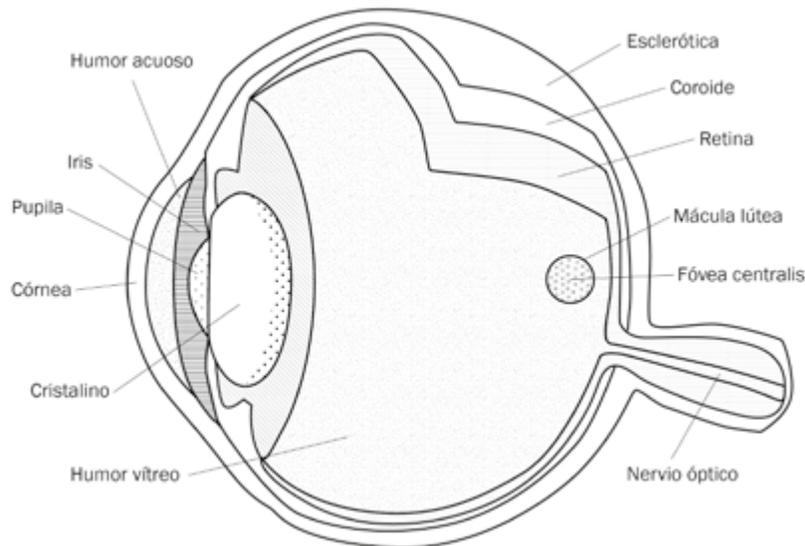


Figura 1.1. Globo ocular y sus componentes.

El uso de este órgano es indispensable para los humanos, ya que con él se percibe el mundo que nos rodea. El ojo humano visto como un sistema óptico (ver figura 1.2) está compuesto de dos lentes encargadas de la refracción de la luz, estas son: la córnea y el lente cristalino (Angel S. Cruz-Felix, 2015).

Las personas que necesitan usar anteojos no tienen un buen funcionamiento en su sistema óptico, aunque puede haber diversos factores relacionados con este mal funcionamiento, este proyecto se centra en facilitar la simulación de algunas condiciones que ocurren en la córnea a través del diseño de una montura optomecánica, provocando aberraciones

ópticas de bajo orden. La córnea es una estructura esférica altamente transparente en forma de menisco, vista de frente, la córnea tiene un diámetro aproximado a 12 mm, ligeramente más pequeño verticalmente que horizontalmente (Marín, 2006).

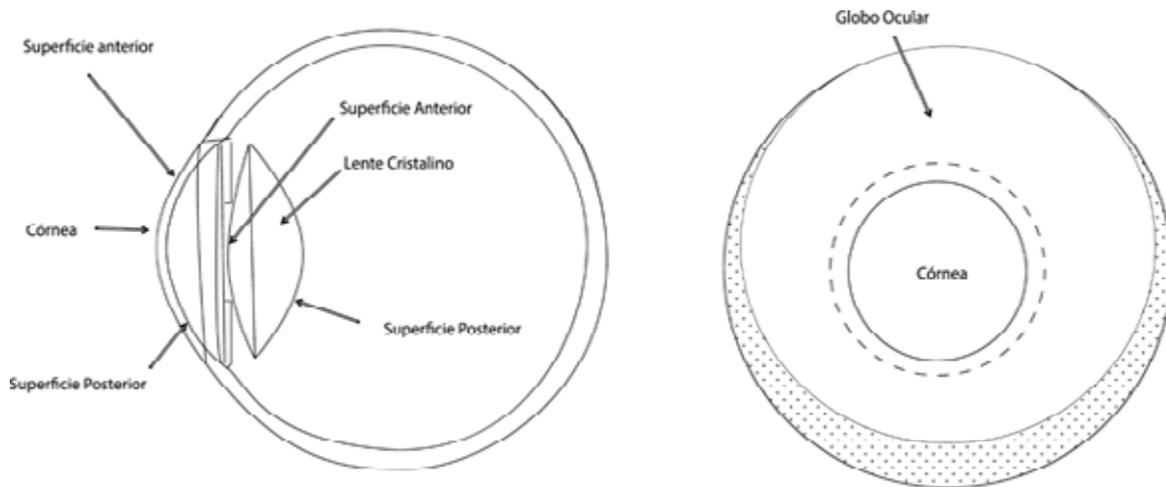


Figura 1.2. Ojo humano visto como sistema óptico.

La importancia de manipular lentes elásticas mediante arreglos mecánicos tiene una aportación al estudio del comportamiento de la luz en el ojo humano, sin embargo, las aplicaciones de este trabajo biomimetizado pueden ser una contribución al desarrollo de artefactos que utilicen la refracción como medio de captura de imagen, tal es el caso de las cámaras fotográficas o de video, telescopios y dispersores de luz.

El diseño de la montura optomecánica para introducir errores de bajo orden, surge de un contexto muy específico y se describen en el siguiente apartado, aquí se mencionan algunos sistemas optomecánicos, herramientas, conceptos y metodologías, que se usan para la solución de diseño.

1.2 Antecedentes

Análisis de Elemento Finito

El uso de Análisis de Elemento Finito (AEF) a través de un software de diseño mecánico, puede evaluar la geometría y el funcionamiento de un prototipo antes de ser fabricado. El AEF funciona a través de la división de un cuerpo en diferentes unidades llamadas elementos, estos se conectan mediante puntos denominados nodos creando una red o malla que envuelve al objeto que se analiza (ver figura 1.3). A cada nodo se le asignan valores numéricos correspondientes a las propiedades del material que sea desea utilizar, adicionalmente se establece un escenario para realizar un análisis estático, dinámico, termodinámico o una mezcla de las anteriores. La solución analítica surge del ensamble de cada elemento como respuesta global del sistema.

La figura 1.3 muestra un ejemplo del diseño de un prototipo digital de una córnea, fue hecho con el propósito de estudiar el comportamiento mecánico y mecanismos subyacentes a sus funciones.

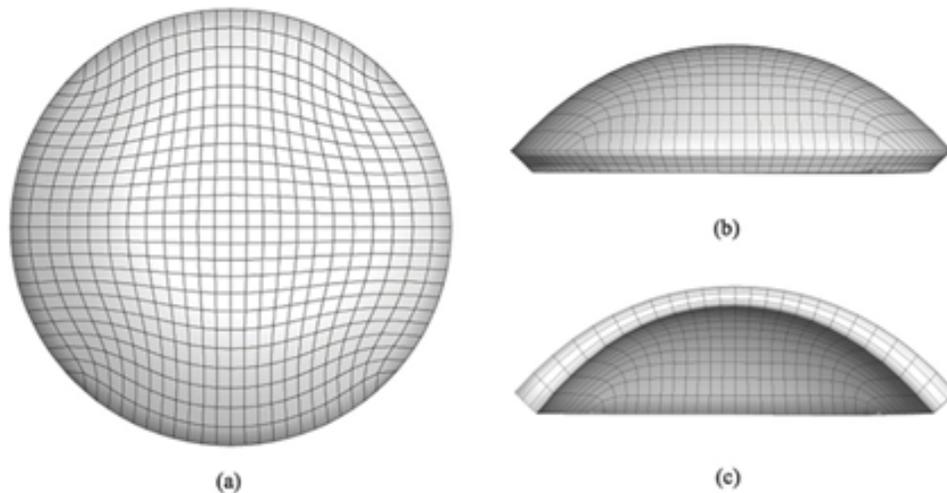


Figura 1.3. La discretización de elementos finitos de un modelo específico de una córnea humana: (a) Vista frontal, (b) Vista lateral y (c) Corte transversal. Irene Simonini, 2015.

La montura optomecánica que aparece en la figura 1.4 es el rediseño de un prototipo de una montura y lente sólida elástica que presentaba algunos problemas en la formación de la imagen, ya que el área de las mordazas no cubría toda la periferia. Este proyecto precedente fue diseñado con la ayuda del AEF (Reyes, 2012).

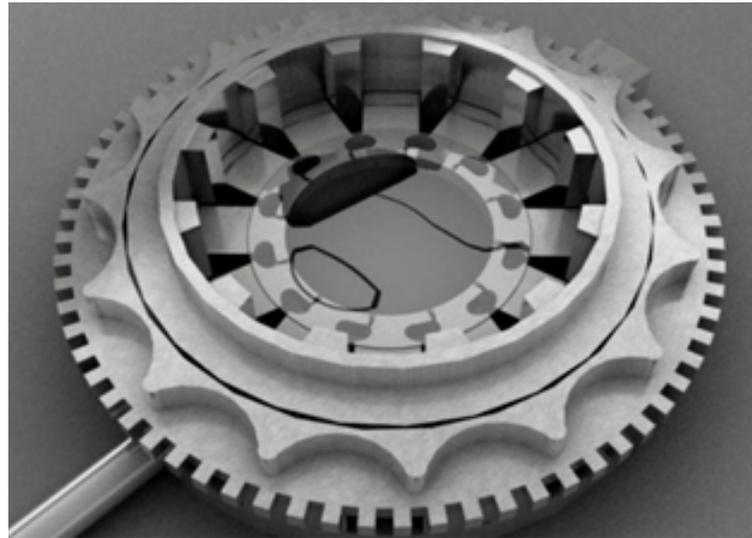


Figura 1.4. Prototipo digital de montura optomecánica. Reyes, 2012.

Modelación de la superficie refractiva

El prototipo de la superficie refractiva está sustentada por el perfil corneal basado en datos clínicos descritos en el trabajo de (Rosales, Juárez, López, Ibarra, & Tepichín, 2009), que tiene como resultado la curva que se muestra en la figura 1.5.

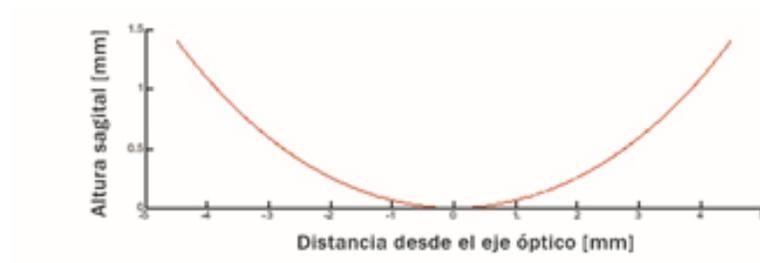


Figura 1.5. Altura sagital del perfil corneal esférico. Cruz-Felix, et al. 2015.

En la figura 1.6, se puede observar un prototipo hecho de PDMS, modelado a partir de la curva presentada en la figura anterior, sin embargo, esta lente no cuenta con una exoestructura que favorezca la manipulación de la lente en una montura optomecánica.



Figura 1.6. Superficie de refracción con un diámetro de 10 mm.
Fuente: Cruz-Felix, y et al. 2015.

Variabilidad de una superficie esférica

También existen lentes líquidas de distancia focal variable, a través del cambio de forma de una membrana elastomérica se ajustan formas esféricas y biconicas para predecir la longitud focal del objetivo y las propiedades de la imagen en función de la compresión (G. Beadie, 2008).

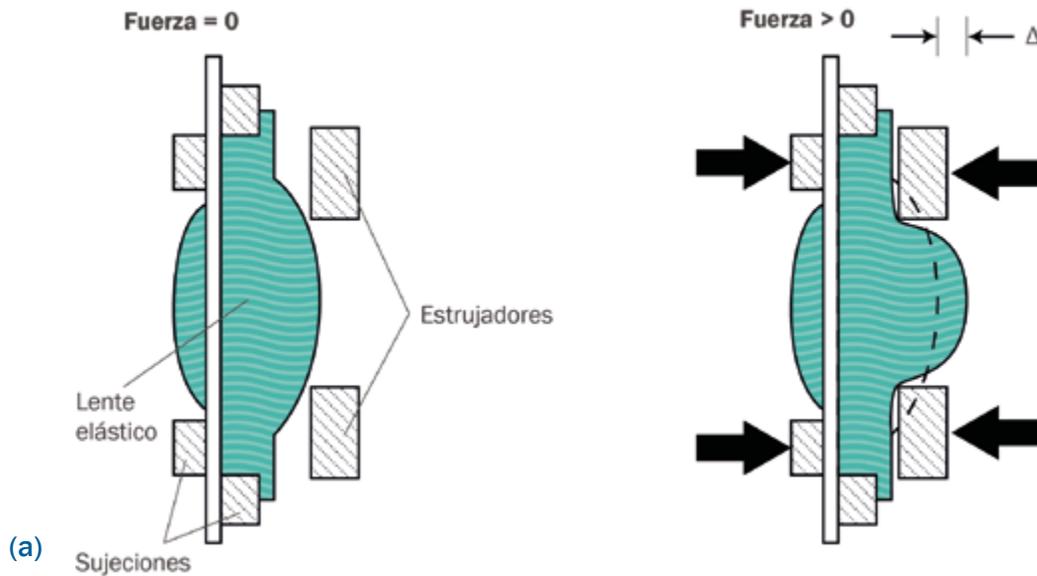


Figura 1.7. Esquema del mecanismo de longitud focal variable, (a) lente sin compresión, (b) lente comprimida aplicando una fuerza mayor a 0 mediante los estrujadores. G. Beadie, 2008.

La Figura 1.7, esquematiza la aplicación de esfuerzos por compresión en la lente líquida con la finalidad de hacer sintonización. Al desplazar un émbolo en una distancia ΔL (alargamiento), el elastómero de la lente se expande contra la membrana externa flexible, las líneas punteadas indican la ubicación de la lente antes (a) y después de la compresión (b).

En la Universidad de Pisa se ha trabajado en un sistema optomecánico (ver figura 1.8) para modificar la curvatura de una lente hecha de elastómeros, esta se asemeja considerablemente a la función del cristalino. La posibilidad de obtener un alto rendimiento con un mecanismo compacto es una característica atractiva, especialmente para aquellas aplicaciones donde la miniaturización es estratégica (Federico Carpi, 2011).



Figura 1.8. Sistema optomecánico realizado por académicos de la Universidad de Pisa, (a) dispositivo bioinspirado: la lente está rodeada por un actuador muscular anular artificial, (b) en el sistema natural: la lente está rodeada por la zónula anular y el músculo ciliar. Federico Carpi, 2011.

1.3 Planteamiento del problema

Se busca resolver un problema de diseño optomecánico, con el propósito de aportar conocimiento al estudio de las aberraciones ópticas de bajo orden. La naturaleza interdisciplinaria de la Ingeniería en Diseño, exige entre otras cosas: encontrar fundamentos científicos que configuren, orienten y faciliten el enfoque metodológico y el proceso conveniente en la tarea del diseño de un artefacto (Yanguas, 2001).

Los requerimientos para el funcionamiento de un sistema optomecánico conducen a la conceptualización y diseño de un prototipo, para el caso de este trabajo, estos requerimientos están determinados por errores refractivos de bajo orden.

La córnea, responsable de más de dos terceras partes de la refracción del sistema óptico del ojo humano suele tener anomalías en su forma, lo que ocasiona errores refractivos, estos ocurren en el momento que un haz de luz pasa a través de ella, instantes después el haz atraviesa el cristalino y finalmente su trayectoria termina en la retina, provocando que la imagen del objeto que percibe el cerebro se distorsione, este fenómeno lleva por nombre: aberración óptica (Tepichín, 2011).

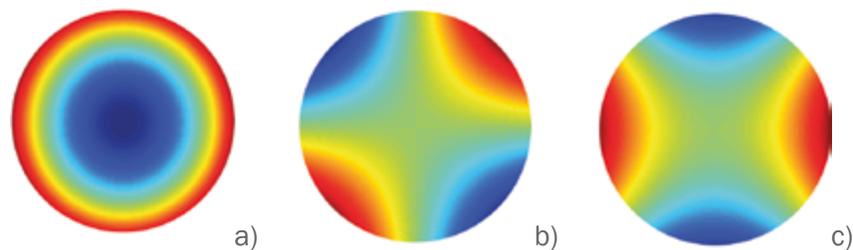


Figura 1.9. Aberraciones de bajo orden: (a) desenfoque, (b) astigmatismo a 0° , (c) astigmatismo a 45° . Angel S. Cruz-Felix, 2015.

En la figura 1.9, los colores de los diagramas representan una posición diferente para los frentes de onda. El desenfoque (a); causa emborronamiento en todas las direcciones, el astigmatismo de bajo orden (b y c), simboliza el astigmatismo a 0° y a 45° (Olarte, 2011).

Actualmente no se cuenta con un instrumento que pueda reproducir errores refractivos de bajo orden presentes en el ojo humano, específicamente el comportamiento de la luz a través de una superficie esférica hecha de PDMS similar a la córnea del ojo humano.

El problema se divide en dos partes; la parte de control y la del diseño de la montura optomecánica, siendo esta última la parte que aborda este trabajo. Se plantea resolver los siguientes puntos con relación a la función dinámica del mecanismo y los efectos de este sobre la lente.

1.- Que un motor de paso, pueda transmitir desplazamiento a dos puntos opuestos en los extremos de la lente de PDMS (ver Figura 1.10), para que dos puntos simétricos puedan ser desplazados en dirección opuesta y como consecuencia ocasionar tensión o compresión sobre la lente.

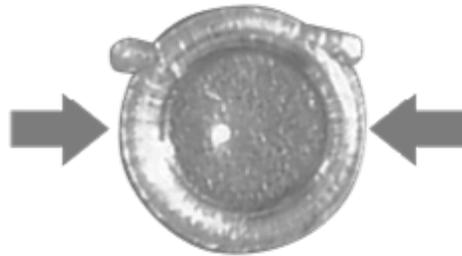


Figura 1.10. Dos puntos opuestos de la lente alineados al mismo eje, señalados mediante flechas.

2.- Que un segundo motor de paso pueda transmitir movimiento en dos puntos opuestos y simétricos de la lente de PDMS (ver Figura 1.11 a) sobre un eje perpendicular al eje de los dos puntos del primer motor, siendo la intersección de los dos ejes el centro geométrico de la lente (ver Figura 1.11 b).

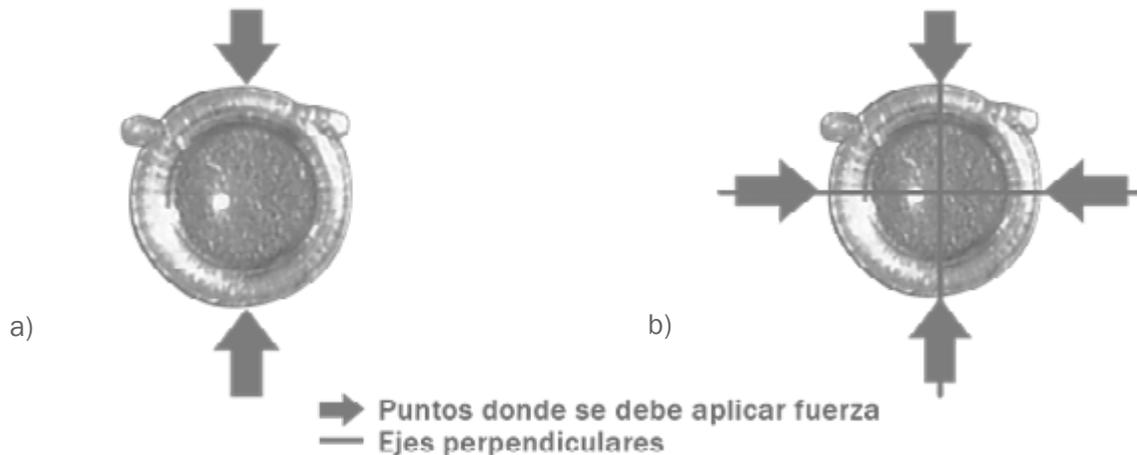


Figura 1.11. a) Dos puntos opuestos de la lente alineados a un eje perpendicular al de los dos puntos en la Figura 1.10, b) Intersección de dos ejes perpendiculares sobre la superficie refractiva.

3.- Se requiere que la montura permita al usuario cambiar la lente montada en el optomecanismo por un repuesto.

Mediante las reuniones con estructura DEEPAND que se explica en el siguiente apartado, se recolectaron las características que la montura optomecánica requiere, esto a través de la experiencia de los investigadores en física óptica, respecto al uso de la instrumentación utilizada en cubiertas ópticas universales.

En la Tabla 1.1 se cubren características propias de la óptica geométrica, que tienen como resultado la trayectoria ininterrumpida de un haz de luz, mismo que pasará a través de la montura optomecánica.

La Tabla 1.2 muestra la interacción que el usuario tienen con el artefacto, por lo tanto, se determinan los requerimientos básicos del usuario en términos de alineación con otros instrumentos, instalación, ergonomía y montaje.

Para los requerimientos del mecanismo se presenta la Tabla 1.3, que básicamente son las condiciones de la transmisión del movimiento para deformar parcialmente la lente de PDMS. Enlazados a esta tabla están los requerimientos para la lente que se muestran en la Tabla 1.4 que plantea las características de la sujeción de la lente y la deformación de esta hasta el límite de proporcionalidad.

En la Tabla 1.5 se muestra la estructura del producto, en cuanto a lo que es, la propuesta de valor, el objetivo del producto, el perfil del usuario descrito en la parte de sector primario y secundario, suposiciones y restricciones en el diseño de la montura y los perfiles de los involucrados en las reuniones DEEPAND para recolectar los datos de estas cinco tablas.

Tabla 1.1. Requerimientos generales.

Requerimientos generales	
Origen	Situado en el centro geométrico del perfil esférico sobre la superficie convexa.
Sistema de coordenadas locales	El sistema que se usará para el proyecto está representado por X, Y, Z, donde Z es el eje de altura.
Alineación	El haz de luz deberá trasladarse a través del eje X que incide en el centro geométrico de la lente.
Montaje	Deberá atornillarse a un soporte convencional ajustable en una cubierta óptica universal.

Tabla 1.2 Requerimientos del usuario.

Requerimientos del usuario	
Alineación	El diseño y posicionamiento de la base que soportará el optomecanismo a la cubierta óptica universal deberá ser ajustable para completar el arreglo interferométrico.
Instalación	La instalación debe ser intuitiva.
Ergonomía	El diseño del optomecanismo deberá permitir el intercambio de lentes de PDMS, para lo cual las piezas implicadas en este proceso necesitan ser lo suficientemente resistentes para que el usuario pueda hacer esta operación fácilmente sin dañar alguna pieza.
Montaje	El usuario debe tener la facilidad de instalar alguna fuente de transmisión mecánica al optomecanismo a través de un diseño que utilice medidas de tornillería, llaves y/o desarmadores estandarizados para que el usuario no tenga problemas para conseguir repuestos o herramienta.

Tabla 1.3. Requerimientos del mecanismo.

Requerimientos del mecanismo	
Alineación	El mecanismo deberá estar alineado respecto al sistema de coordenadas de la lente de PDMS.
Movimientos lineales	En dos ejes que crucen en el centro geométrico de la lente.
Carga total para ser soportada	La necesaria para deformar la lente de PDMS.
Distribución de la carga	Situada en cuatro puntos simétricos distribuidos a la misma distancia uno del otro con respecto al perímetro del perfil corneal.
Peso permisible	Tan ligero como sea posible.
Volumen permisible	Lo más compacto posible.
Opacidad	Irrelevante.

Tabla 1.4. Requerimientos para la lente.

Requerimientos para el perfil corneal (Lente de PDMS)	
Sujeción	Deberá estar colocada en cuatro puntos simétricos distribuidos a la misma distancia uno del otro.
Alineación	El plano Y, Z, debe ser paralelo al plano formado por la circunferencia que forma el borde del perfil corneal, el eje X es el mismo eje por el que viaja el haz de luz cuando incide en la lente, el origen es el punto en el que incide el haz de luz sobre la superficie cóncava de la lente.
Carga total para ser soportada	La necesaria para deformar la lente hasta el límite de proporcionalidad.
Opacidad	Ninguna

Tabla 1.5. Declaración de la misión del proyecto.

Diseño y construcción de montura optomecánica para introducir errores refractivos de bajo orden	
Descripción de producto	Dispositivo para deformar parcialmente una lente hecha de PDMS y ser utilizado sobre una cubierta óptica universal.
Propuesta de valor	Innovación en optomecanismos para lentes sintonizables, además de ser una plataforma para el estudio del comportamiento de las aberraciones ópticas de bajo orden.
Objetivo general	Diseñar un optomecanismo que pueda deformar parcialmente una lente de PDMS desde cuatro puntos simétricos separados a la misma distancia uno del otro, sin ocasionar interferencia al haz de luz cuando este pase a través de la misma lente y de esta forma se pueda completar el arreglo interferométrico.
Sector primario	Investigadores en física de la visión en el SUNE0.
Sector secundario	Investigadores en física de la visión en otras universidades de México.
Suposiciones y restricciones	<p>Debe ser ergonómico y fácil de ensamblar.</p> <p>La lente no se puede adquirir en algún establecimiento, se tiene que manufacturar.</p> <p>Se tiene que agregar una forma de sujeción a la lente para que se pueda adaptar al mecanismo.</p> <p>La lente de PDMS en el optomecanismo deberá sustituirse fácilmente por un nuevo repuesto cuando sea necesario.</p> <p>Las componentes del optomecanismo serán manufacturadas mediante la impresión 3D en su mayoría, puesto que es difícil encontrar elementos mecánicos comerciales que se adapten a los requerimientos del artefacto.</p>
Involucrados	<p>Ingenieros en diseño.</p> <p>Ingenieros en mecatrónica/electrónica.</p> <p>Físicos.</p> <p>Personal de manufactura.</p> <p>Proveedores.</p>

1.4 Justificación

Con la realización de esta tesis se demuestra que con los conceptos que enseña la ingeniería en diseño, el educando puede desarrollar sistemas somáticos con función mecánica aplicada a la física de la visión, específicamente en el estudio de las aberraciones ópticas con relación a la córnea del ojo humano, esto es relevante porque suma al conocimiento del comportamiento de este órgano, más aún, puesto que en México se ha investigado muy poco en este ámbito.

Entre 30% y 40% de la población de Europa y Estados Unidos necesita anteojos. Y esa cifra alcanza el 90% en algunos países de Asia, aunque no existe una cifra clara para Latinoamérica, a través de estas estadísticas el lector puede tener una idea de la problemática a nivel global (Robson, 2015).

Según el informe de la Organización Mundial de la Salud de 2019 sobre la visión, los errores de refracción no corregidos fueron responsables del deterioro de la visión de lejos de moderado a grave o de la ceguera en 123,7 millones de personas en todo el mundo. (Organización Mundial de la Salud, 2019).

El estudio de las aberraciones ópticas mediante cuerpos similares a las lentes naturales del ojo pueden ayudar a simular y entender diversos padecimientos o alteraciones en la córnea de los pacientes; si el ojo tiene defectos en la córnea afectará la calidad de imagen hasta un 70% del funcionamiento del órgano humano, por lo tanto, la investigación de esta lente es importante debido a las repercusiones positivas implícitas en las ciencias de la salud y las especialidades relacionadas (Tepichín, 2011).

Adicionalmente, este proyecto aporta conocimiento en cuanto al diseño y manufactura de lentes sintonizables, y muestra gran innovación en el diseño optomecánico a causa de los avances en la impresión 3D y los materiales ocupados. También se considera una aportación relevante el corroborar la idoneidad del material usado para fabricar la superficie refractiva llamado Polidimetilsiloxano (PDMS), un elastómero ya utilizado para manufacturar lentes, como consecuencia, este proyecto ofrece un conocimiento oportuno a futuros ingenieros en diseño de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, debido a que resulta factible poner en práctica dichos conocimientos resultado de este trabajo. El PDMS tiene muchas aplicaciones porque este polímero puede ser entrecruzado de forma tal que sus propiedades puedan imitar tejidos suaves (Marlon Andrés Osorio-Delgado, 2017).

1.5 Objetivos y metas

Objetivo general

Diseñar un optomecanismo para ocasionar tensión y compresión en una lente hecha de PDMS que estará montada en un arreglo interferométrico mediante una cubierta óptica universal.

Objetivos específicos y metas

- I. Definir el producto.
 - a) Cuadros de requerimientos.
 - b) Identificación de objetivos.
 - c) Declaración de la misión.
- II. Generar el concepto.
 - a) Bocetos.
 - b) Propuestas digitales del modelo a desarrollar.
- III. Analizar componentes en software comercial de elemento finito.
- IV. Generar planos constructivos del optomecanismo.
- V. Imprimir piezas de optomecanismo.
- VI. Realizar el ensamble del prototipo final.
- VII. Evaluar el comportamiento mecánico de las piezas del optomecanismo diseñado.

1.6 Metodología

El procedimiento general de diseño descrito por Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger consta de seis fases que se llevarán a cabo en esta tesis, consiste en un proceso genérico que relaciona herramientas adicionales a la metodología planteada, en la Figura 1.12 se muestra el proceso de diseño para este trabajo (Ulrich & Eppinger, 2013).

Cabe destacar que la fase 5 para esta tesis está planteada como un sistema de producción bajo pedido, esto se refiere a que el proyecto culmina una vez que se establece un prototipo final replicable de ser solicitado. Por otra parte, la fase de diseño a detalle estará reforzada por una serie de principios mecánicos propuestos por Michael French.

En la figura 1.12 se presenta la metodología a modo de diagrama para este proyecto. Durante la fase de desarrollo de concepto y diseño a nivel sistema se recurrirá al uso de técnicas VDC “Virtual Design and Construction” mediante el uso de un software de modelado 3D para elaborar una gama de propuestas de diseño conceptual donde se incluye la evaluación de las posibles alternativas para la solución del problema planteado, esto a través de la modificación del diseño y la adaptación a las necesidades del prototipo, lo cual propicia a la reutilización de los modelos generados y así no es necesario comenzar un nuevo diseño sino que se puede continuar trabajando a partir de las primeras propuestas, lo que genera la optimización de los plazos y el coste del desarrollo del proyecto (Murillas, 2016).

Planeación

La fase cero se concentra en la identificación de los objetivos que se pretenden alcanzar y la razón de ser del producto. El resultado de la fase de planeación es la declaración de misión del proyecto, que especifica el objetivo comercial del producto, las metas, las suposiciones básicas y las limitaciones.

Desarrollo del concepto

En esta fase se identifican las necesidades del mercado objetivo, se generan y evalúan conceptos alternativos del producto, después se prueba y desarrolla uno o más conceptos dependiendo del análisis que se alcance. Generalmente, se tiene como resultado de esta fase, el diseño geométrico del producto y una especificación funcional de cada uno de los subsistemas.



Figura 1.12 Metodología propuesta para tesis.

Diseño de detalle

En esta fase se realizan los cálculos ingenieriles al producto y se tiene como resultado la especificación completa de la geometría, materiales y tolerancias de todas las partes únicas del producto y la identificación de todas las partes estándar.

La salida de esta fase es la documentación del control del producto, es decir, los dibujos o archivos de computadora que describen la geometría de cada una de las piezas y su herramental de producción, las especificaciones de las piezas compradas y los planes de proceso para la fabricación y el ensamble del producto. En general, son tres puntos importantes que abarcan esta fase; la selección de materiales, el costo de producción y el desempeño robusto del producto.

Pruebas y refinamiento

Comprende la construcción y evaluación de versiones de preproducción del producto. Los primeros prototipos (alfa) se prueban para determinar si el producto funcionará como está diseñado y si satisface las necesidades del usuario. Los prototipos siguientes (beta) son probados en su propio ambiente de uso, la meta de los prototipos beta es responder preguntas acerca de la operación y confiabilidad para identificar cambios de ingeniería necesarios para el producto final.

Inicio de producción

En esta última fase se hace el producto con el sistema de producción definido, en el caso de esta tesis es el sistema de producción bajo pedido, usualmente en esta etapa se resuelve cualquier problema en los procesos de producción.

Capítulo 2

Marco teórico

.....

2.1 El ingeniero en diseño

La tarea principal de un ingeniero en diseño es aplicar los conocimientos científicos e ingenieriles para la solución técnica de algún problema, para después optimizar ciertos rubros de la solución como los requerimientos de usuario, materiales, tecnología, factores económicos, legales, ambientales o humanos (Dixon & Poli, 1995).

En la Figura 2.1 se plantea que el trabajo de un ingeniero en diseño es una intersección entre dos líneas, una que sigue temas relacionados con las ciencias de las humanidades y otra línea de ciencias exactas y consecuencias de esta, tales como la tecnología o los avances de sistemas de producción de la era moderna (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007).

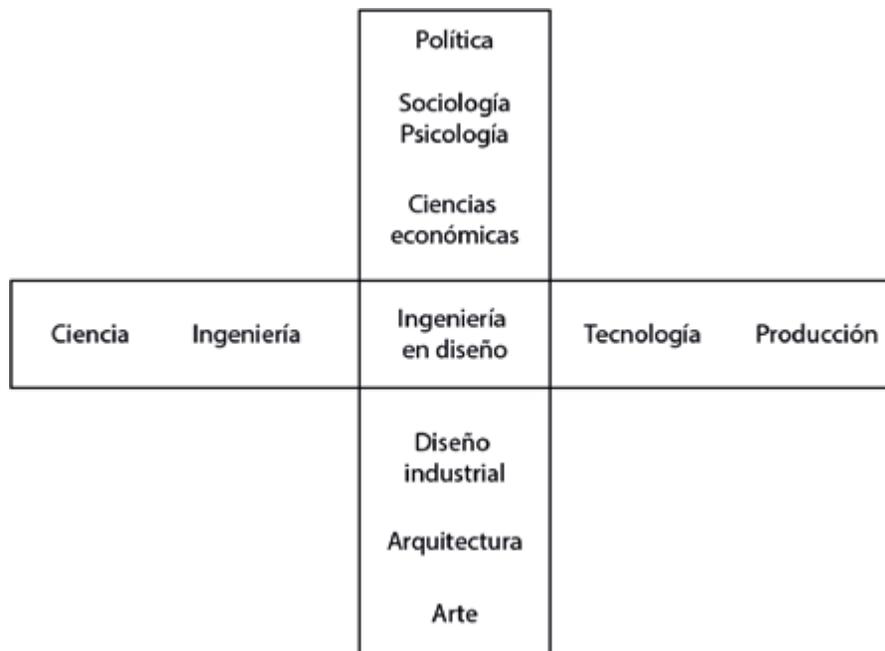


Figura 2.1. Actividad central del ingeniero en diseño. Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007.

La ingeniería en diseño es una actividad creativa donde se requiere una base sólida en matemáticas, física, química, mecánica, termodinámica, ingeniería básica, tecnología de materiales, elementos de máquinas y teoría del diseño, así como experiencia en el área de interés. (Clarkson & Huhtala, 2005).

En la Figura 2.2 se muestra un diagrama que representa el marco teórico de esta tesis, de forma similar al diagrama presentado en la Figura 2.1 esta segunda versión describe la intersección específica del contexto que tiene el diseño de la montura optomecánica.

La línea horizontal está integrada por ramas del conocimiento científico en óptica visual, la optomecánica y la tecnología utilizada en el proceso de diseño hasta llegar a la construcción del prototipo.

Respecto a la línea vertical se encuentra la realización de bocetos a mano de ideas alcanzadas por causa de algunas técnicas VDC aplicadas a este trabajo. Finalmente, la Figura 2.2 muestra al dibujo industrial porque este incluye criterios básicos de entendimiento en los planos constructivos.

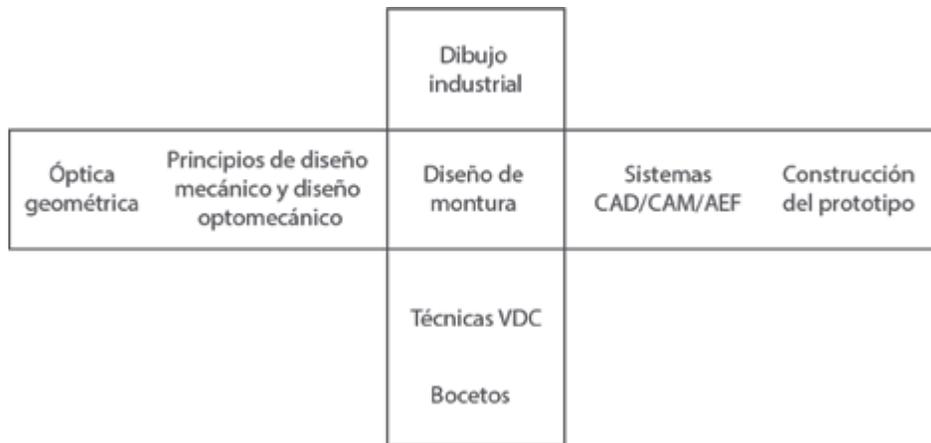


Figura 2.2. Conjunto de conocimientos para el diseño de la montura optomecánica.

2.2 Óptica geométrica

La óptica geométrica, u óptica de rayos, es la ciencia que estudia los orígenes, la propagación y la detección de la luz (Malacara, 2015). En la óptica geométrica se considera que cualquier objeto visible emite rayos rectos de luz, los cuales se subordinan a las conocidas leyes de reflexión y refracción (García, 1997).

Principio de Fermat

Plantea que un rayo luminoso va de un punto a otro a lo largo de la trayectoria que le toma el menor o mayor tiempo posible. El tiempo de viaje debe ser un maximal con respecto al de otras trayectorias. (Malacara, 2015).

Leyes fundamentales de la óptica geométrica

1. La propagación rectilínea de la luz en medios homogéneos.
2. La ley de la reflexión.
3. La ley de la refracción.
4. La conservación del plano de incidencia.
5. La reversibilidad de las trayectorias luminosas.

Reversibilidad de las trayectorias luminosas

Esta propiedad explica que las trayectorias luminosas son independientes del sentido de luz que las describe (Sagrario, 2004).

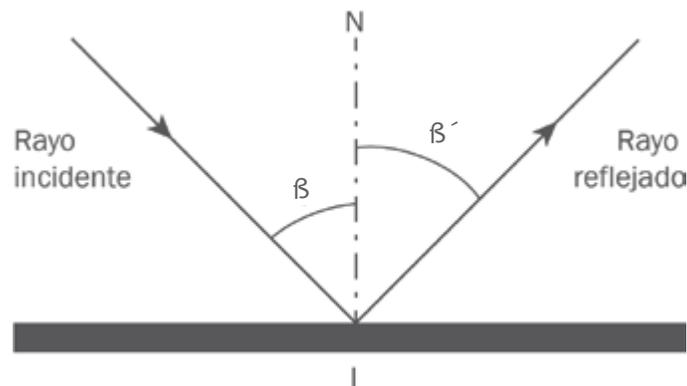


Figura 2.3. Ley de reflexión.

Propagación rectilínea en medios homogéneos

En medios homogéneos, de índice de refracción constante, la luz se propaga en línea recta. De esta forma se puede representar las trayectorias luminosas mediante trazos rectos y así explicar, la alineación óptica, la formación de sombras y penumbras (Sagrario, 2004).

La ley de la reflexión

Cuando la luz incide sobre una superficie pulida y lisa, se refleja algo de luz. La mayor parte de la luz se transmitirá si el medio detrás de la superficie es transparente. La ley de la reflexión explica que para este fenómeno existen dos rayos; el incidente y el reflejado en un mismo plano de incidencia (Ver figura 2.3), los cuales generan ángulos iguales pero opuestos a la normal entre sí (Katz, 2002).

La ley de la refracción

Se entiende por refracción cuando la luz cambia de medio de propagación, de acuerdo con la ley de Snell o ley de la refracción, donde n y n' son los índices de refracción de dos medios diferentes (Ver figura 2.4), β es el ángulo de incidencia y β' es el ángulo de refracción, estos últimos dos medidos respecto a la normal (Katz, 2002).

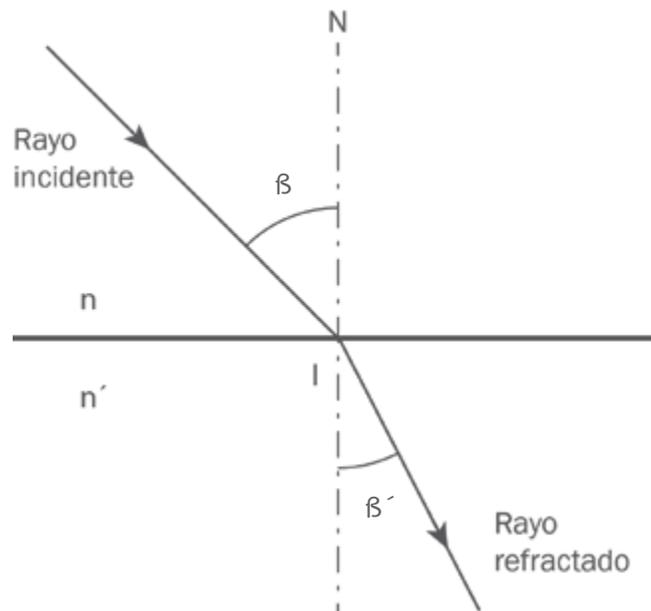


Figura 2.4. Ley de refracción.

Lentes delgadas

Una lente es una placa transparente cuyas caras por lo general son esféricas. Una lente más delgada en su centro que en su periferia es divergente, mientras que si el centro es más grueso que la periferia de la lente es convergente (Malacara, 2015).

La Figura 2.5 muestra los tipos de formas que una lente delgada puede tener, la forma que utilizará la montura optomecánica de este proyecto es una lente en forma de menisco.



Figura 2.5. Tipos de lentes.

2.3 Principios de diseño mecánico

Los principios de diseño mecánico de Michael French abordan los siguientes puntos a destacar para el diseño del optomecanismo a realizar.

Generales

G1. Claridad de función. Cada función requerida en un diseño debe preverse por algo de una manera clara, general y sencilla.

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

G1.2. Evitar dependencia de variables irrelevantes. Esto es tener siempre la visión sobre la función principal y evitar funciones no críticas.

G2. Diseño cinemático y elástico. Este principio es de suma importancia para ingeniería en precisión. En general, declara que debe evitarse sobre-restricción en la instrumentación para conseguir mayor precisión. Por ende, para efectuar un diseño cinemático y elástico de algún mecanismo debe emplearse el mínimo de elementos requeridos con el objetivo de poder simplificar los cálculos y permitir los grados de libertad requeridos.

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

G4. Evitar decisiones arbitrarias. Cada decisión, cada elección de dimensión, forma o material debe ser sustentada por un argumento fuertemente razonado. Cada idea debe ser buena si se somete a un proceso de comprobación.

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

G4.2. Superposición. Si un elemento está sometido a varias condiciones o que impliquen una reacción de la misma naturaleza en el elemento, todas las variables que expresen esas condiciones deberán sintetizarse para obtener una equivalencia total, esto se ve por ejemplo en el diseño de juntas o uniones estáticas desmontables entre partes tales como uniones embridadas.

Uniones

A continuación se describe una serie de principios relacionados con el diseño de uniones desmontables estáticas entre piezas. Algunos de ellos se relacionan con la ubicación y otros con su forma.

Ubicación

J1. Evitar hacer dos caras. Si existe movimiento relativo entre dos piezas en las que participa solo una cara, no es necesario realizar un maquinado adicional en la contraparte si con una es suficiente para mantener la alineación entre las dos piezas.

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

J3. Juntas cerca de la sección máxima. Reducción de esfuerzos y conservación de la forma; hacer las juntas cerca de la sección de mayor carga mecánica del cuerpo y de manera diametral o extendida.

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

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

J6. Juntas que fijen y sellen. Este está asociado con la fijación con un anillo o arandela, un tornillo o una tuerca, la cual puede ser usada para fijar abrazaderas para propósitos estructurales y de sellado.

Forma

J7. Caras de las juntas en planos intactos. Esto es esencial cuando se requiere un grado específico y fino de cota superficial.

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

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

Diseño cinemático y el principio de menor restricción

K1. Determinación estática. Dependiendo de las funciones del mecanismo, es deseable tener un sistema estáticamente determinado. Esto aplica para estructuras que han de estar fijas.

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

K3. Usar auto-alineación. El motivo de esto es para asegurar la uniformidad de la carga.

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

Mecanismos

M1. Preferir pivotes para deslizar y flexionar.

Los pivotes son más baratos y protegen mejor contra la suciedad y el desgaste y concentran las cargas en puntos fijos de una mejor manera que aquellos que requieren de un “arrastre”. Adicionalmente, no sufren un “efecto cajón atorado” como aquellos, por lo que son más eficientes cuando se trata de precisión y repetitividad. Los flexores son incluso mejores en algunos casos a este respecto, pero su uso se limita solo a movimientos pequeños, como en los mecanismos de precisión. Una particular virtud de los flexores es la libertad de backlash (vocablo inglés que significa “retroceso”) y stiction (voz inglesa que quiere decir “fricción estática”), lo cual representa un gran valor en la instrumentación.

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

M3. Evitar ángulos de transmisión pobres.

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

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

M6. Diseñar ajustes para lo ortogonal.

M7. Usar conceptos de trabajo pico y potencia pico, Potencia pico es el producto del máximo torque y la máxima velocidad, y es el principal determinante de la talla de una máquina. Trabajo pico es el producto de la máxima fuerza por la distancia o carreta total y es un determinante

esencial para saber si con un control manual será suficiente o si un servo es necesario.

Los enunciados N1 a N3 son principios referentes al orden de anidamiento de los elementos, el cual tiene que ver con la arquitectura del mecanismo o superposición de movimientos independientes a ellos. Una cadena de movimientos anidados o superpuestos es referida como una rama, mientras que la tierra se refiere a la base o cuerpo. Estos principios ayudan a reducir requerimientos estructurales y masa en general.

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

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

N3. Los movimientos más pesados, más grandes, más lentos y menos frecuentes deben estar lo más cercano a la tierra.

Por otro lado, existen principios de diseño que son útiles para elementos estructurales, mismos que se anuncian enseguida.

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

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

S3. Hacer vigas y bases amplias para soportar momentos.

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

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

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

S7. Para transmitir torque preferir secciones cerradas.

S8. Evitar cargas concentradas si son muy grandes, en lo posible tratar de distribuir uniformemente las cargas.

2.4 Principios de diseño optomecánico.

Anillo de retención

La lente se sujeta contra un espaciador en una celda mediante una fuerza axial. La fuerza debe ser ejercida contra la lente cerca de su borde a través de un anillo discontinuo, este cae en una ranura mecanizada en la superficie interior de una celda que se denomina comúnmente anillo de “ajuste”. El anillo, que actúa como un resorte, generalmente tiene una sección transversal circular, como se muestra en la Figura 2.6. El anillo permite comprimirlo ligeramente mientras se desliza hacia adentro para alinearse con la ranura. La sección transversal de la ranura es generalmente rectangular (Yoder & Vukobratovich, 2015).

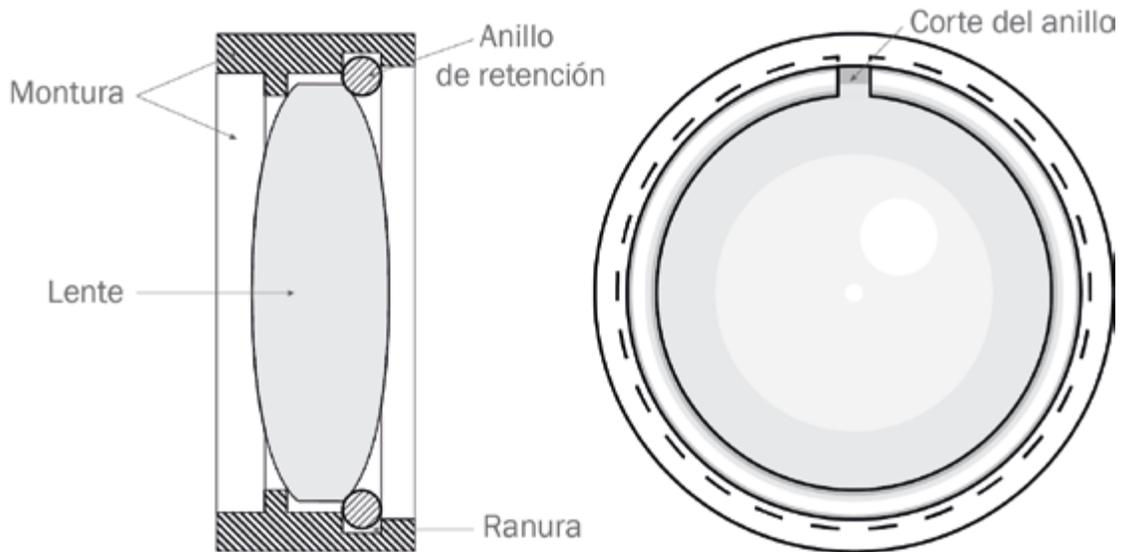


Figura 2.6. Sujeción de lente con anillo de retención.

Brida de sujeción

Un diseño típico para monturas de lentes involucra la sujeción de la lente a través de un anillo que sujete los bordes de la lente. El retén está configurado con una rigidez tangencial suficiente para garantizar la presión uniforme contra la superficie del lente alrededor de su borde. Con precarga simétricamente simultánea, una placa circular es adaptada en el borde exterior fijo y uniformemente axial a la montura. (Ahmad, 2017).

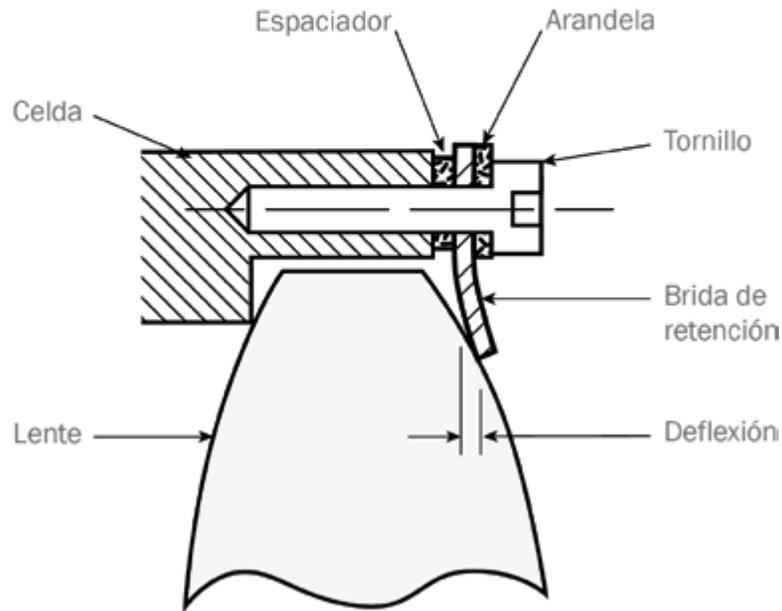


Figura 2.7. Sujeción de lente mediante brida y tornillo.

El contacto entre la superficie de la lente y el anillo utilizando esta técnica tiene variantes como el grosor, diámetro, el radio de la superficie de la lente y la ubicación de la ranura, se consideran para ser aplicados al diseño del retén de este proyecto.

Esta técnica se usa solo cuando la ubicación y la orientación de la lente no es crítica. La provisión de una fuerza de restricción axial específica para la lente con este tipo de montaje es prácticamente nula (Ahmad, 2017).

Consideraciones generales para la montura de ventanas y filtros

La ubicación de una ventana en el sistema óptico determina en gran medida los aspectos críticos de su diseño, debido a factores como la suciedad, la humedad, la superficie y los defectos de recubrimiento (rasguños, excavaciones, bruñidos o pulido inadecuado) pueden alterar el funcionamiento de la montura (Yoder & Vukobratovich, 2015).

En la tabla 2.1 se muestran los principales parámetros de diseño para este tipo de montura y la relación que conlleva estos parámetros con la proyección del diseño de la montura optomecánica a realizar.

Tabla 2.1. Consideraciones generales para la montura de ventanas y filtros.

Parámetros de importancia en el diseño de ventanas y filtros ópticos		Montura optomecánica para introducir errores refractivos de bajo orden
Transmisión	Pérdida de intensidad en todo el rango espectral aplicable	Despreciable
	Requisitos de bloqueo para la radiación no deseada	Despreciable
Dimensiones	Apertura óptica	≥ 10 mm
	Diámetro o ancho y altura	No especificado
	Espesor	Despreciable
	Ángulo de cuña y orientación.	Sin cuña
	Requisitos especiales de forma y/o bisel	Extensiones para sujeción
Propiedades ópticas	Contribución a la potencia óptica	Opacidad en las paredes
	Apertura relativa del frente de onda transmitida (f / n)	No especificado
	Características de dispersión de superficie.	Sin dispersión
	Requerimientos de recubrimiento (reflectante, emisividad térmica, eléctrica).	Ninguno
	Burbujas, inclusiones y estrías.	Ninguno
	Características de polarización	Ninguna
Medio ambiente	Temperatura extrema y perfiles de exposición (almacenaje y operacional).	Perfil de exposición: Laboratorio
	Presión previa (incluidos los efectos del aire de ariete y de la turbulencia)	Despreciable
	Exposición a la humedad, a la erosión de la lluvia y a las partículas.	Ninguna
	Radiación (térmica, cósmica, nuclear).	Ninguna
	Vibración (amplitud, duración y dirección)	Ninguna
	Choque (amplitud, duración y dirección)	Ninguno
Configuración de montaje	Orientación relativa al haz (s) óptico (s) y al movimiento del vehículo.	Perpendicular y coincidente al centro geométrico de la lente / No vehículo
	Propiedades térmicas de los materiales.	Ninguna
	Mecanismos y trayectorias de transferencia de calor.	Ninguno
	Interfaz mecánica (patrón de orificio de montaje)	Circular
	Requisitos de sellado	Sin sellado

2.5 Normas de dibujo.

El dibujo técnico es una forma efectiva de lenguaje gráfico por la cual se puede representar un producto, por tanto, basándose en las siguientes normas, se dará entendimiento al lector de la representación gráfica de la montura optomecánica que plantea este proyecto.

Normas ISO (International Organization for Standardization)

Las normas ISO para dibujo técnico establecen un orden en el sistema de numeración, notas, tamaño de papel, dimensiones geométricas y tolerancia, símbolos de soldadura, abreviaturas, líneas, símbolos de rugosidad, símbolos eléctricos, entre otros. La norma ISO 128 establece los principios generales de presentación en dibujos técnicos, específicamente la representación gráfica de objetos (ISO, 2019).

Normatividad Mexicana

La Norma Oficial Mexicana NOM-Z-3-1986, es una norma basada en la norma ISO 128, el contenido de esta Norma trata de aplicarse a todo tipo de dibujo técnico (mecánico, eléctrico, arquitectónico, de ingeniería civil, etc.). Sin embargo, en algunas áreas técnicas específicas, las reglas generales no pueden cubrir adecuadamente los requisitos de prácticas especializadas y se necesitan reglas adicionales que pueden determinarse o convertirse por separado. En estos casos, los principios generales todavía aseguran la coherencia de los dibujos como un sistema que se necesitan reglas adicionales que pueden determinarse o convertirse por separado (SEGOB, 2019).

2.6 Diseño y construcción virtual VDC.

Diseño y construcción virtual (VDC) por sus siglas en inglés Virtual Design and Construction, es el uso de modelos de desempeño multidisciplinarios integrados de proyectos de diseño-construcción para apoyar objetivos explícitos. Los modelos VDC son virtuales porque muestran descripciones del proyecto basadas en herramientas de visualización de modelado de objetos 3D. El modelo de proyecto VDC enfatiza aquellos aspectos del proyecto que pueden diseñarse y administrarse, es decir, el producto, la organización que lo definirá, diseñará, construirá y operará. Los modelos son multidisciplinarios en el sentido de que representan distintas ramas de la ingeniería, así como a las subdisciplinas relevantes. Los modelos son de desempeño en el sentido de que predicen algunos aspectos del desempeño del proyecto, rastrean muchos de los que son cruciales y pueden mostrar el desempeño predicho y medido en relación con los objetivos de desempeño del proyecto establecidos (Kunz & Fischer, 2012).

VDC es una metodología que permite al diseñador crear modelos simbólicos del Producto, Organización y Proceso (POP) antes de que se haga un gran compromiso de tiempo o dinero para un proyecto. Por lo tanto, VDC apoya la descripción, explicación, evaluación, predicción, formulación de alternativas, negociación y decisiones sobre el alcance y la organización de un proyecto (Khanzode, Fischer, Reed, & Ballard, 2006).

Modelos POP

Tienen como objetivo general generar modelos explícitos de aquellos aspectos que hacen viable un proyecto o no, esto se puede controlar a través de tres de cosas: el diseño del producto que se construirá, la organización para realizar el diseño y finalmente el proceso construcción. Por esta razón, a este modelo de proyecto se le llama, modelo de Producto-Organización-Proceso, o modelo POP. De este modo, el modelo POP describe el contenido de los modelos individuales, cada uno de los cuales representa los detalles de los elementos conceptuales diseñados con sus atributos, valores de atributos y relaciones. El propósito del modelo POP es definir los elementos conceptuales que comparten los modelos, con la ayuda de las partes interesadas para garantizar que el producto cumpla con lo requerido (Kunz & Fischer, 2012).

DEEPAND

Dentro de las herramientas VDC se encuentra un método para analizar la efectividad de las reuniones entre un equipo de un proyecto multidisciplinario utilizando el marco DEEPAND cuyo significado es Descripción, Explicación, Evaluación, Predicción, Formulación Alternativa, Negociación y toma de Decisiones. El marco proporciona una manera de medir la efectividad de una reunión al clasificar la discusión en una reunión como una de las siete actividades DEEPAND y ayuda a los equipos del proyecto a pasar de las tareas descriptivas y explicativas a las tareas evaluativas y predictivas que agregan más valor al producto (Bicharra, Kunz, Fischer, & Pinto, 2004).

La Tabla 2.2 muestra la estructura de las reuniones bajo el marco DEEPAND, cada etapa de la reunión está descrita por una acción y como consecuencia la meta que puede alcanzarse, todo esto a partir de preguntas simples como las que se puede observar en la última columna de la tabla.

Tabla 2.2. Estructura de modelos DEEPAND.

Tarea	Acción	Meta	Pregunta típica
Describir	Mostrar o relatar hechos que estén descritos en el proyecto en cuestión	Construir conocimiento	¿Qué? ¿Cuál? ¿Dónde? ¿Quién? ¿Cuándo?
Explicar	Revelar línea de raciocinio	Entendimiento profundo	¿Por qué? ¿Por qué no?
Evaluar	Evaluar la calidad de las alternativas	Ordenar las alternativas	¿Cuál es la mejor? ¿Cumple con los requisitos?
Prever	Estimar valores dados los escenarios futuros	Crear información nueva sobre el proyecto	¿Qué pasaría si...?
Formular alternativas	Crear nuevas alternativas de solución	Crear información nueva sobre el proyecto	¿Qué tal esta nueva alternativa?
Negociar	Negociar tareas y responsabilidades	Determinar las tareas	¿Quién hará o será responsable por...?
Decidir	Seleccionar la alternativa que se seguirá (o evitará)	Comprometerse con el resultado	Entonces haremos...

2.7 Principales materiales de impresión

Debido al bajo costo en la impresión con filamento a base de polímeros, este proyecto se inclina por el uso de ABS y PLA, aunque existen otros materiales a base de cerámicos y metales, el desarrollo a prueba y error del optomecanismo está impreso con el material más viable en términos de bajo costo.

Tabla 2.3. Principales materiales de impresión (Berchon, 2014).

Material	Cerámicos	Plásticos	Metales
Ceras Tejidos de células		ABS (Acronitrilo butadieno estireno)	
		PLA (Poliácido láctico)	Aluminio
	Alúmina	PET (Politereftano de etileno)	Acero de utillaje
	Zirconia	Poliamida (Nylon)	Titanio
	Mullita	Poliamida reforzada	Iconel
	Carburo de silicio	PEEK (Polieteretercetona)	Cromo-Cobalto
	Beta-fosfato triacácico	PMMA (Polimetacrilato de metilo)	Resinas epoxy termoestables
	Resinas epoxi con partículas de carga en cerámica (nano)	PC Policarbonato	Ácido inoxidable
	Sílice	PPSU ó PPSF (Polifenilsulfona)	Oro/ Platino
	Yeso	Ultem	Hastelloy
		Alumide	

2.8 Tolerancias en la impresión 3D

El método de impresión 3D patentado a finales de los años ochenta por Scott Crump llamado tecnología FDM (Fusion Deposition Modeling), es utilizado popularmente debido a la accesibilidad que tiene.

La impresión comienza desde la capa inferior, creando una superficie en la base de un material de soporte cuyas propiedades son más frágiles para poder separar la pieza. El material con el que se trabaja se encuentra en forma de filamento de plástico enrollado en una bobina y se va desenrollando para suministrar material a una boquilla de extrusión que puede iniciar o detener el flujo de fundido. La boquilla se calienta para fundir el material y se puede desplazar en ambas direcciones, horizontal y vertical, mediante un mecanismo de control numérico que es controlado directamente mediante un software de fabricación asistido por ordenador (CAM) (Reyes-Rodriguez, 2018).

Los elementos para el optomecanismo que solucione el problema de diseño planteado son imprescindibles, por lo tanto, las siguientes figuras muestran las posibles geometrías para las cuales se tienen tolerancias según su forma o posición.

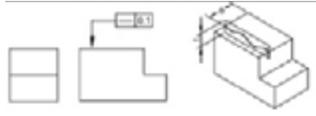
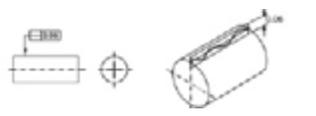
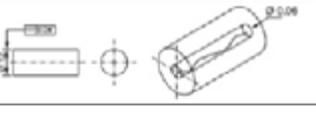
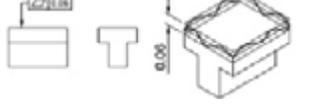
Tolerancias de Forma		
Rectitud		Una línea contenida en la superficie superior paralela al plano de proyección sobre el que se da la inclinación, debe estar contenida entre dos líneas paralelas distantes en $t=0.1$ (d es cualquier distancia).
		Cualquier generatriz del cilindro ha de estar comprendida entre dos rectas separadas entre sí 0.06 mm.
		El eje del cilindro ha de estar comprendido en una zona cilíndrica de diámetro 0.06 mm.
Planicidad		La superficie debe estar comprendida entre dos planos separados entre sí, 0.06 mm.

Figura 2.8. Tolerancia de forma, (Reyes-Rodriguez, 2018), pág. 74.

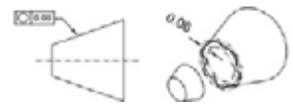
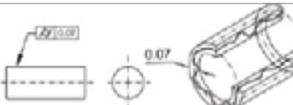
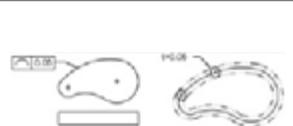
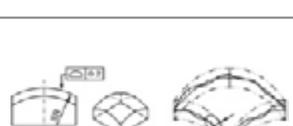
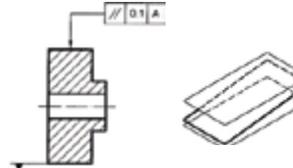
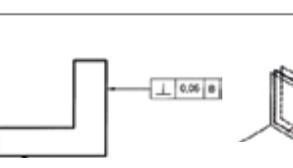
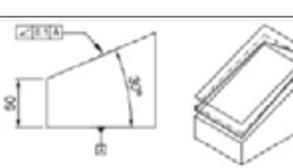
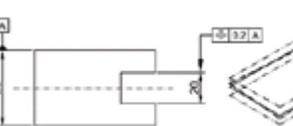
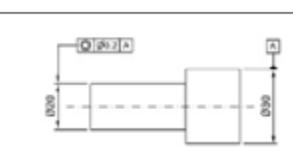
Tolerancias de Forma		
Redondez		El contorno del cono debe estar comprendido entre dos circunferencias separadas entre sí 0.06 mm
Cilindricidad		La superficie considerada debe estar comprendida entre dos cilindros coaxiales separados entre sí 0.07 mm.
Forma de una línea cualquiera		La línea debe estar comprendida entre dos líneas envolventes de círculos de diámetro $t=0.05$ cuyos centros están situados sobre una línea con la forma geométrica teórica.
Forma de una superficie cualquiera		La superficie debe estar comprendida entre dos superficies envolventes de esferas de diámetro $t = 0.2$ cuyos centros están situados sobre una superficie con la forma geométrica correcta.
Tolerancias de Posición		
Paralelismo		La superficie superior del componente debe estar comprendida entre dos planos paralelos entre sí y a la superficie de referencia A, separados 0,1 mm.
Perpendicularidad		La superficie indicada por el rectángulo de tolerancia debe estar comprendida entre dos planos paralelos entre sí, separados 0,05 mm, y perpendiculares al plano de referencia B.
Inclinación		La superficie inclinada debe estar comprendida entre dos planos entre sí, separados 0.1 mm, e inclinados 30° respecto al plano A.
Simetría		El plano de simetría de la ranura debe estar contenido entre dos planos paralelos separados 0.2 mm y colocados simétricamente respecto al plano de simetría indicado por la referencia A.
Concentricidad Coaxialidad		El eje del cilindro menor es coaxial respecto al eje de referencia (del cilindro mayor) y debe estar dentro de un cilindro de diámetro $t=0.2$ cuyo eje coincide con la referencia.

Figura 2.9. Tolerancias de forma y posición, (Reyes-Rodriguez, 2018), pág. 74.

En las siguientes tablas y figura se muestran los tres tipos de perfiles de calidad para la técnica FDM según (Murillo Jaenes, 2017), en la parte superior se describen las condiciones para cada perfil, mientras que en la segunda tabla se muestran los valores de cada desviación según la geometría correspondiente del modelo que se muestra en la Figura 2.10.

Tabla 2.4. Perfiles de impresión en 3D para FDM. Murillo Jaenes, 2017, pág. 56.

Parámetro	Rápido	Calidad estándar	Alta calidad
Altura de capa	0.3 mm	0.2 mm	0.15 mm
Velocidad de impresión	55 mm/s	45 mm/s	35 mm/s
Velocidad de relleno	55 mm/s	45 mm/s	35 mm/s
Velocidad del fondo y de la tapa	55 mm/s	45 mm/s	35 mm/s
Velocidad del perímetro exterior de la pared	55 mm/s	45 mm/s	35 mm/s
Velocidad del perímetro interior de la pared	55 mm/s	45 mm/s	35 mm/s

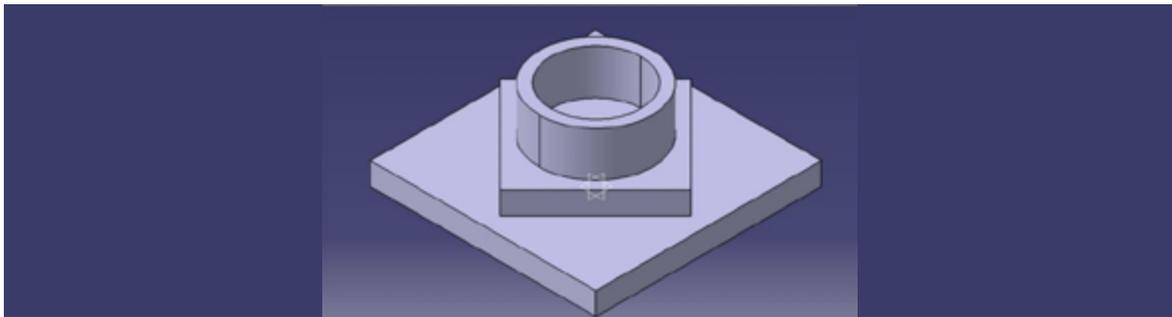


Figura 2.10. Modelo para probar tolerancias dimensionales en la impresión 3D. Murillo Jaenes, 2017.

Tabla 2.5. Desviación según la calidad de impresión 3D. Murillo Jaenes, 2017, pág. 66.

Zona	Tipo de desviación	Calidad estándar		
		Rápido	Calidad estándar	Alta calidad
Cuadrado interior	Máxima	+1,00	+0,70	+0,70
	Mínima	+0,30	+0,00	+0,35
Cuadrado superior	Máxima	+0,75	+0,65	+0,50
	Mínima	+0,30	+0,20	+0,05
Diámetro exterior	Máxima	+0,40	+0,40	+0,05
	Mínima	+0,00	+0,10	+0,00
Diámetro interior	Máxima	-0,30	-0,20	+0,30
	Mínima	-0,70	-0,65	-0,55

2.9 Impresión 3D aplicada a la optomecánica.

Los diseñadores ópticos durante muchos años se han enfrentado con el hecho de los criterios limitantes del desempeño de los sistemas ópticos, no siempre se deben atribuir a las capacidades teóricas de diseño, sino también a la habilidad para considerar las limitaciones impuestas por el diseño mecánico y las capacidades y las posibilidades de la manufactura (Farah, 2008).

La impresión 3D es un conjunto de tecnologías de fabricación por adición de un objeto sólido tridimensional, creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Se trata de crear un objeto real y en tres dimensiones a partir de un modelo diseñado por ordenador mediante un software de modelado 3D.

Para la manufactura de este prototipo, la impresión 3D resulta ideal por su versatilidad, es decir, poder diseñar y personalizar diversas piezas para atender los requerimientos del optomecanismo, ya que en muchos casos, ni siquiera existe un producto comercial que cumpla los requisitos que se desean. En la optomecánica, dicha versatilidad es muy útil para ampliar las configuraciones de un sistema óptico, consiguiendo multitud de combinaciones y posiciones (Robledo, 2015).

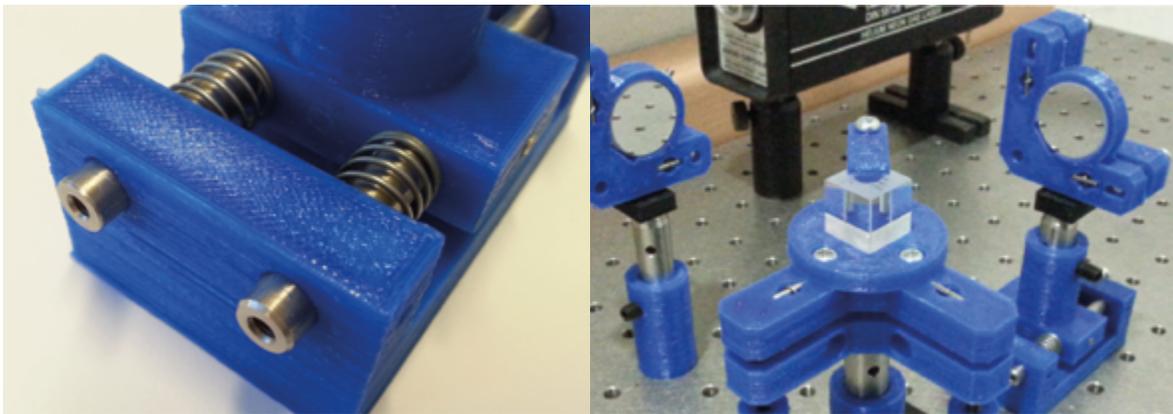


Figura 2.11. Impresión 3D aplicada a la optomecánica. Robledo 2015.

Los componentes del conjunto presentado en la Figura 2.11 se pueden construir fácilmente usando una impresora 3D basada en la Fabricación de Filamentos Fundidos (FFF), el costo de fabricación es bajo y requiere poco tiempo para ser fabricados, adicionalmente, ofrecen un rendimiento que se compara favorablemente con respecto a las alternativas comerciales de baja gama (Salazar-Serrano, Torres, & Valencia, 2017).

Capítulo 3

Concepto y diseño

.....

3.1 Características ingenieriles.

La relación entre las necesidades del usuario y las métricas del optomecanismo es esencial porque traduce las necesidades de operación que el usuario tiene, a un conjunto de especificaciones medibles. En la Tabla 3.1 se muestran las necesidades del usuario, en este caso: investigadores de óptica del ojo humano, el enunciado 1 tiene que ver con la tornillería y postes utilizados en los tableros de pruebas ópticas, el enunciado 2 y 3 tienen que ver con la sujeción de la lente, mientras que el enunciado 4, 5 y 6 tiene que ver con la facilidad de manipulación que el optomecanismo puede tener y la reposición de piezas en el caso de un imprevisto.

Tabla 3.1. Lista de necesidades del usuario del optomecanismo y su importancia.

#...	Necesidades de usuario	Importancia
1	Posibilitar la fácil instalación del optomecanismo sobre un tablero de pruebas ópticas.	5
2	Que se pueda cambiar de lente fácilmente por una lente de repuesto.	5
3	Que a la lente se le aplique dos cargas mecánicas a cuatro puntos simétricamente distribuidos en el perímetro del perfil corneal.	5
4	Diseño compacto	3
5	Permite la alineación con otros optomecanismos.	5
6	El mantenimiento no debe ser caro en términos de tiempo y dinero.	2
7	Facilidad de reposición de piezas desgastadas.	1
8	Que el optomecanismo esté protegido del polvo mientras este no se usa.	1

El enunciado 7 depende principalmente de la capacidad manufacturera de los interesados en reponer una pieza, la impresión en 3D es una herramienta útil en la optomecánica y una forma práctica de reponer estas piezas, sin embargo, esta medida está sujeta a otras condiciones y variantes que a través del diseño de detalle se podrán resolver.

El enunciado 8 puede resolverse en la etapa creativa de bocetaje y modelado 3D del proyecto, porque así se generan ideas a través de la experimentación con formas geométricas, y se establece una solución para la necesidad. En comparación con las monturas más cercanas a resolver las necesidades de este optomecanismo ninguna tiene aditamento, forma o estructura que sugiera ser una protección contra el polvo, pero se tiene, por ejemplo, el caso de las cámaras tipo réflex que comúnmente tienen una tapa protectora para el objetivo.

Estos dos enunciados (7 y 8 de la Tabla 3.1) carecen de mesurabilidad, por lo tanto, son omitidas en la Tabla 3.2. Adicionalmente, se establece un nivel de conformidad esperada según la escala de Likert a cada enunciado, donde el número 5 es “muy importante”, 4 es “importante”, 3 es equivalente a “moderadamente importante”, 2 es “de poca importancia” y el número 1 “sin importancia o sin valor” (Biddix, Renn, & Roper, 2018).

En la Tabla 3.2 se traducen las necesidades de la Tabla 3.1 a características precisas que puedan ser medidas. La Tabla 3.3 muestra la matriz de relación entre las necesidades (filas) y la métrica (columnas) esta matriz es un elemento de la *Casa de la calidad*, técnica aplicada en el *Despliegue de la Función de Calidad* o bien QFD del anglicismo: *Quality Function Deployment* (Madu, 2006).

Tabla 3.2. Lista de métricas para el optomecanismo.

Métrica número	Número de necesidad	Métrica	Importancia	Unidades
1	1	Tornillería convencional en tableros de pruebas ópticas.	5	mm-pulg.
2	2	Tiempo mínimo en desinstalar una lente.	1	s
3	2	Tiempo mínimo en instalar una lente de re- puesto.	1	s
4	3	Puntos de transmisión de fuerza	5	#
5	4	Volumen	3	cm ³
6	3	Dimensiones de motores de paso	4	cm
7	5	Altura máxima de poste	5	cm
8	5	Altura mínima de poste	5	cm
9	5	Desplazamiento de la lente sobre el eje X	1	cm
10	5	Desplazamiento de la lente sobre el eje Y	1	cm
11	5	Ajuste angular del optomecanismo.	2	°
12	1,2,5	Herramientas y materiales necesarios para la instalación.	4	sin métrica
13	6,7,8	Herramientas y materiales necesarios para el mantenimiento.	2	sin métrica

Actualmente, en el mercado no existe una montura con las características similares a las requeridas, sin embargo, existen algunos ejemplos de monturas en venta en la web, incluso algunos proveedores proporcionan el modelo en 3D de forma gratuita, gracias a esto se obtuvieron datos importantes como el volumen, peso y proporciones.

Tabla 3.3. Matriz de necesidades-métricas.

		Métrica												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Necesidad		Tornillería convencional en tableros de pruebas ópticas	Tiempo mínimo en desinstalar una lente	Tiempo mínimo en instalar una lente de repuesto	Puntos de transmisión de fuerza	Volumen	Dimensiones de motores de paso	Altura máxima de poste	Altura mínima de poste	Desplazamiento de la lente sobre el eje Xs	Desplazamiento de la lente sobre el eje Ys	Ajuste angular del optomecanismo	Herramientas y materiales necesarios para la instalación	Herramientas y materiales necesarios para el mantenimiento
1	Posibilitar la fácil instalación del optomecanismo sobre un tablero de pruebas ópticas.	•											•	
2	Que se pueda cambiar de lente fácilmente por una lente de repuesto.		•	•									•	
3	Que a la lente se le aplique dos cargas mecánicas a cuatro puntos simétricamente distribuidos en el perímetro del perfil corneal.				•		•							
4	Diseño compacto					•								
5	Permite la alineación con otros optomecanismos.							•	•	•	•	•	•	
6	El mantenimiento no debe ser caro en términos de tiempo y dinero.													•
7	Facilidad de reposición de piezas desgastadas.													•
8	Que el optomecanismo esté protegido del polvo mientras este no se usa.													•

A través de estos modelos se puede analizar la función y forma de cada elemento de la montura, en la Tabla 3.4 se muestran valores que responden según el modelo y marca de la montura, a las necesidades del optomecanismo planteado, cada montura cuenta con una descripción gráfica y escrita más adelante.

Tabla 3.4. Tabla de comparación con la competencia (benchmarking) basada en métricas.

# de Métrica	# de Necesidad	Métrica	Importancia	Unidades	AC-1A Newport	SCL60C Thorlabs	830-0035-02 EKSMA	X-Y 12.7mm Edmund	3MP,3SMP STANDA LTD
1	1	Tornillería convencional en tableros de pruebas ópticas.	5	mm-pulg.	M4 8-32	M4 8-32	M6	M6	M3,M4.M6, M8, 8-32, 1/4-20
2	2	Tiempo mínimo en desinstalar una lente.	5	s	10	10	20	20	Inhabilitado
3	2	Tiempo mínimo en instalar una lente de repuesto.	5	s	60	10	60	60	Inhabilitado
4	3	Puntos de transmisión de fuerza	5	#	3	3	3	2	1
5	4	Volumen	4	cm ³	22.1	47.4	67.7	64.3	Lista
6	5	Dimensiones de motores de paso	4	cm	No tiene				
7	6	Altura máxima de poste	5	cm	No tiene	No tiene	No tiene	No tiene	15 cm
8	6	Altura mínima de poste	5	cm	No tiene	No tiene	No tiene	No tiene	2.5 cm
9	6	Desplazamiento de la lente sobre el eje Xs	1	cm	0	0	0	0.15	0
10	6	Desplazamiento de la lente sobre el eje Ys	1	cm	0	0	0	0.15	0
11	6	Ajuste angular del optomecanismo.	3	°	0	0	0	0	360
12	1,2,6	Herramientas y materiales necesarios para la instalación.	4	Lista	Manual	Manual	Manual	Manual	Llave allen de 1.5, 2, 3 mm
13	7,8,9	Herramientas y materiales necesarios para el mantenimiento.	2	Lista	• Limpiador líquido • Paño				

La última columna de izquierda a derecha de la Tabla 3.4 señala una lista de ejemplos de aditamentos que los científicos comúnmente utilizan para colocar monturas sobre un tablero de pruebas ópticas (ver Figura 3.5), aunque los postes de colocación no son optomecanismos, se toman en cuenta porque al ser universales se debe tomar en cuenta la medida de la cuerda, adaptadores y alturas convencionales para facilitar el ensamble del arreglo óptico deseado.

Cada modelo de la Tabla 3.4 fue elegida por un rango de ajuste cercano a $\varnothing 1$ cm para poder sostener una lente sólida, aunque para este caso la montura esté pensada para sostener lentes flexibles, la información proporcionada por las empresas dedicadas a la producción de optomecanismos es de gran utilidad porque es semejante a tomar recomendaciones de expertos en el tema en cuanto a la elección de formas, materiales, mecanismos, etc.

En otras palabras, a través de este análisis comparativo también llamado benchmarking, se busca disminuir los riesgos relacionados con el desarrollo e innovación de la montura, al imitar las prácticas desarrolladas por otros, que ya han tenido éxito (Antún-Callaba & Ojeda-Toche, 2002).

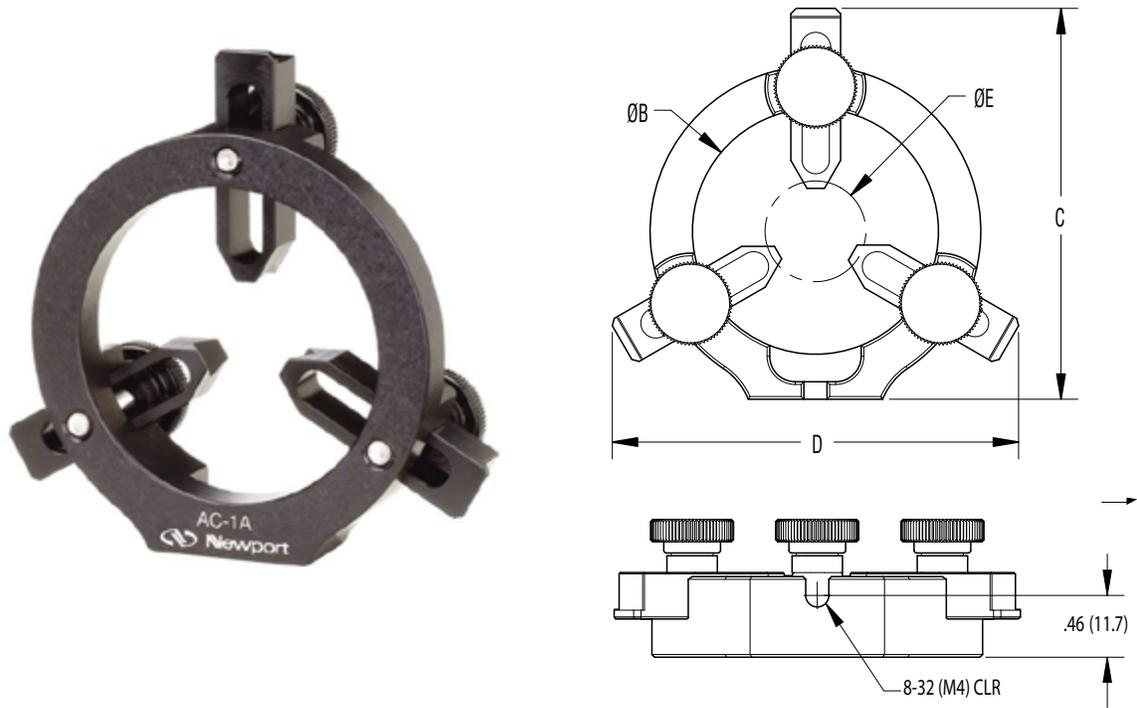


Figura 3.1. Montura AC-1A de la marca Newport®. Newport 2019.

AC-1A

El soporte de lente fijo universal AC-1A proporciona un soporte rígido y una orientación asegurada para objetos redondos de 5.0 a 46.2 mm de diámetro de prácticamente cualquier grosor y longitud. Sus tres brazos de soporte se deslizan suavemente para un fácil ajuste de posición y se aseguran en su lugar con tornillos de mariposa.

Para sujetar una lente se colocan los brazos de soporte inferiores a la distancia del radio deseado, se inserta el elemento y se ajusta el brazo superior hacia abajo para sujetar de forma segura la lente. Los brazos de soporte están diseñados con una ranura en V estrecha en un extremo para el montaje de lentes delgadas, y en el otro extremo del brazo tienen una punta amplia en forma de L y sirve para el montaje de lentes gruesas, espejos y divisores de haz. Para cambiar las puntas, se retira el tornillo de mariposa y se invierte la dirección de cada brazo del soporte. Los montajes de lentes ajustables de la serie AC incorporan un orificio en su base, la cual se atornilla a un poste (Newport, 2019).

SCL60C

Los brazos accionados por resorte se centran en una lente circular dentro del soporte, en los extremos de los brazos hay una ranura que alinea y agarra firmemente el borde de la lente que sostiene, este puede ser un diámetro de $\varnothing 0.15$ “($\varnothing 3.8$ mm) a $\varnothing 1.77$ ” ($\varnothing 45.0$ mm) que no son más pesadas que 1.0 lb. La montura SCL60C tiene un sistema de jaula que permite la colocación de postes en los orificios que están a cada 60 mm por lado de la montura.

La ventaja del optomecanismo es que los brazos de la montura se abren fácilmente con una mano al presionar las pestañas del actuador entre el pulgar y el índice. La lente se sostiene entre los dedos de montaje cuando se sueltan las pestañas del actuador. Un orificio roscado de 8-32 (M4) ubicado en la parte inferior también permite una sujeción directa a postes de $\varnothing 1 / 2$ “ (ThorLabs, 2019).

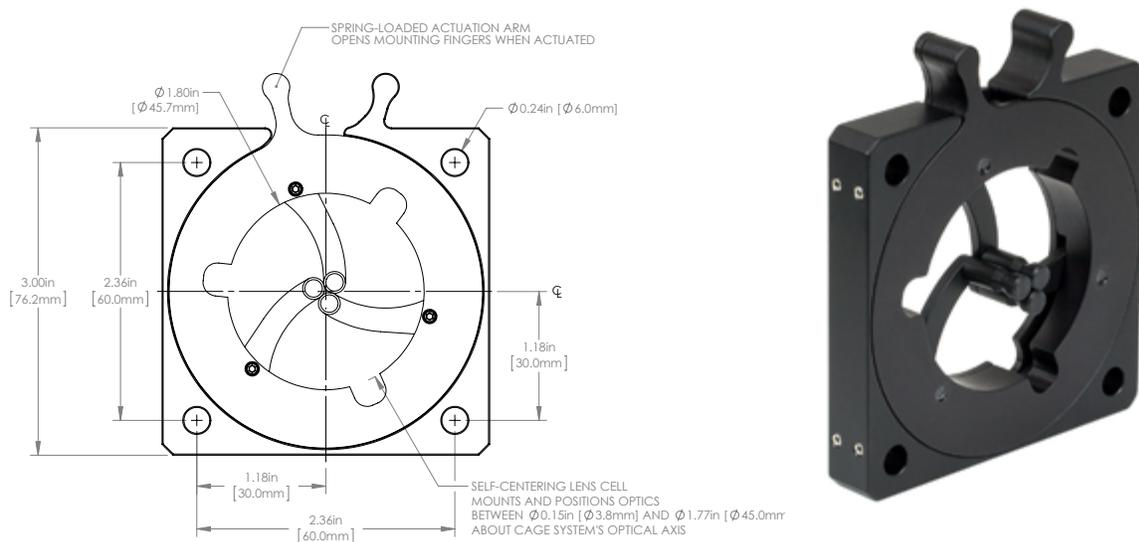


Figura 3.2. Montura SCL60C de la marca ThorLabs®. ThorLabs 2019.

Montura de lente ajustable 830-0030

Las lentes se colocan y bloquean en su lugar por tres conjuntos de ejes rígidos con puntas de ranura en V. Cada eje se ajusta individualmente e incorpora un manguito deslizante para el posicionamiento aproximado y el ajuste del diámetro. Los tornillos de mariposa al final de dos manguitos ortogonales proporcionan un ajuste fino de la posición X-Y dentro del rango de 3 mm. Los orificios de montaje en el anillo de soporte facilitan el acoplamiento a todos los elementos de montaje (EKSMA Optics, 2019).

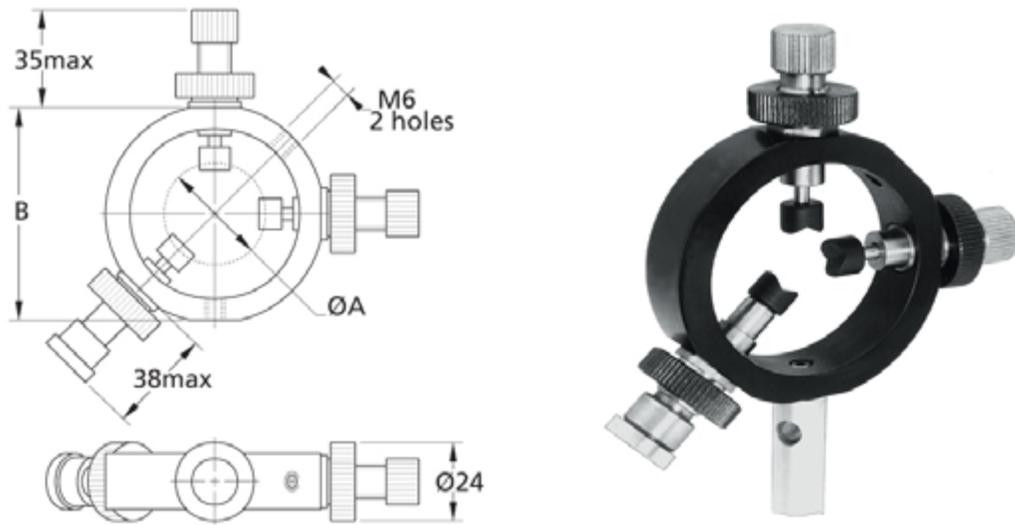


Figura 3.3. Montura de lente ajustable 830-0030 de la marca EKSMA Optics®. EKSMA Optics 2019.

12.7mm Maximum Optic Diameter, X-Y Translating Optic Mount

Permite el desplazamiento de ± 1.5 mm sobre los ejes X y Y para lentes rígidos de hasta 15 mm de espesor y es ideal para la alineación basada en el tablero de pruebas ópticas, el optomecanismo está diseñado para desplazar la lente en los ejes X-Y con resolución de 0.25 mm por revolución, en la parte plana inferior de la montura se encuentra un orificio roscado para los postes convencionales de la marca (Edmund Optics, 2019).

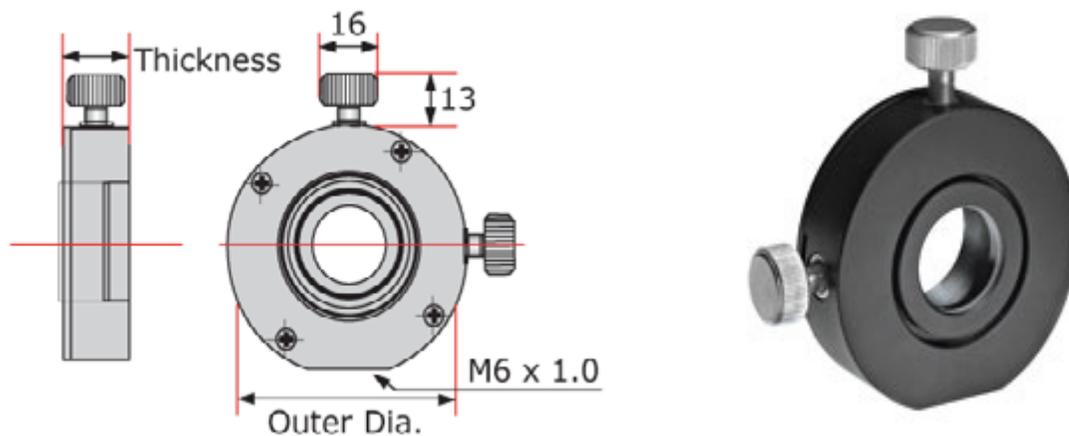


Figura 3.4. Montura 12.7mm Maximum Optic Diameter X-Y Translating Optic. Edmund Optics 2019.

Postes para montura

Los componentes que muestra la Figura 3.5 son aditamentos para la instrumentación de experimentos en óptica sobre tableros de prueba repletos de perforaciones con cuerda para poder atornillar diversos tipos de postes.

Los postes de montaje tienen orificios M4 (8-32 en imperial) y M6 (1/4-20 en imperial) en los extremos. Los componentes se pueden montar utilizando tornillos o adaptadores para diferentes roscas. (STANDA LTD, 2019).



Figura 3.5. Postes y adaptadores de la marca STANDA LTD®. STANDA LTD 2019.

Basándose en las características cuantitativas de los modelos mostrados mediante el benchmarking, se establece una relación entre las especificaciones del optomecanismo y los valores métricos marginales y los valores métricos ideales, es decir, el valor ideal es el objetivo que se debe alcanzar a través de las características del diseño de la montura optomecánica, sin embargo, puede ser también una aproximación considerable al valor planteado, por otra parte, el valor marginal se refiere al límite o margen de tolerancia para ciertas especificaciones.

En la Tabla 3.5 se presenta una serie de valores marginales e ideales para cada métrica considerada para diseñar un modelo técnico y así establecer las especificaciones finales de la montura optomecánica.

Tabla 3.5. Especificaciones objetivo.

# de Métrica	# de Necesidad	Métrica	Importancia	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	1	Tornillería convencional en tableros de pruebas ópticas	5	mm-pulg.	M4	M6
2	2	Tiempo mínimo en desinstalar una lente	5	s		
3	2	Tiempo mínimo en instalar una lente de repuesto	5	s	60	30
4	3	Puntos de transmisión de fuerza	5	#	4	4
5	4	Volumen	3	cm ³	135.4	22.1
6	3	Dimensiones de motores de paso	4	cm	3.5 x 2.8 x 2.9	3.5 x 2.8 x 2.9
7	6	Altura máxima de poste	5	cm	7.5	15
8	6	Altura mínima de poste	5	cm	7.5	2.5
9	6	Desplazamiento de la lente sobre el eje Xs	1	cm	0.15	0.3
10	6	Desplazamiento de la lente sobre el eje Ys	1	cm	0.15	0.3
11	6	Ajuste angular del optomecanismo	3	°	0	360

El diseño de la montura optomecánica se dividirá en subsistemas. En este contexto, las especificaciones se emplean para definir los objetivos de desarrollo de cada uno de los subsistemas (Ulrich & Eppinger, 2013).

Bajo esa premisa lo recomendado es reducir el número de especificaciones a modo de poder asegurar ciertas métricas a cambio de la probabilidad de perder algunas otras durante la ejecución del proyecto.

3.2 Especificaciones finales.

Pese a que no existe en el mercado una montura optomecánica con las especificaciones necesarias para colocar lentes flexibles, este apartado plantea dos modelos técnicos que en adición con las especificaciones finales del producto establece el comienzo de la conceptualización y el desarrollo de prototipos.

La Figura 3.6 muestra dos modelos técnicos del diseño de las monturas a desarrollar, de lado izquierdo del modelo representado por un rectángulo se expone variantes de entrada, mientras que de lado derecho las flechas indican variantes de salida según la influencia en el diseño de la montura.

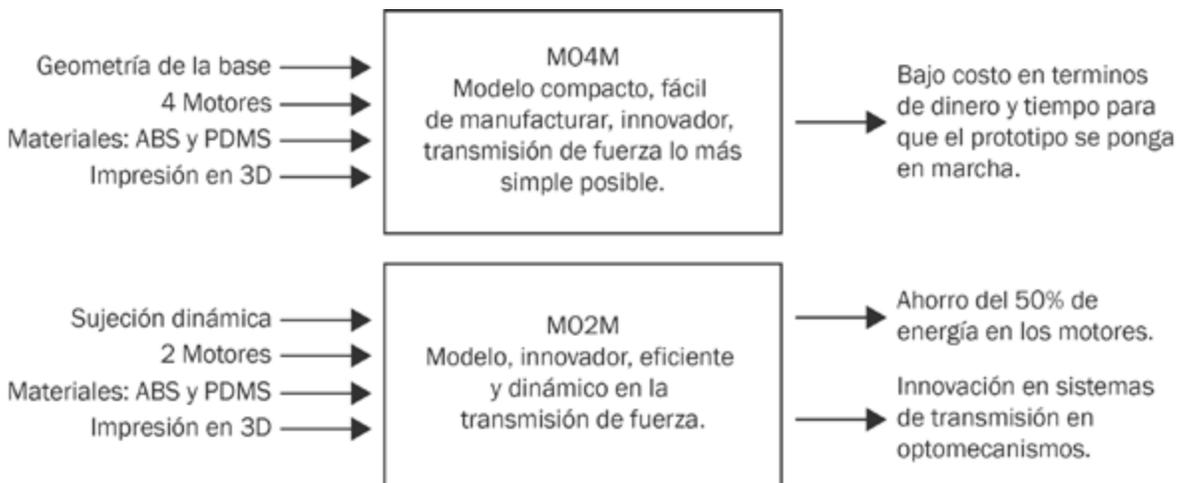


Figura 3.6. Modelos de factibilidad técnica.

La Figura 3.6 muestra un modelo con 4 motores, por lo tanto, se tiene un motor por cada punto donde se debe aplicar esfuerzo a la lente, mientras que el otro modelo cuenta con 2 motores, lo cual sugiere que el diseño del mecanismo transmita la fuerza de un motor a dos puntos opuestos de la lente, en consecuencia un sistema será más complejo que otro según el número de piezas y subsistemas. Para uso práctico, el primer modelo es nombrado como MO4M (Modelo Optomecánico de 4 Motores), de manera similar el segundo modelo es nombrado el MO2M (Modelo de Optomecánico de 2 Motores).

En la Tabla 3.6 se presentan las especificaciones finales del producto o montura optomecánica. Cabe destacar que los valores mostrados para el volumen de la montura no toman en cuenta el volumen de los motores de paso, puesto que los valores de la tabla están basados en monturas que no incluyen un actuador rotativo.

Los valores de desplazamiento sobre el eje X y Y de la Tabla 3.6 se encuentran sujetos a las propiedades elásticas del PDMS y el método de sujeción que se utilice, estos valores serán evaluados más adelante mediante un estudio de deformación de la lente a través de un software de análisis de elemento finito. No obstante, se plantea 1.5 mm como valor inicial en referencia a lo establecido en la Tabla 3.5. Adicionalmente, el ajuste angular tiene un valor a 0 grados debido a que el haz de luz incide en línea recta al optomecanismo.

Por último, el valor “Tornillería”, se refiere al uso de tornillos para el ensamble de los motores de paso o las piezas que se necesiten sujetar.

Tabla 3.6. Especificaciones finales.

Núm.	Métrica	Unidad	Valor
1	Tornillería convencional en tableros de pruebas ópticas.	mm-pulg.	M6
2	Tiempo mínimo en desinstalar una lente.	s	30
3	Tiempo mínimo en instalar una lente de repuesto.	s	30
4	Puntos de transmisión de fuerza	#	4
5	Volumen	cm ³	< 22.1
6	Dimensiones de motores de paso	cm	1.9 x 2.6 x 3
7	Desplazamiento de la lente sobre el eje Xs	cm	0.15
8	Desplazamiento de la lente sobre el eje Ys	cm	0.15
9	Ajuste angular del optomecanismo.	°	0
10	Herramientas y materiales necesarios para la instalación.	Lista	Tornillería

3.3 Diseño conceptual.

De forma general, el funcionamiento de la montura a diseñar consta de tres variantes; la fuerza que deformará la lente, la lente, que implica diseñar el cuerpo de sujeción en el borde de ella sin afectar la zona óptica de esta misma (Ver Figura 3.7), y un tercer subsistema que tiene como función desmontar la lente del optomecanismo, por tal motivo el acondicionamiento de la montura se enfocará a que el usuario pueda cambiar la lente de la montura de forma intuitiva.

La Figura 3.8 presenta el diagrama de funcionamiento que expresa la idea del párrafo anterior, el enunciado “Deformar la lente elástica parcialmente” se considerará una variante de salida en el diagrama, esta es la función general de la montura optomecánica.

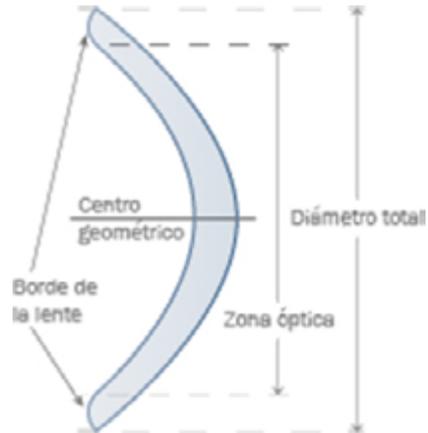


Figura 3.7. Partes básicas para una lente.

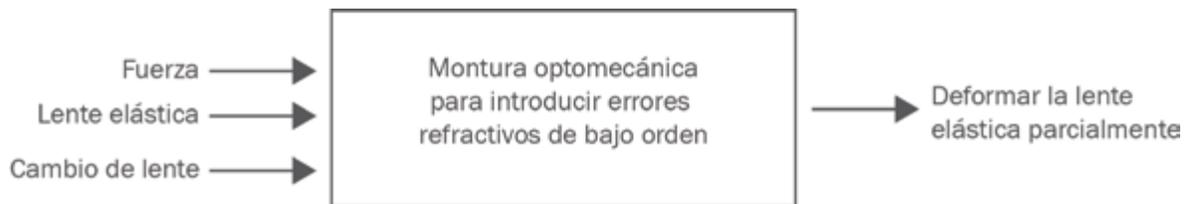


Figura 3.8 Diagrama funcional general de montura optomecánica para introducir errores refractivos de bajo orden en una lente elástica.

Con el objetivo de asimilar mejor la información necesaria para diseñar un prototipo eficiente, el diagrama funcional general se ramifica para abordar cada parte por separado.

La Figura 3.9 muestra el refinamiento del diagrama general de modo que se plantean cinco subfunciones, cada una tendrá dos alternativas de diseño basadas en los modelos MO4M y MO2M, la primera oración: “Establecer la posición inicial del sistema de transmisión para la colocación de la lente” es parte del diseño del subsistema que encargado de transmitir el movimiento a los cuatro puntos simétricos en el borde de la lente.

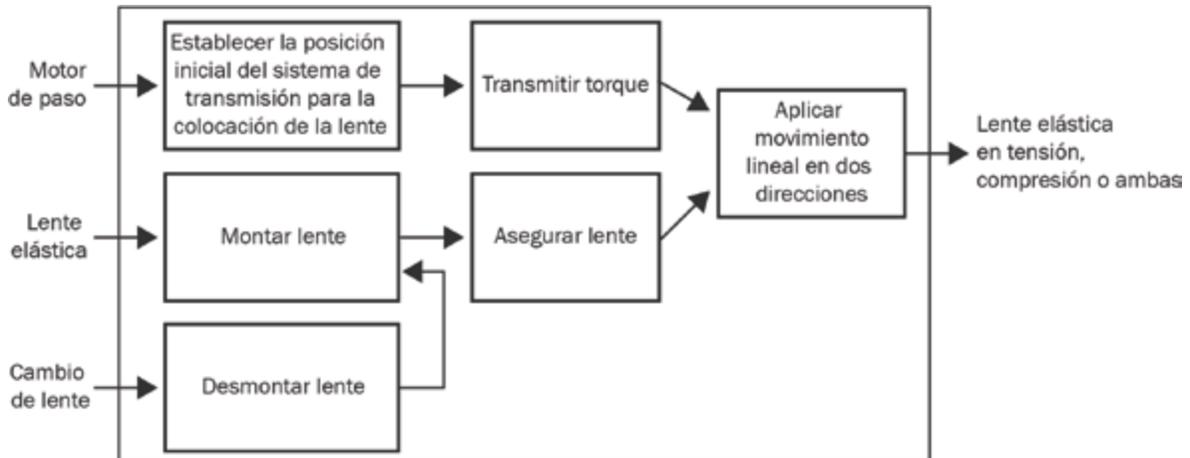


Figura 3.9. Descomposición del diagrama funcional de la montura optomecánica para introducir errores refractivos de bajo orden en una lente elástica.

En la figura 3.9 los rectángulos contenidos en el rectángulo de mayor proporción son llamados subfunciones, también considerados subproblemas (Ulrich & Eppinger, 2013), construyen una relación de dependencia, esto porque el sistema de transmisión debe estar en una posición donde la lente no se encuentre bajo tensión o compresión, de lo contrario sería difícil montar o desmontar la lente si no se encuentra en posición de reposo. Independientemente si el sistema funciona con cuatro o dos motores, la sincronización mecánica del sistema debe estar lista solo para programar el movimiento de los servomotores.

El segundo subproblema implica que a la lente se agregue una superficie que auxilie el agarre del mecanismo sin invadir la zona óptica de esta, ya que por aquí es donde pasará el haz de luz, incluso un cuerpo transparente que interfiera el trayecto del haz, podría afectar el resultado del análisis interferométrico. El bloque “Desmontar lente” detallará el diseño ergonómico para que en todo caso sea posible cambiar una lente sin dañar al artefacto ni al usuario, esta tarea debe ser fácil y segura.

Después que la lente es montada, la siguiente subfunción del diagrama llamada: “Transmitir el torque” se encargará de desplazar el borde de la lente con el movimiento generado por cada paso del motor, se afirma la utilización de motores bipolares en vista de que el sistema de engranes necesita que la fuerza que se aplique a la lente funcione en dos direcciones, esto para restablecer la posición inicial una vez terminada una prueba interferométrica.

Por último, la variante de salida “Lente elástica en tensión, compresión o ambas” estará enfocada en el comportamiento de la lente mediante el análisis de elemento finito a través de un software comercial, de esta forma se pretende optimizar el desempeño de la montura, existen distintas posiciones de la lente en el optomecanismo, dos de ellas utilizan

únicamente la compresión, la primera con cuatro puntos ejerciendo las cargas hacia el centro de la lente, tal y como lo muestra la Figura 3.10 (a), de manera similar la Figura 3.10 (b), presenta el mismo caso, pero solo se desplaza en dos puntos sobre el borde.

La Figura 3.11 (a) ilustra las cargas en dirección opuesta al centro de la lente, las cargas puntuales se encuentran en los cuatro puntos establecidos, mientras que en inciso en la misma figura en el inciso (b) se presenta solo en dos puntos.

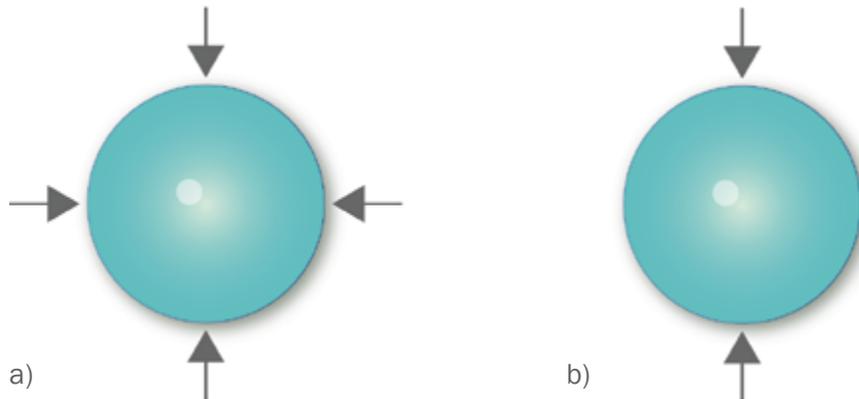


Figura 3.10. Cargas puntuales para ocasionar compresión: a) con 4 cargas, b) con 2 cargas.

Finalmente, en la Figura 3.12 aparece una quinta forma de aplicar las cargas sobre la superficie esférica, combina la tensión y compresión, es decir, dos cargas empujarán el borde de la lente hacia el centro de esta misma, mientras que en los otros dos puntos la carga estará en dirección contraria al centro de la lente simultáneamente.

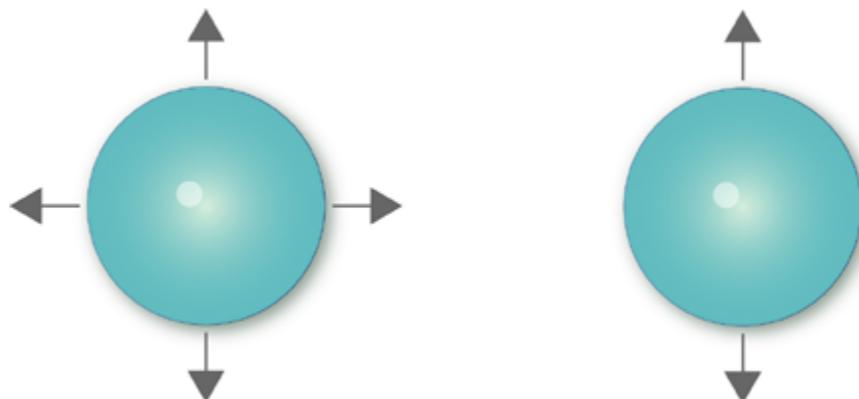


Figura 3.11. Cargas puntuales para ocasionar tensión: (a) con 4 cargas y (b) con 2 cargas.

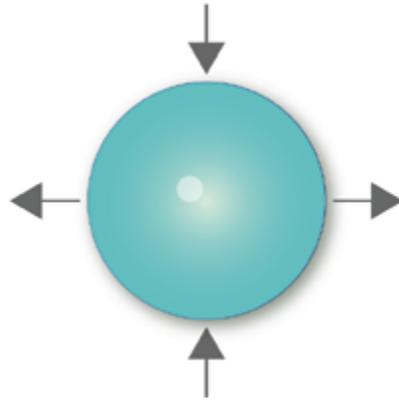


Figura 3.12. Cargas puntuales mixtas para ocasionar tensión y compresión al mismo tiempo.

3.4 Conceptos de solución.

Para encontrar solución a cada parte del problema primero se abordaron los subproblemas; montar y asegurar la lente, que concede la razón de ser a los demás subproblemas debido a que sin la existencia del contacto con el borde de la lente, no se podrían aplicar los esfuerzos de tensión o compresión en los cuatro puntos requeridos al sistema.

Por lo tanto, se plantea que los primeros subproblemas a resolver sean los que siguen la secuencia de la lente elástica. En la Figura 3.13 se observan tres subproblemas que son la base en la construcción de conceptos de solución para esta parte del diagrama.



Figura 3.13. Secuencia de la lente elástica aislada de la descomposición del diagrama funcional de la montura optomecánica.

Las posibles soluciones de los enunciados mostrados en los rectángulos de la Figura 3.13 se presentan enlistados en la figura 3.14, la primera columna: montar lente tiene 3 soluciones, la segunda: asegurar lente tiene 5 soluciones, mientras que la tercera: aplicar movimiento lineal en dos direcciones tiene 4 soluciones. Teóricamente existen 60 posibilidades de solución al combinarse, no obstante, mostrar gráficamente algunas combinaciones y siguiendo los principios de diseño mecánico de las combinaciones más viables que otras debido a varias razones, entre ellas el número de elementos físicos que el concepto de solución tiene, un ejemplo claro de esto es la solución “Leva” que implica usar un resorte, una rueda que haga contacto con la leva y un seguidor que es básicamente un cilindro (Figura 3.15) que guía a la rueda, todo esto sostenido por un armazón que da un total de cinco elementos, a diferencia de la cremallera que implica menos elementos, es decir, la cremallera, un engrane y la base o armazón.

En las siguientes seis figuras, se muestran conceptos de solución de forma gráfica, estos están ilustrados sin una base o armazón, a modo que el mecanismo se pueda entender mejor. A cada concepto se adjunta una respectiva tabla de combinación.

Montar lente	Asegurar lente	Aplicar movimiento lineal en dos direcciones
Geometría del borde de la lente	Pernos	Cremallera
Ranura	Tenazas	Tornillo
Aro	Celda	Leva
	Brida	Biela
	Prisionero	

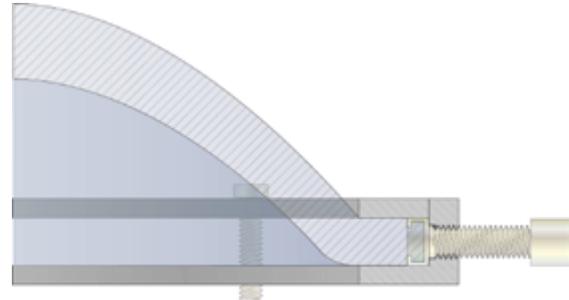


Figura 3.14. Combinación de soluciones: geometría del borde de la lente, brida, tornillo.

La Figura 3.14 muestra un diagrama que combina una solución por cada uno de los tres conjuntos, en consecuencia se establece que la mezcla de las soluciones “Geometría del borde de la lente”, “Brida” y “Tornillo” generen un concepto de solución. Del mismo modo, la Figura 3.15 presenta otra combinación donde se presenta el mecanismo de “Leva” mencionado anteriormente.

Montar lente	Asegurar lente	Aplicar movimiento lineal en dos direcciones
Geometría del borde de la lente	Pernos	Cremallera
Ranura	Tenazas	Tornillo
Aro	Celda	Leva
	Brida	Biela
	Prisionero	

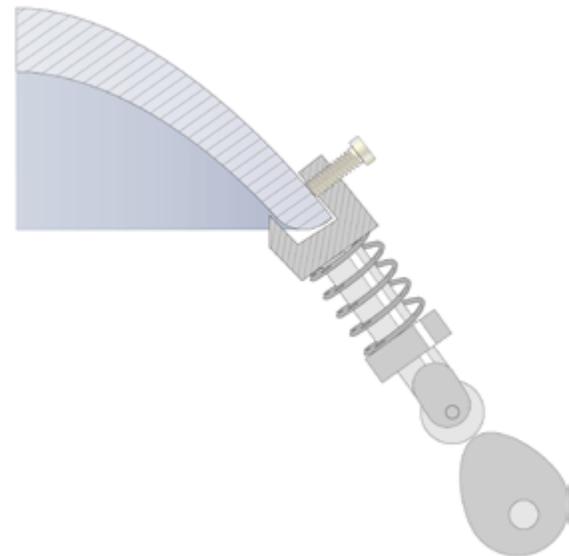
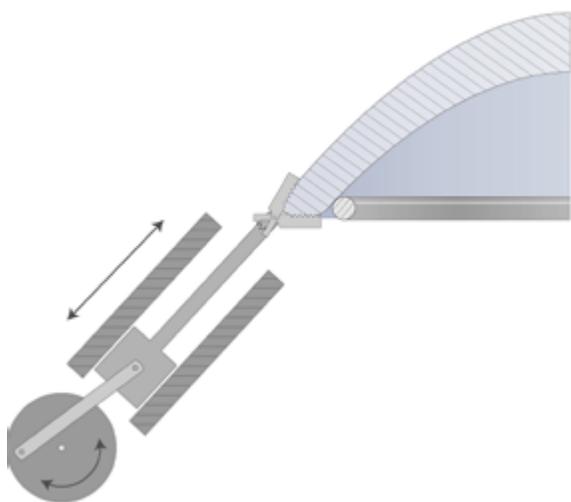


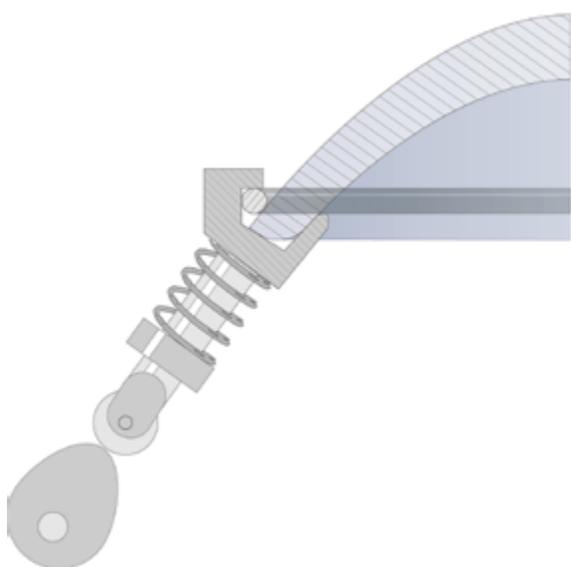
Figura 3.15. Combinación de soluciones: geometría del borde de la lente, brida, tornillo.



Montar lente	Asegurar lente	Aplicar movimiento lineal en dos direcciones
Geometría del borde de la lente	Pernos	Cremallera
Ranura	Tenazas	Tornillo
Aro	Celda	Leva
	Brida	Biel
	Prisionero	

Figura 3.16. Combinación de soluciones: aro, tenazas, biela.

La Figura 3.16 y 3.17, no presentan ninguna adición física al borde de la lente, el método de montaje que se presenta es mediante el uso de un aro que atore la parte interna o externa de la lente.



Montar lente	Asegurar lente	Aplicar movimiento lineal en dos direcciones
Geometría del borde de la lente	Pernos	Cremallera
Ranura	Tenazas	Tornillo
Aro	Celda	Leva
	Brida	Biel
	Prisionero	

Figura 3.17. Combinación de soluciones: aro, celda, tornillo.

Montar lente	Asegurar lente	Aplicar movimiento lineal en dos direcciones
Geometría del borde de la lente	Pernos	Cremallera
Ranura	Tenazas	Tornillo
Aro	Celda	Leva
	Brida	Biela
	Prisionero	

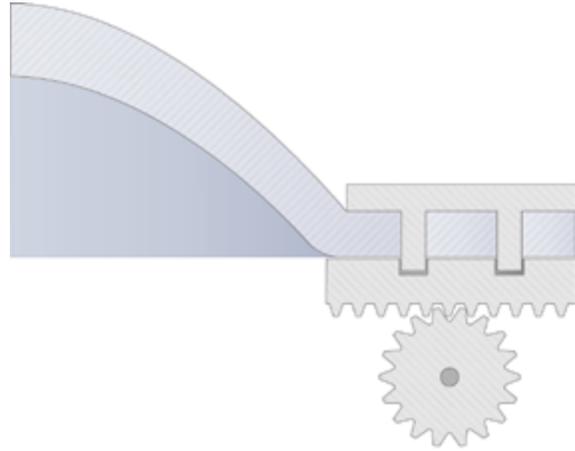


Figura 3.18. Combinación de soluciones: geometría del borde de la lente, prisionero, cremallera.

En contra parte a los dos ejemplos anteriores, las figuras 3.18 y 3.19, presentan una adición sobre el borde de la lente, justo donde se necesita aplicar el esfuerzo de tensión o compresión, en la Figura 3.18 aparecen un par de prisioneros que se ensamblan con una cremallera la cual sujeta la extremidad que la lente posee.

Montar lente	Asegurar lente	Aplicar movimiento lineal en dos direcciones
Geometría del borde de la lente	Pernos	Cremallera
Ranura	Tenazas	Tornillo
Aro	Celda	Leva
	Brida	Biela
	Prisionero	

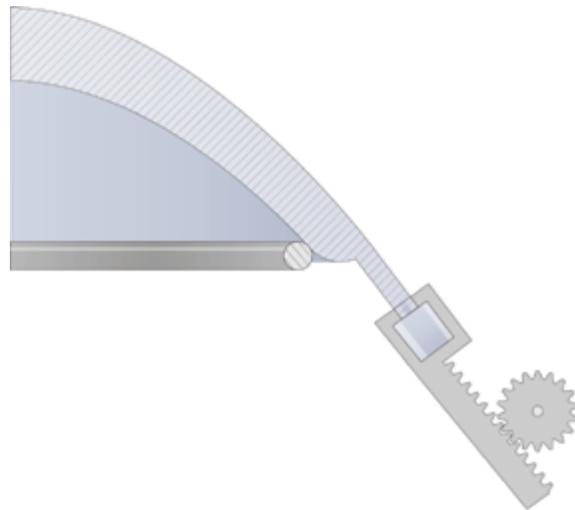


Figura 3.19. Combinación de soluciones: geometría del borde de la lente, celda, cremallera.

Mientras que la Figura 3.19 el mecanismo es el mismo, pero la forma de sujetar la lente es distinta, la celda no interfiere a través de la geometría del cabo, sino que rodea el cuerpo más voluminoso situado en la punta del cabo de la lente.

El siguiente problema fue resolver el desmontar la lente, la solución a este subproblema depende directamente de cómo esté sujeta, se plantearon soluciones para establecer la posición inicial del sistema de transmisión para que la colocación y desinstalación de la lente sea por consecuencia una tarea fácil e intuitiva, en la Tabla 3.7 se establece la relación entre los seis conceptos de solución, las posibles soluciones de: desmontar lente y establecer la posición inicial del sistema de transmisión para la colocación de la lente.

Tabla 3.7. Soluciones a subproblemas tomando en cuenta los conceptos de solución de la secuencia de la lente elástica del diagrama general.

Concepto de solución	Desmontar lente	Establecer la posición inicial del sistema de transmisión para la colocación de la lente.
Figura 3.14	Desatornillar brida (al menos 4 pernos).	Coincidencia geométrica de la lente con la brida (radio del círculo interno de la brida igual al radio exterior de la lente), la coincidencia geométrica en los cabos con los tornillos y el tornillo debe estar en la mitad de su trayectoria total.
Figura 3.15	Desatornillar los 4 pernos de las ranuras.	La leva deberá estar en contacto con el resto del mecanismo cuando la distancia entre el eje sobre la que gira y la superficie de contacto sea igual a: la distancia media entre el radio máximo y el radio mínimo de esta.
Figura 3.16	Liberar la lente de las tenazas.	La biela debe estar en la mitad de su trayectoria total.
Figura 3.17	Retirar el aro que ejerce presión con la celda sobre la lente.	El tornillo debe estar en la mitad de su trayectoria total.
Figura 3.18	Retirar la pieza que sostiene a los prisioneros.	Coincidencia geométrica en los cabos con la cremallera, esta debe estar en la mitad de su trayectoria total.
Figura 3.19	Abrir celda	Coincidencia geométrica en los cabos con las celdas, la cremallera debe estar a la mitad de su trayectoria total.

3.5 Reflexión sobre las posibles soluciones

En esta parte se explica la integración de las soluciones factibles recolectadas hasta este punto, en la sección anterior se analizaron cinco de los seis subproblemas descompuestos en el diagrama general de la Figura 3.9, no obstante el subproblema “Transmitir torque” que falta analizar se ha establecido como un subsistema que conecta el sistema mecánico que aplica el movimiento lineal sobre el borde de la lente con el sistema mecánico que transmite el torque del motor paso a paso.

Para desarrollar prototipos basados en los modelos de factibilidad técnica de la Figura 3.6, se discutieron las opciones con las que se podrían obtener mejores resultados, todo esto bajo la estructura de las reuniones DEEPAND, como resultado surgieron tres propuestas de diseño y a modo de aterrizar estas ideas de forma rápida se suscitó una serie de esbozos a mano alzada que ahora forman parte de la conceptualización de este proyecto.

La Figura 3.20 muestra los bocetos de una primera propuesta que resuelva el subproblema faltante, la idea es utilizar cremalleras en los cuatro puntos requeridos, la lente elástica se sujeta a través de unos prisioneros que se ensamblan con la cremallera y el cabo de la lente.

Para este prototipo se plantea utilizar el modelo de factibilidad MO4M, por consiguiente la solución al subproblema “Transmitir torque” sería por medio de un ensamble directo entre el eje del motor y el engrane que mueve a la cremallera por cada punto requerido del borde de la lente, desde ahora se nombrará a este prototipo como MO4MP1 con el fin de simplificar la lectura y hacer referencia a las características del modelo de factibilidad técnica mencionado en la sección 3.2 de este capítulo, adicionalmente, la nomenclatura P1 remite a la letra inicial de la palabra; prototipo y el número uno a la secuencia de los prototipos.

Basándose en los requerimientos finales, se tiene que la longitud mínima que un punto específico del borde debe recorrer sea de 1.5 mm hacia el centro de la lente y de 1.5 mm en dirección opuesta al centro de esta misma, indiferentemente que sea en el eje Xs o en el eje Ys, utilizar una cremallera para hacer esta labor tiene como beneficio la utilización de menos elementos mecánicos, esto conlleva a ocupar menos espacio y puede reducir los costos de manufacturar el prototipo.

La Figura 3.20 (a) presenta la idea de como diseñar la lente adhiriendo a ella unos cabos, mientras que los cilindros que están debajo de los cabos contemplan el volumen de los engranes que moverán las cremalleras,

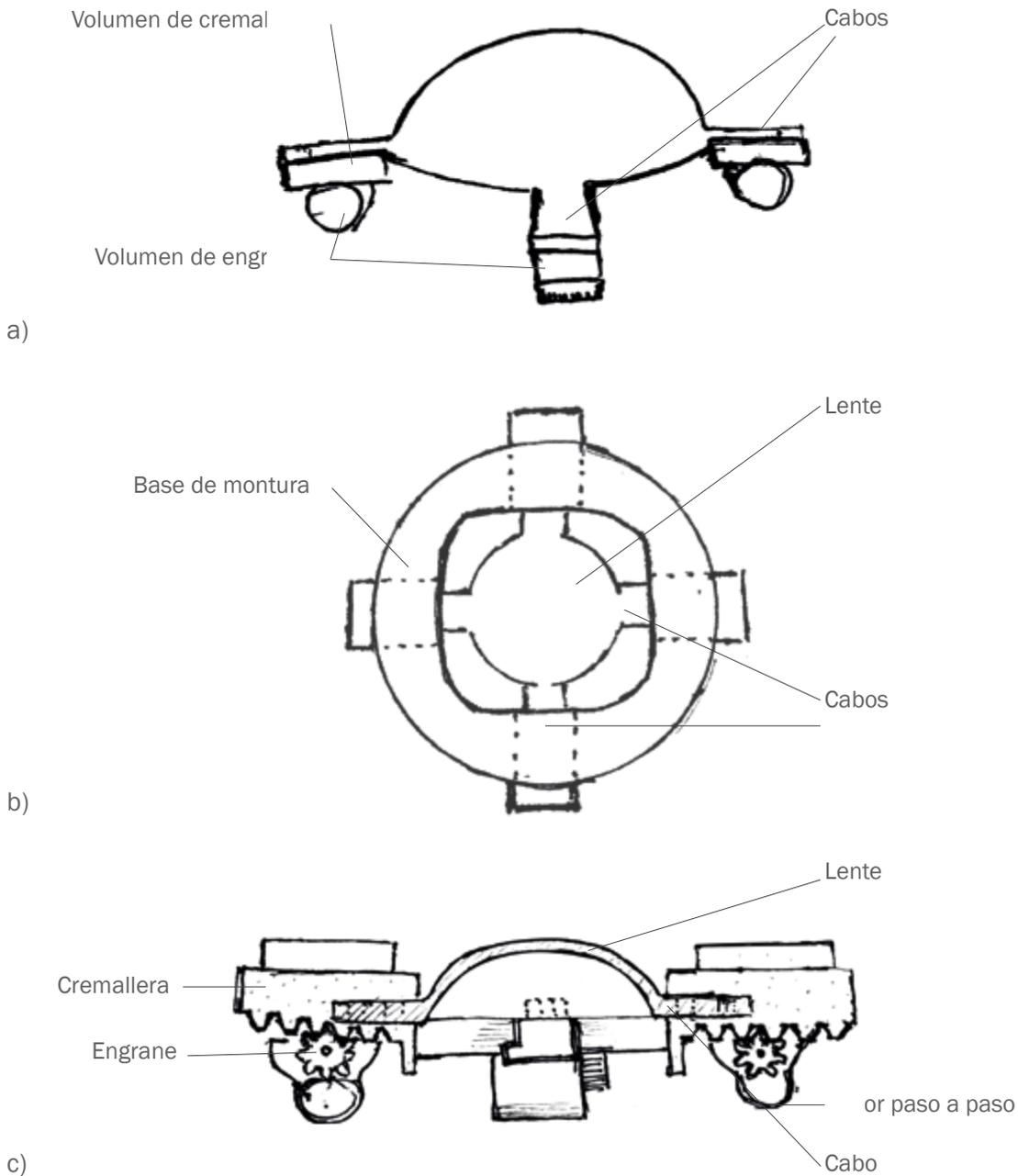


Figura 3.20. Bocetos del prototipo M04MP1.

una idea más clara de esto está en el inciso (c) de esta misma figura, que ilustra un corte transversal del optomecanismo, mientras que el inciso (b) muestra la montura desde la vista superior.

La Figura 3.21 muestra una versión alterna del prototipo M04M1P, este utiliza como base un cilindro al que se le agregaron unas rampas en la parte inferior que funcionan como unos rieles para el ensamble del cabo

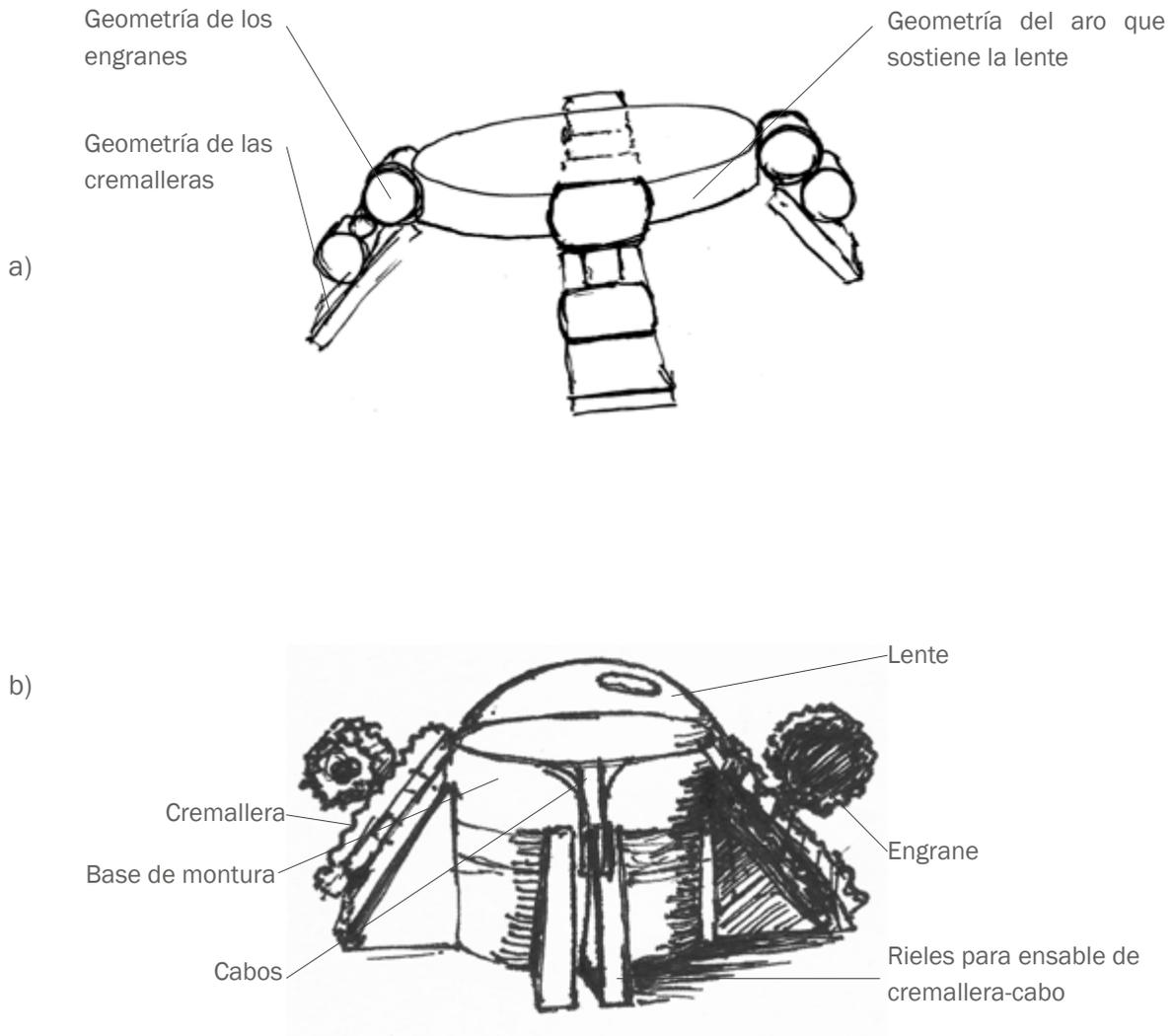
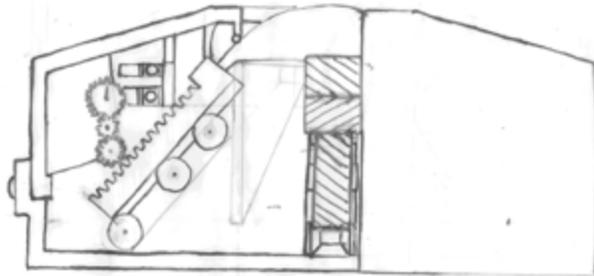


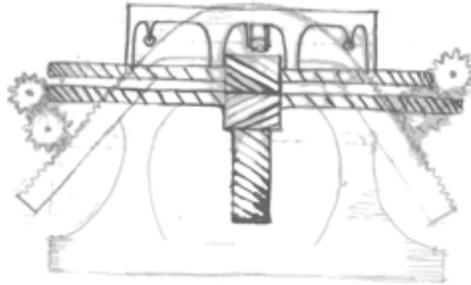
Figura 3.21. Bocetos del prototipo MO4MP2.

de la lente con la cremallera, por encima de dicho ensamble se encuentran los engranes, de igual forma, la transmisión del torque se resuelve mediante un ensamble directo entre un motor paso a paso y un engrane. El inciso (a) de esta figura muestra la estructura del funcionamiento del optomecanismo mientras que el inciso (b) ilustra el diseño de la base en conjunto de la lente, cremallera y engrane, en el siguiente capítulo se expone el desarrollo de este prototipo.

El prototipo MO2MP3 de la Figura 3.22, 3.23 y 3.24 es un poco más complejo, pese a que la configuración de la transmisión del torque de un motor, tiene que distribuir el movimiento a dos puntos opuestos sobre el borde de la lente y simultáneamente tiene que transmitir este movimiento



a)



b)

Figura 3.22. Bocetos del prototipo MO2MP3.

a dos cremalleras en la misma dirección, ya sea hacia el centro o a la periferia de la lente.

Frente a lo planteado en el párrafo anterior, una posible solución que este concepto adopta es el uso de engranes con ángulo de hélice a 45° , de esta manera el eje de torque del motor transmite el movimiento a un eje perpendicular a este, así el sistema de engranaje puede cambiar su

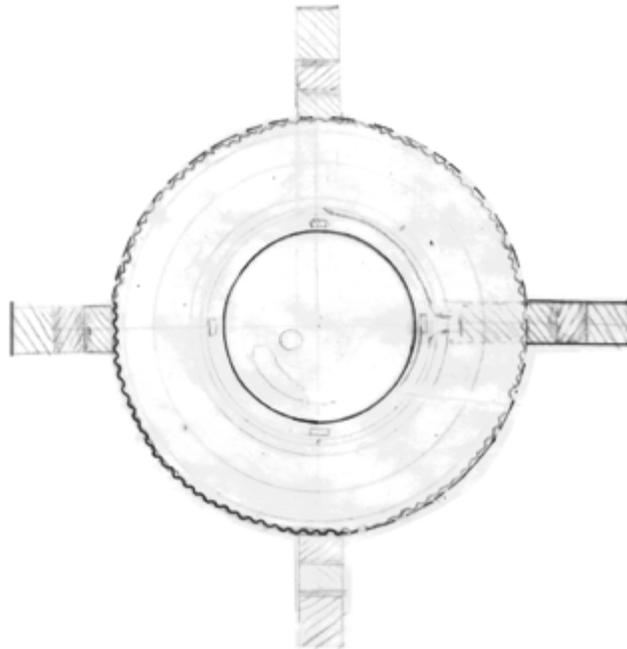


Figura 3.23. Bocetos del prototipo M02MP3.

dirección según sea necesario cambiando el ángulo de hélice de la cremallera o engrane, la Figura 3.22 (a) muestra esta idea por medio de un corte sobre la montura ilustrada, en su interior se puede ver el sistema de engranaje mencionado, mientras que en el inciso (b) se muestra este mismo sistema aislado de la cúpula que sostiene el optomecanismo.

La Figura 3.23 ilustra la vista superior del modelo, el círculo de mayor diámetro representa el engrane que transmite la carga hacia el par de cremalleras opuestas, con la diferencia que a una de estas se suma un engrane loco para que la cremallera se mueva en la misma dirección que la otra con respecto al centro de la lente.

Por otra parte, el modo de sujeción de la lente es semejante al presentado en la Figura 3.19, se han agregado otros elementos como unos prisioneros que auxilian la función de desmontar la lente, además la geometría en la parte inferior de la cremallera tiene un perfil trapecoidal que en conjunto con unos rodillos facilitan el deslizamiento de esta componente.

La Figura 3.24 (a) presenta el diseño de la punta del cabo de la lente, sostenido por una celda cuya base tiene tres orificios a los que se ha fijado la cremallera, en tanto que el inciso (b) muestra el ensamble de la celda con una tapa con tres prisioneros rectangulares que se embonan con su contraparte.

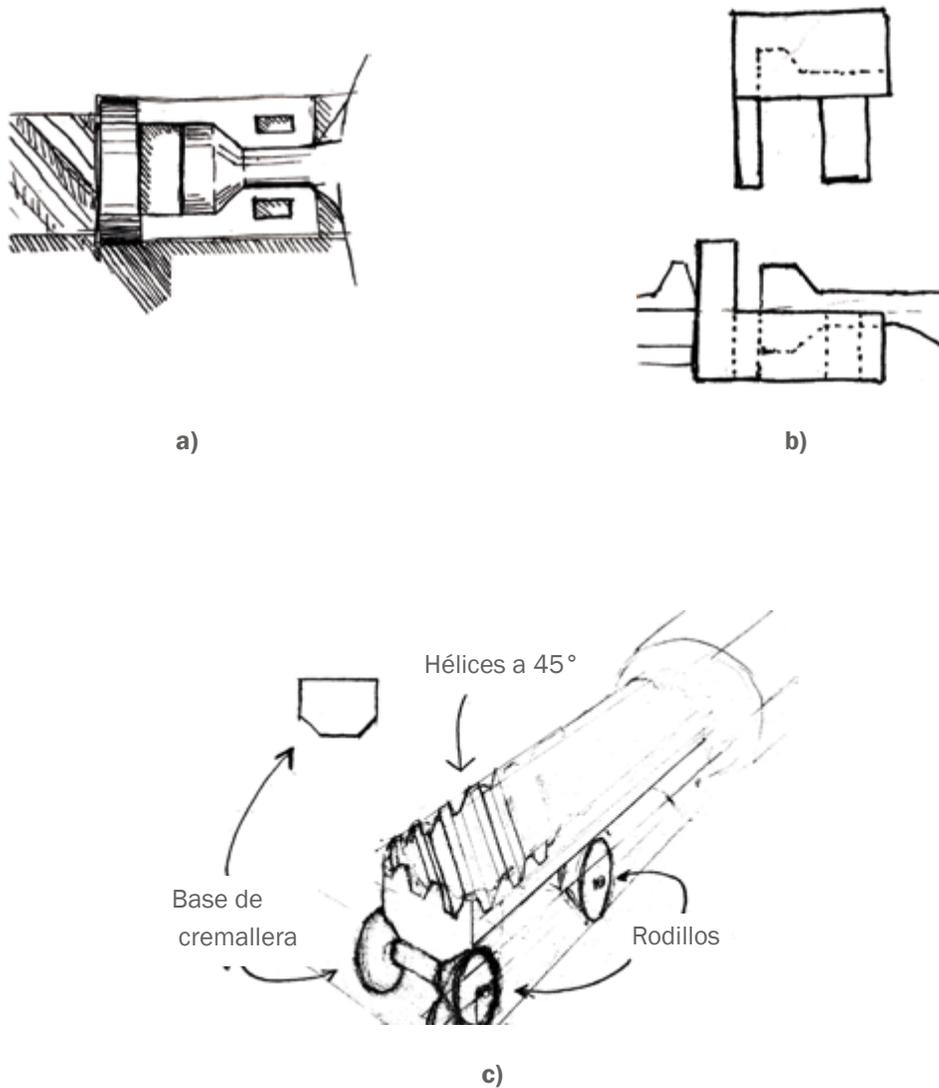


Figura 3.24. Bocetos del ensamble cabo-cremallera del prototipo MO2MP3.

Ilustrada en perspectiva, la Figura 3.24 (c) muestra el diseño del perfil de la cremallera en conjunto con los rodillos.

El siguiente capítulo explica el desarrollo y el análisis estático de estos tres prototipos, de modo que se tenga suficiente información de cada uno para elegir la propuesta más eficiente.

Capítulo 4

Diseño de detalle

4.1 Prototipos y pruebas

A continuación se presenta el desarrollo de las propuestas hechas a mano alzada que fueron elegidas en el capítulo anterior con la ayuda de investigadores en óptica y futuros usuarios de la montura. Combinando las opiniones de los integrantes del proyecto sobre cada asunto que sea parte del desarrollo del producto, se tendrá que el valor de una idea debería resultar en mejores estimaciones que las realizadas por un solo individuo (Girotra, Terwiesch, & Ulrich, 2010).

Prototipo M04MP1

El diseño de la primer montura busca la reducción del espacio ocupado por el optomecanismo, esto a través de la adición mínima de material sobre el borde de la lente. Cuatro cabos o extensiones fueron agregadas sobre el perímetro en el extremo de la lente, distribuidos proporcionalmente según la ubicación correspondiente, el diseño de estos elementos tiene el propósito de ser utilizado para la sujeción de la superficie esférica al mecanismo que introducirá los esfuerzos mecánicos.

La Figura 4.1 muestra el prototipo de la lente en perspectiva, los cabos tienen una perforación que está dispuesta para que un prisionero ocupe el lugar de la cavidad. El modelo ensamblado se puede observar en la Figura 4.2, de arriba hacia abajo se presenta; la vista superior del modelo ensamblado, seguido de esta se muestra un corte transversal del modelo que plantea el sistema engrane-cremallera, y finalmente se muestra la vista inferior del optomecanismo.

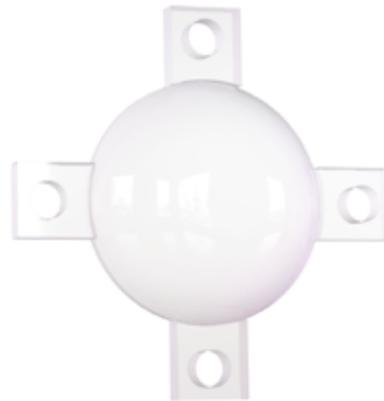
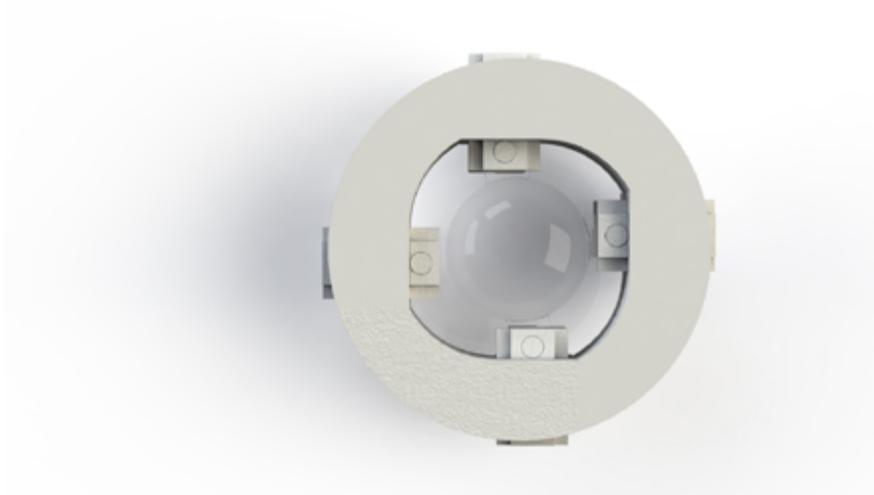
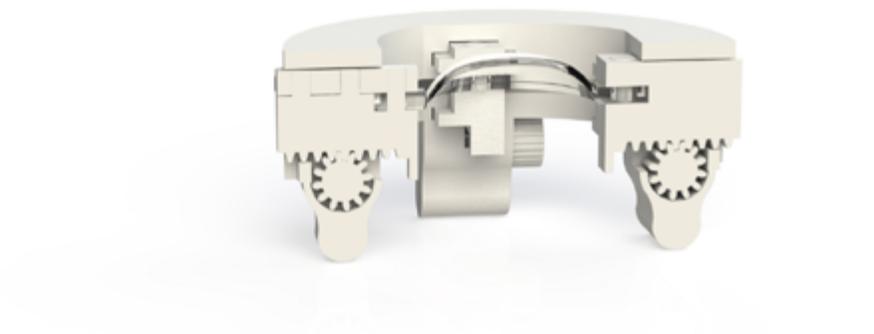


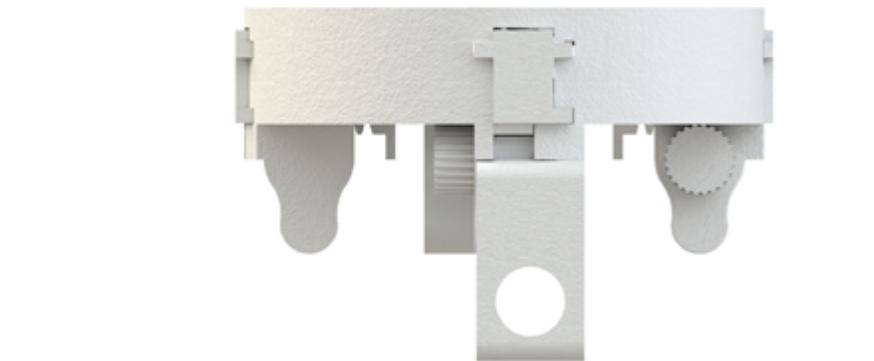
Figura 4.1. Lente del prototipo M02MP1.



a)



b)



c)

Figura 4.2. Prototipo MO2MP1, (a) vista superior, (b) corte transversal, (c) vista inferior.

Para colocar el optomecanismo a un poste convencional como los presentados en la Figura 3.9 del capítulo anterior, allí se encuentra un orificio para ser adaptado a un perno M6.

La Figura 4.3 ilustra el optomecanismo en perspectiva en forma explosiva, con el motivo de mostrar cada parte del mecanismo, este modelo fue diseñado de forma modular y todos los elementos tienen una cara plana que ayuda al resto de la pieza a sostenerse sobre la plancha de una impresora 3D, lo que asegura una correcta impresión de la pieza.



Figura 4.3. Explosivo del prototipo MO2MP1.

En la Figura 4.4 se muestran las dimensiones del optomecanismo, el volumen calculado de este modelo es de 2.78 cm^3 sin los motores, cifra muy por debajo del volumen de los optomecanismos presentados en el capítulo 3, el MO4MP1 es un modelo compacto que posibilita la interacción con otro tipo de monturas optomecánicas u otro tipo de lentes a distancias más cortas según la longitud entre el centro óptico de la lente y el punto focal de esta, de este modo en combinación con otras lentes el rango de posicionamiento de otra montura sobre algún plano paralelo a la cubierta óptica universal es más amplio.

Otra ventaja clara es el ahorro del material de impresión, sin embargo, entre más pequeña sea la montura cambiar la lente resultará una tarea más compleja por las limitaciones de espacio que existen para maniobrar dicha operación.

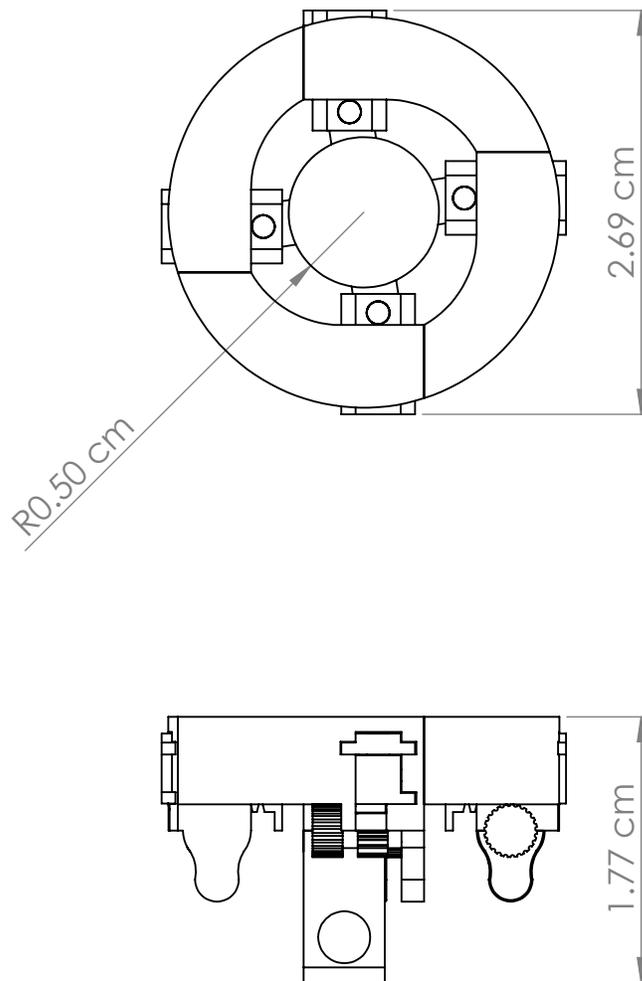


Figura 4.4. Dimensiones del prototipo MO2MP1.

Por otro lado, el análisis estático de la lente con las condiciones de desplazamiento deseadas en los cuatro cabos, mostró una geometría totalmente atípica con respecto a las deformaciones naturales en la córnea humana que corresponden a las aberraciones ópticas de bajo orden.

La Tabla 4.1 presenta las propiedades del PDMS según un consenso de tres fuentes; (Kuo, 1999). (Santiago-Alvarado, 2009) y (García J. M., 2019).

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas del PDMS.

Propiedades mecánicas del PDMS		
Tipo: Isotrópico elástico lineal		
Propiedades	Unidades	Cantidad
Límite elástico	N/m ²	700000
Límite de tracción	N/m ²	1900000
Módulo elástico	N/m ²	950000
Coefficiente de Poisson	cte.	0.48
Densidad de masa	kg /m ³	982
Módulo cortante	N/m ²	310000

Los parámetros anteriores fueron utilizados para el resto de los análisis estáticos de lentes de PDMS contenidos en este capítulo, esto como medida comparativa del funcionamiento del diseño de los tres modelos desarrollados. Adicionalmente, las características del mallado para la ejecución del análisis de elemento finito son similares en los tres casos, el tamaño de los elementos para algunos casos varía por 0.1 mm, debido a algunas restricciones del software empleado que impedía la ejecución de dicho análisis, no obstante, el número de elementos varía según el tamaño de la pieza.

La Tabla 4.2 presenta los datos del mallado de esta lente, mientras que la Figura 4.5 muestra gráficamente la malla utilizada para los estudios de la lente del modelo M04MP1.

Tabla 4.2. Parámetros del mallado M04MP1.

Mallado de lente M04MP1		
Propiedades	Unidades	Cantidad
Puntos jacobianos	puntos	4
Tamaño de elementos	mm.	0.2
Tolerancia	mm.	0.01
Número total de nodos	cte.	100646
Número total de elementos	cte.	62421

El análisis estático realizado por medio de un software encargado de hacer los análisis de elemento finito, tuvo ciertas limitantes en los tres modelos planteados, debido a la complejidad de la geometría de algunas componentes del ensamble y el número de componentes, por consecuencia, el número de elementos y nodos aumenta, así también, la probabilidad de errores de redondeo y de truncamiento asociados con el proceso numérico.

Por esta razón, se simplificó el análisis generando las mismas condiciones de movimiento que la lente tendría estando montada en el optomecanismo.

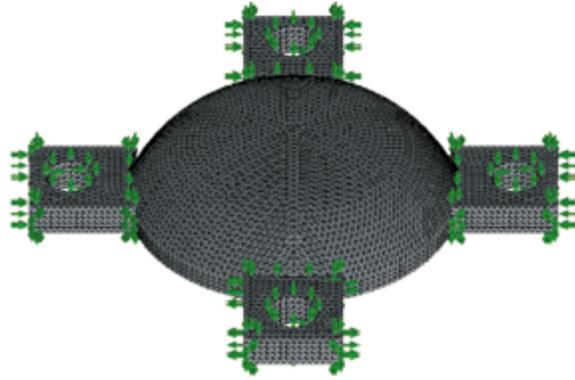


Figura 4.5. Mallado de la lente para MO4MP1.

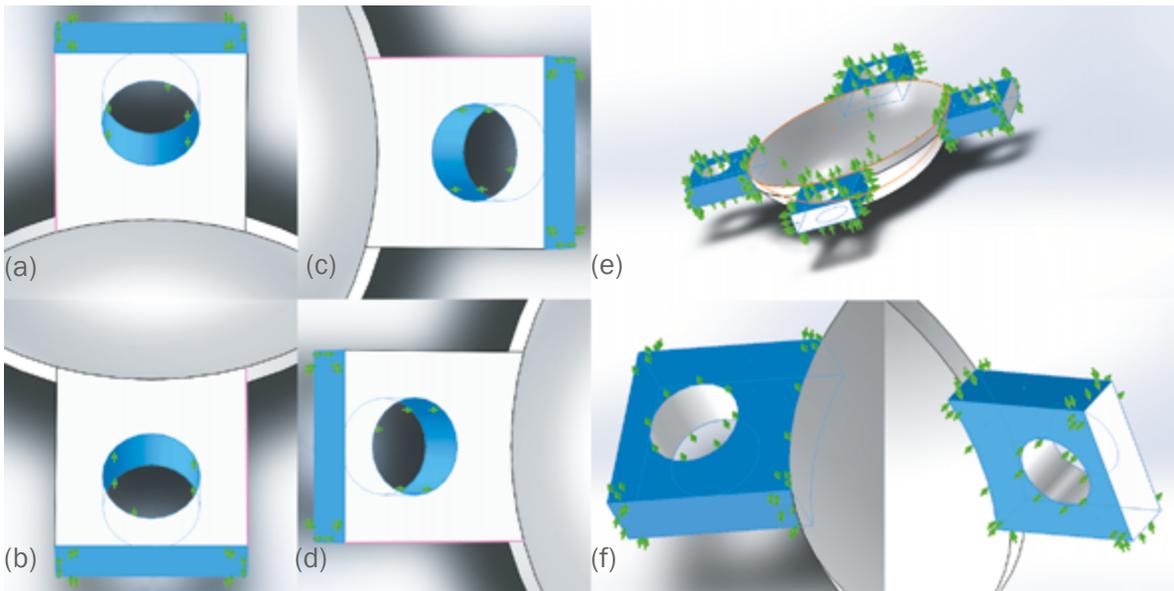


Figura 4.6. Sujeciones y deslizamientos de la lente.

La Figura 4.6 (a), (b), c) y (d) presenta en perspectiva las caras del modelo iluminadas en color azul, a las que se han asignado un desplazamiento de 1.5 mm en dirección al centro geométrico de la lente, por otro lado, el inciso (e) enseña las caras del modelo que están bajo la condición de control de deslizamiento y sujeción. La Figura 4.6 (f) muestra en color azul dos caras de un cabo de la lente bajo la disposición de dicho deslizamiento preinscrito, mientras que el inciso (g) enseña la adición de dos caras en mismo cabo pero visto de lado opuesto, cabe señalar que los otros tres cabos restantes tienen mismo arreglo para la simulación.

Los resultados arrojados del análisis demuestran que el modelo MP4MP1 es capaz de modificar la curvatura de la lente, en parte, gracias al diseño de la sujeción y debido a que los bordes de la lente donde no ocupan espacio los cabos son las partes más delgadas del modelo, está característica no sería posible de no ser por propiedades mecánicas del PDMS, por lo tanto, esta característica en el diseño de la lente podría resultar riesgosa debido a la dilatación presentada por el tratamiento térmico en el curado del PDMS, las paredes verticales de los cabos representan un riesgo de atascamiento en el momento de desmoldarse.

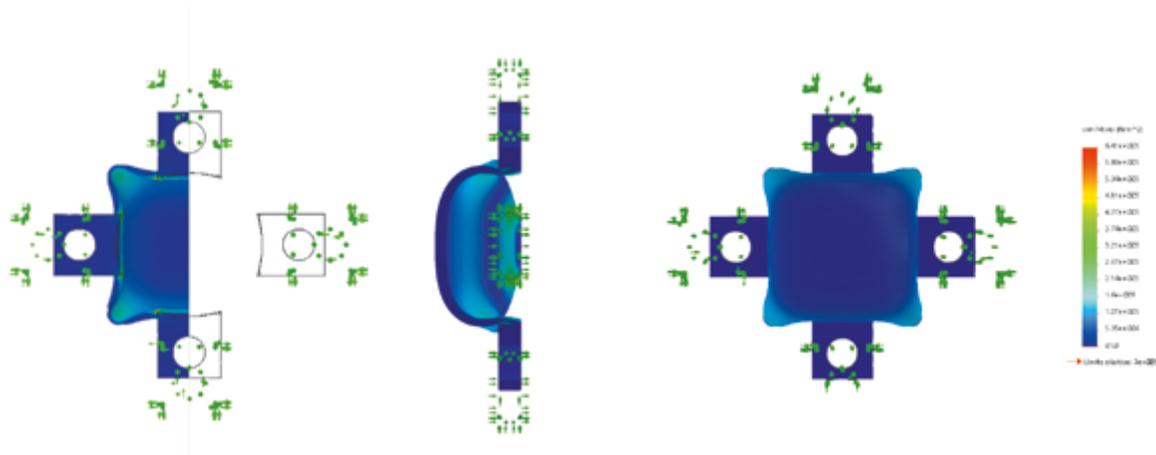


Figura 4.7. Primer análisis de tensión MO4MP1.

La Figura 4.7 muestra el análisis de tensiones en la superficie esférica, de derecha a izquierda se tiene en primer lugar un corte del modelo visto desde la parte posterior, después se muestra este mismo corte desde la vista lateral derecha, enseguida está el modelo completo desde la vista frontal y finalmente, una escala cromática que indica el nivel de tensión en el prototipo.



Figura 4.8. Primer análisis de desplazamiento MO4MP1.

La Figura 4.8 muestra el análisis de desplazamiento del prototipo, se puede observar el desplazamiento en milímetros, entre más sean las áreas de desplazamiento en la curvatura de la lente más se estará cambiando la dirección de los rayos incidentes, este estudio es crucial para la elección del modelo a desarrollar.

En la figura 4.9 se muestra en perspectiva y en la vista posterior en corte un análisis de deformaciones unitarias del modelo, los elementos del mayado son iluminados uniformemente según la magnitud de su deformación unitaria, los elementos en rojo son los de mayor magnitud, estos elementos coinciden con las áreas de mayor tensión en el prototipo.

Se ejecutó otro estudio pero esta vez la dirección del desplazamiento fue linealmente opuesta a 1.5 mm desde la lente en reposo. La Figura 4. 10 (a) muestra en perspectiva y vista frontal un nuevo aná-

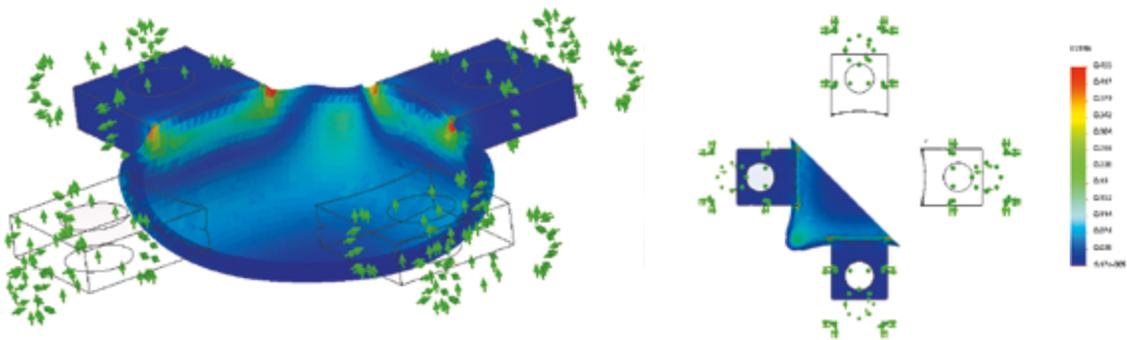


Figura 4.9. Primer análisis de deformaciones unitarias MO4MP1.

lisis de tensiones, se puede observar que la lente llega a estirarse tanto que aparentemente toma la forma de una lámina ligeramente curvada, las áreas de mayor tensión y conflicto con su funcionamiento nuevamente son los bordes del cabo de la lente que colindan con la superficie esférica, estos espacios pueden distinguirse por rebasar el límite de elasticidad iluminado en color amarillo y rojo.

El análisis de desplazamientos ilustrado en la Figura 4.10 (b), muestra que el centro de la lente es el más afectado en el cambio de curvatura, de modo opuesto la zona que menos se movió, fue el borde de la superficie esférica donde no ocupan lugar los cabos.

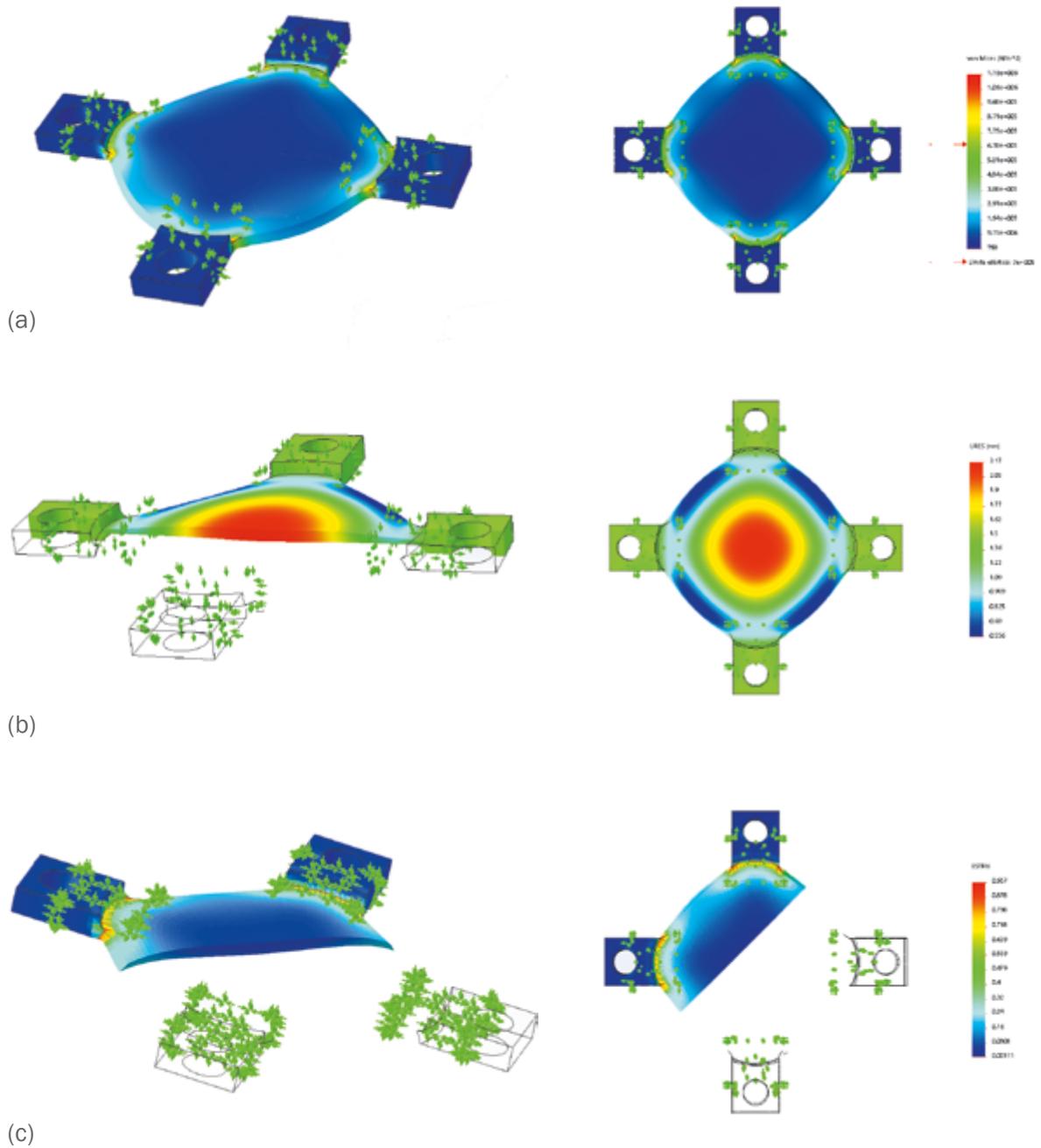


Figura 4.10. Segundo análisis estático MO4MP1: (a) tensión, (b) desplazamiento, (c) deformaciones unitarias.

Posteriormente, en la Figura 4.10 (c) se pueden observar las deformaciones unitarias mediante un corte en perspectiva y en vista posterior, nuevamente los elementos en color rojo coinciden en posición con el estudio anterior (ver Figura 4.9).

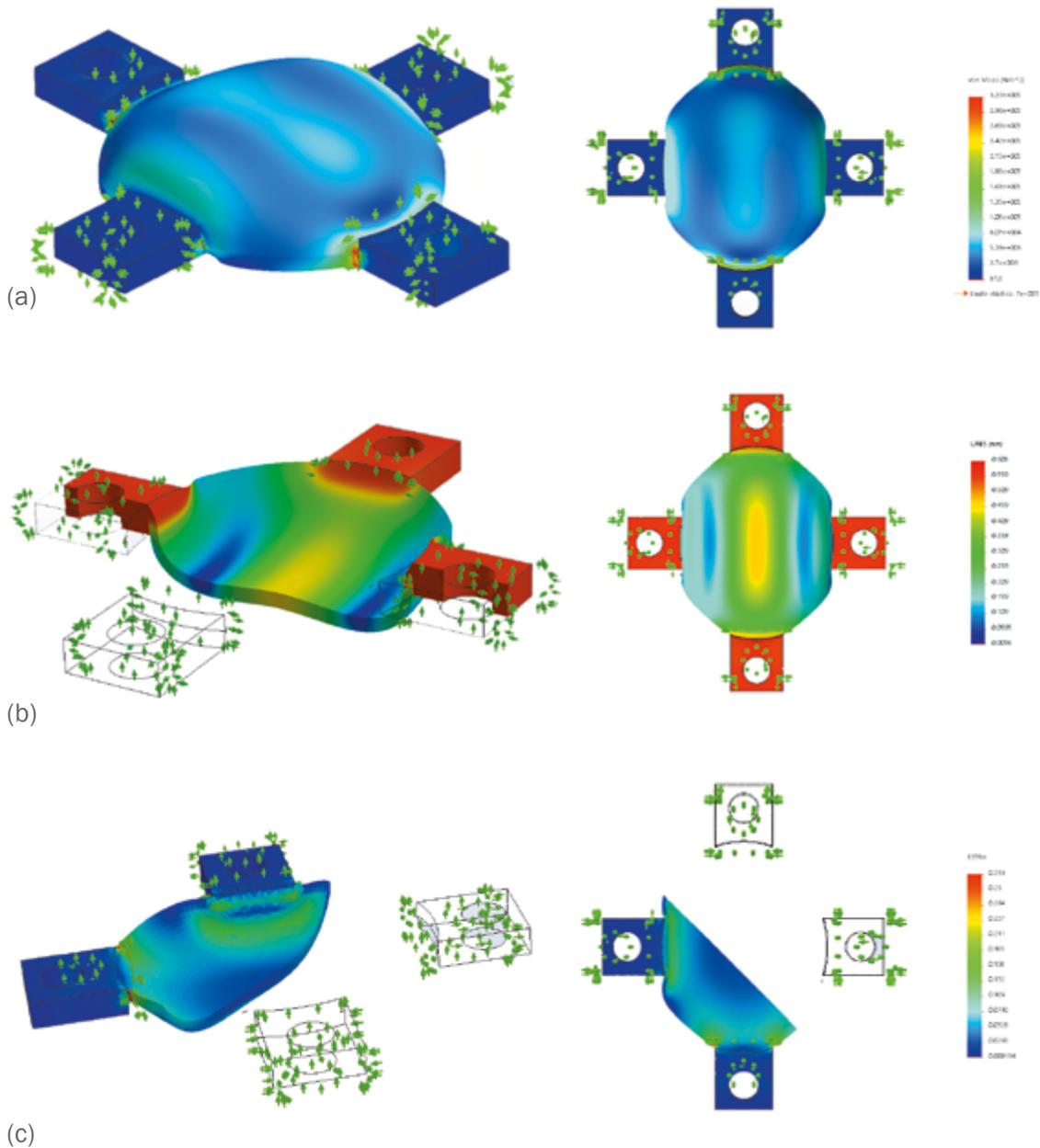


Figura 4.11. Tercer análisis estático MO4MP1: (a) tensión, (b) desplazamiento, (c) deformaciones unitarias.

Finalmente, en la Figura 4.11 se muestra el análisis estático bajo la condición de tener dos cabos opuestos desplazándose a 1.5 mm en dirección hacia el centro geométrico de la lente y dos cabos desplazándose 1.5 mm hacia el lado opuesto a este, en el inciso (a) de la figura se muestran las tensiones en la lente, en el (b) los desplazamientos y en el (c) las deformaciones unitarias.

Prototipo M04MP2

Este modelo adapta el eje de desplazamiento de los cabos a la tangente de un punto último sobre el borde de la lente, esto se puede ver también como la tangente proveniente del final de la curvatura que da forma a la superficie esférica.

La Figura 4.12 muestra un nuevo modelo de sujeción de la lente, el cual, a través de la geometría del cabo busca corregir el problema en las tensiones formadas en los límites de los cuatro cabos colindantes a la lente.

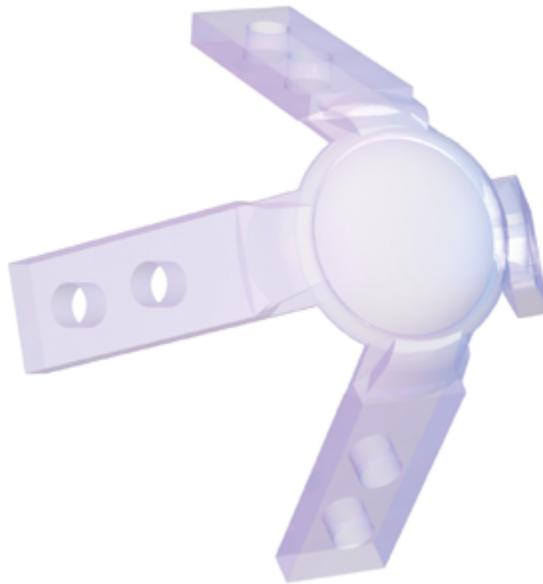


Figura 4.12. Lente con cabos del modelos M04MP2.

Basándose en las ideas de la Figura 3.21 y en la experiencia adquirida en el primer prototipo presentado en este capítulo, se consiguió plantear un nuevo prototipo que, además de tener una dirección diferente en el movimiento lineal de los cabos, también pudiese superar los resultados de la propuesta anterior en términos de la resistencia a la tensión, el desplazamiento y la deformación unitaria.

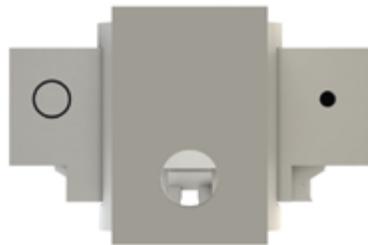
La Figura 4.13, muestra en orden descendente la vista superior frontal e inferior de una segunda propuesta de opmecanismo, el cual, funciona a partir de dos prisioneros en donde se monta una cremallera por cada cabo. El ensamble cremallera-cabo se desliza a lo largo de un carril implementado en una base sobre la que descansa la superficie de PDMS, esta base tiene la función de conectar, por medio del mismo tipo de interfase a otras componentes con una geometría repetitiva.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.13. Modelo MO4MP2: (a) vista superior, (b) vista frontal y (c) vista inferior.

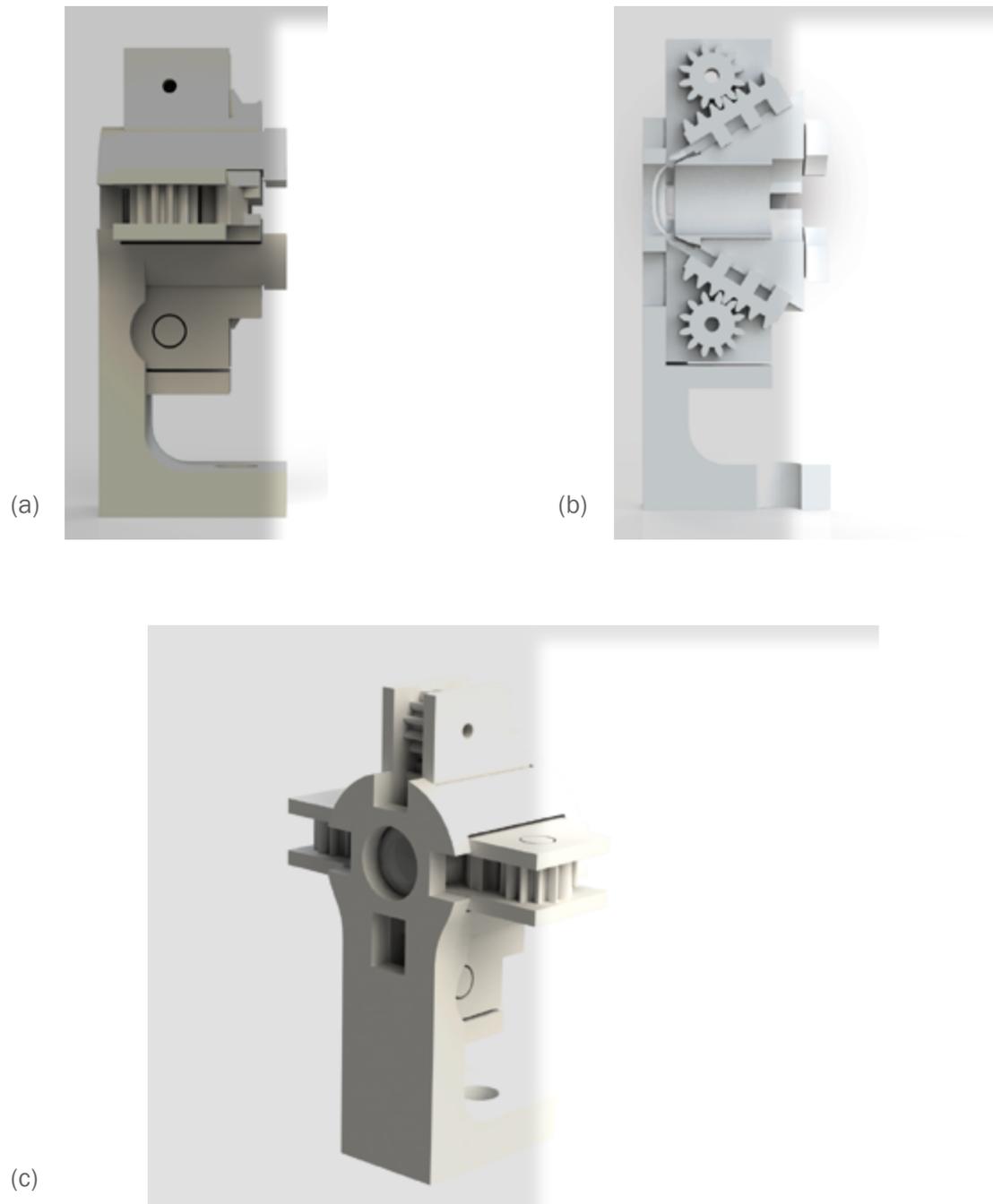


Figura 4.14. Modelo MO4MP2: (a) vista lateral, (b) corte longitudinal y (c) vista en perspectiva.

En la figura 4.14, en la parte superior izquierda se encuentra la vista lateral del modelo, a la derecha un corte longitudinal del ensamble que muestra el ensamble cremallera-cabo y en la parte inferior de la figura se puede observar el modelo MO4MP1 en perspectiva.

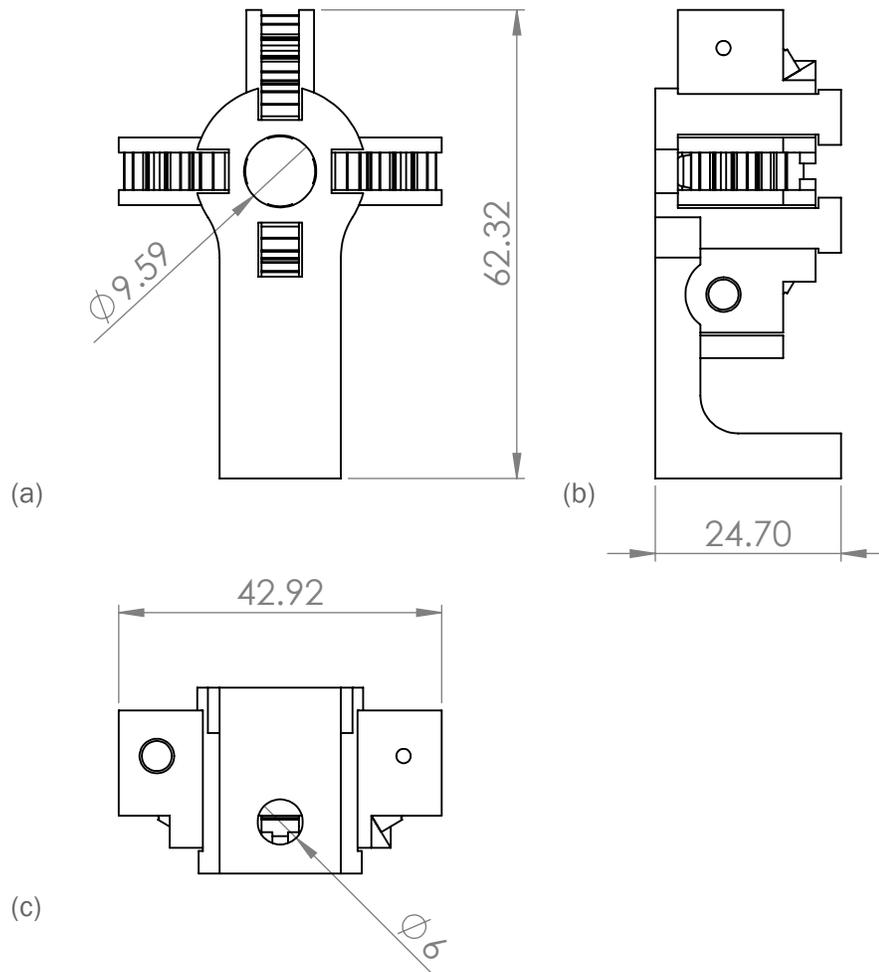


Figura 4.15. Dimensiones del modelo MO4MP2: (a) vista frontal, (b) vista lateral y (c) vista inferior.

El prototipo cuenta con 15 piezas, un bastidor que se une a un poste convencional, cuatro piñones, cuatro cremalleras, cuatro soportes en forma de L, una lente con cabos y una base sobre la que se desliza cada cremallera.

Las dimensiones generales del modelo están descritas en la Figura 4.15, en la vista inferior del modelo aparece un diámetro de 6 mm, medida correspondiente al perno M6 que se sujeta al poste sobre el que estará montado.

Este prototipo sin la implementación de los motores cuenta con una superficie total de 165.84 cm², mientras que el volumen es de 14.59 cm³ y pesa aproximadamente 14.9 gramos.

La Figura 4.16 (a) muestra dos perforaciones sobre un cabo, ahí se asignó la carga mecánica transmitida de la cremallera, esta condición se aplica para las cuatro extremidades. En el inciso (b) de la figura se muestra la sujeción tipo control deslizante aplicado a las cuatro paredes de cada cabo, esto se puede observar en el inciso (c) de la siguiente figura.

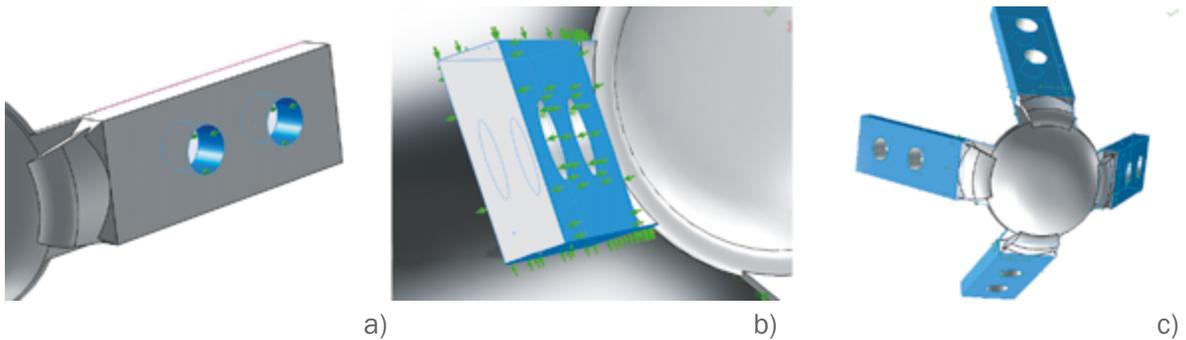


Figura 4.16. Sujeciones y deslizamientos de la lente MO4MP2. (a) carga mediante los prisioneros, (b) sujeción por las cuatro paredes de un cabo, (c) sujeción en los cuatro cabos.

Los parámetros del mallado que se usaron para las tres simulaciones, están descritas en la Tabla 4.3, la primera simulación llevará consigo desplazamientos de 1.5 mm en los cuatro elementos de sujeción con dirección hacia el centro geométrico de la lente, el segundo análisis hace lo mismo, pero en dirección inversa, es decir, tira en vez de empujar las extremidades, y el tercer análisis estático es una mezcla entre la primera y segunda simulación, por lo cual, dos cabos simétricamente opuestos empujan la lente 1.5 mm hacia el centro, mientras que los dos cabos restantes tiran de la lente 1.5 mm en dirección contraria. Adicionalmente, la Figura 4.17 muestra el mallado del modelo en perspectiva.

En cuanto al material, se estableció para los tres análisis las mismas características del PDMS, esto también aplica para la propuesta del modelo MO2MP1, que se presentará en este capítulo, dichas características se localizan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.3. Parámetros de mallado MO4MP2.

Mallado de lente MO4MP2		
Propiedades	Unidades	Cantidad
Puntos jacobianos	cte.	4
Tamaño de elementos	mm.	0.3
Tolerancia	mm.	0.015
Número total de nodos	cte.	176274
Número total de elementos	cte.	113422



Figura 4.17. Mallado de la lente MO4MP2.

En la Figura 4.18 (a) se muestra el análisis de tensión, cabe resaltar que hay una mejoría en la distribución de carga, puesto que se observan áreas más pequeñas en color rojo y mejor distribuidas en todo el modelo, donde la tensión es considerable pero no llega ni a la mitad del valor del límite elástico del PDMS.

En la misma figura, se puede observar que los desplazamientos requeridos en la lente son alcanzados con éxito gracias a que no existe una ruptura en el modelo mientras esto ocurre, en contraste, se observa que la lente se mueve un poco más de 1.5 mm pero el movimiento no logra transmitirse lo suficiente para deformar la lente como se pretende, esta razón puede entenderse mejor en el análisis de desplazamiento unitario que muestra la Figura 4.18 (c).

Los resultados de la segunda simulación son similares a los de la primera, bajo la premisa de que la geometría de los cabos utilizados para tirar o empujar la lente se distribuyen y resisten eficientemente las cargas mecánicas. A pesar de ello, la intervención de esa carga en la curvatura de la lente es poco satisfactoria según los análisis de desplazamiento y de deformación unitaria que se muestran en la Figura 4.19.

Por otra parte, los resultados arrojados en el tercer análisis estático que combina las direcciones de deslizamiento de los cabos, dos en dirección hacia el centro de la lente y dos en dirección contraria, presenta un comportamiento más eficaz comparado con los análisis mostrados

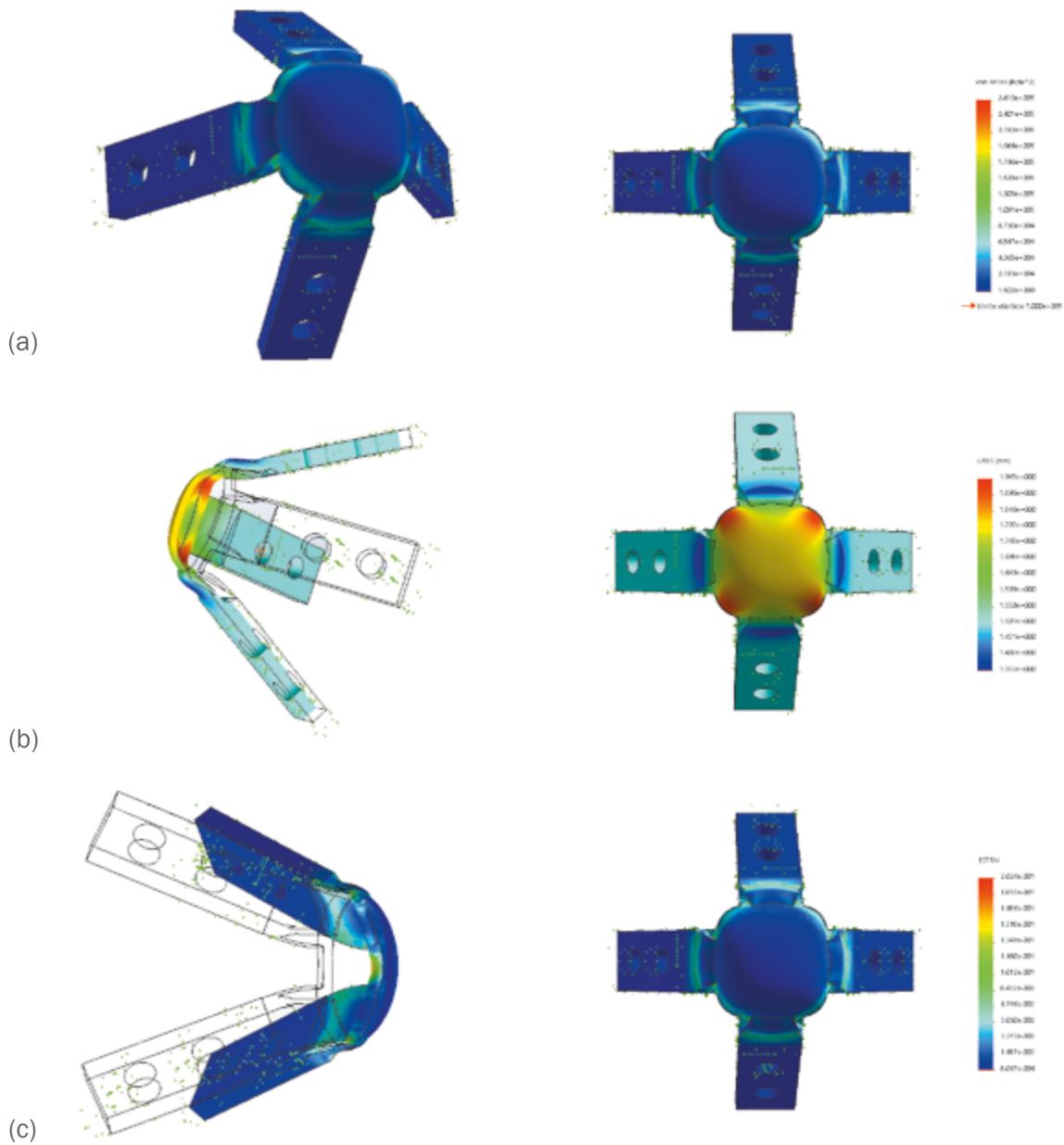
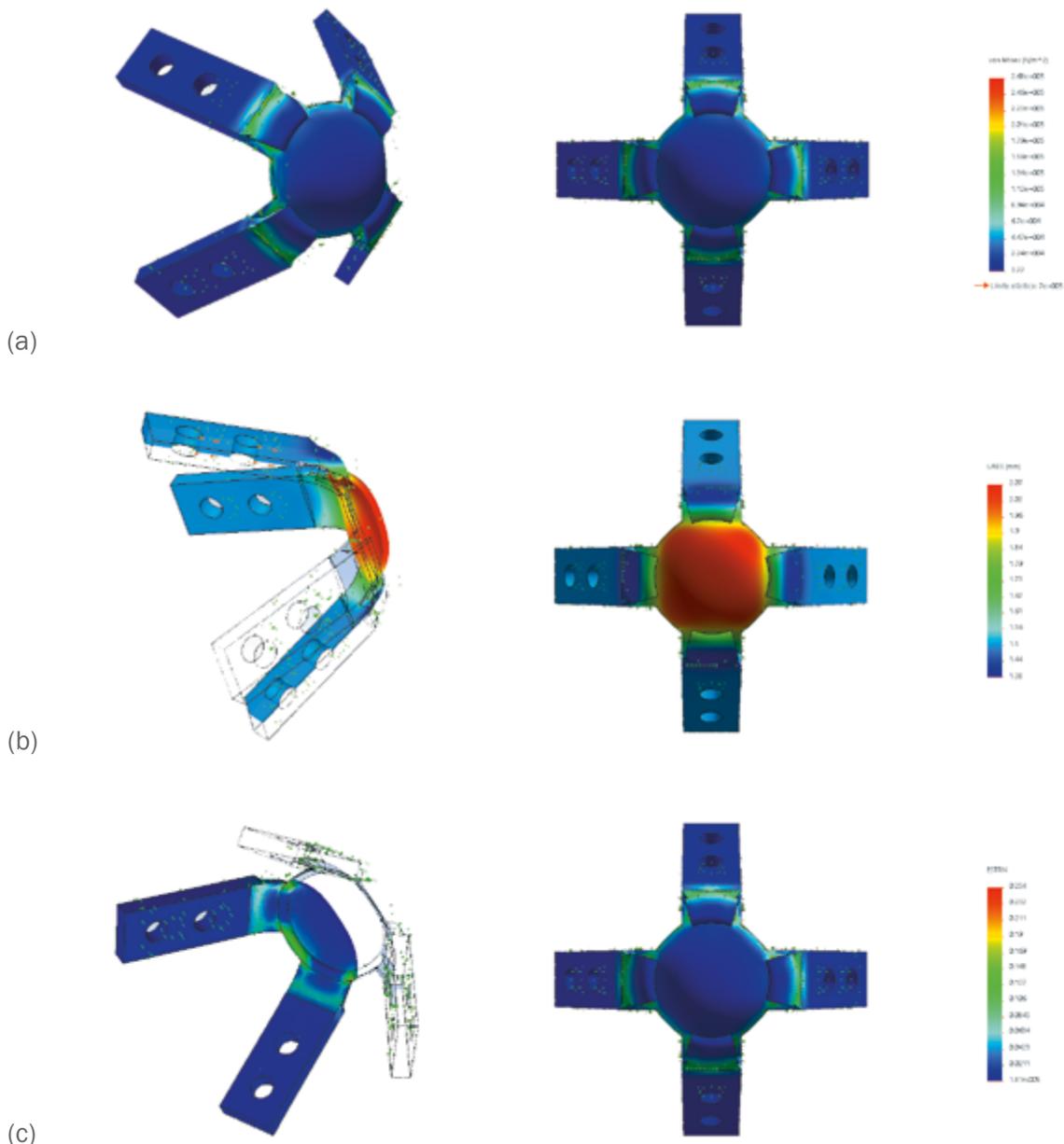


Figura 4.18. Primer análisis estático MO4MP2: (a) tensión, (b) desplazamiento, (c) deformaciones unitarias.

hasta este punto (véase la Figura 4.20), con lo cual, se suscitó una nueva idea para el desarrollo del tercer prototipo, el MO2MP1, esta idea consiste en que la lente no solo necesita una sujeción en cuatro puntos simétricos, es decir, no solo necesita los cuatro cabos sino que probablemente sea necesario agregar otros cuatro puntos de sujeción que auxilien el agarre de la lente y con este alcance una deformación similar al frente



de onda que se forma en las aberraciones de bajo orden mostradas en la Figura 1.9, por lo tanto, la información experimental del modelado de los dos primeros prototipos y los resultados arrojados en estos fueron fundamentales para alcanzar una deformación similar a la planteada en el primer capítulo.

Otra observación que se tiene, es que existe demasiada fuerza absorbida por el cabo antes de llegar a la superficie esférica, esto se debe a la amplia longitud que tiene el cabo sin ser sujeta, es más notorio en los dos primeros análisis de deformación unitaria de la lente del

Figura 4.19.
Segundo análisis
estático MO4MP2:
(a) tensión, (b)
desplazamiento,
(c) deformaciones
unitarias.

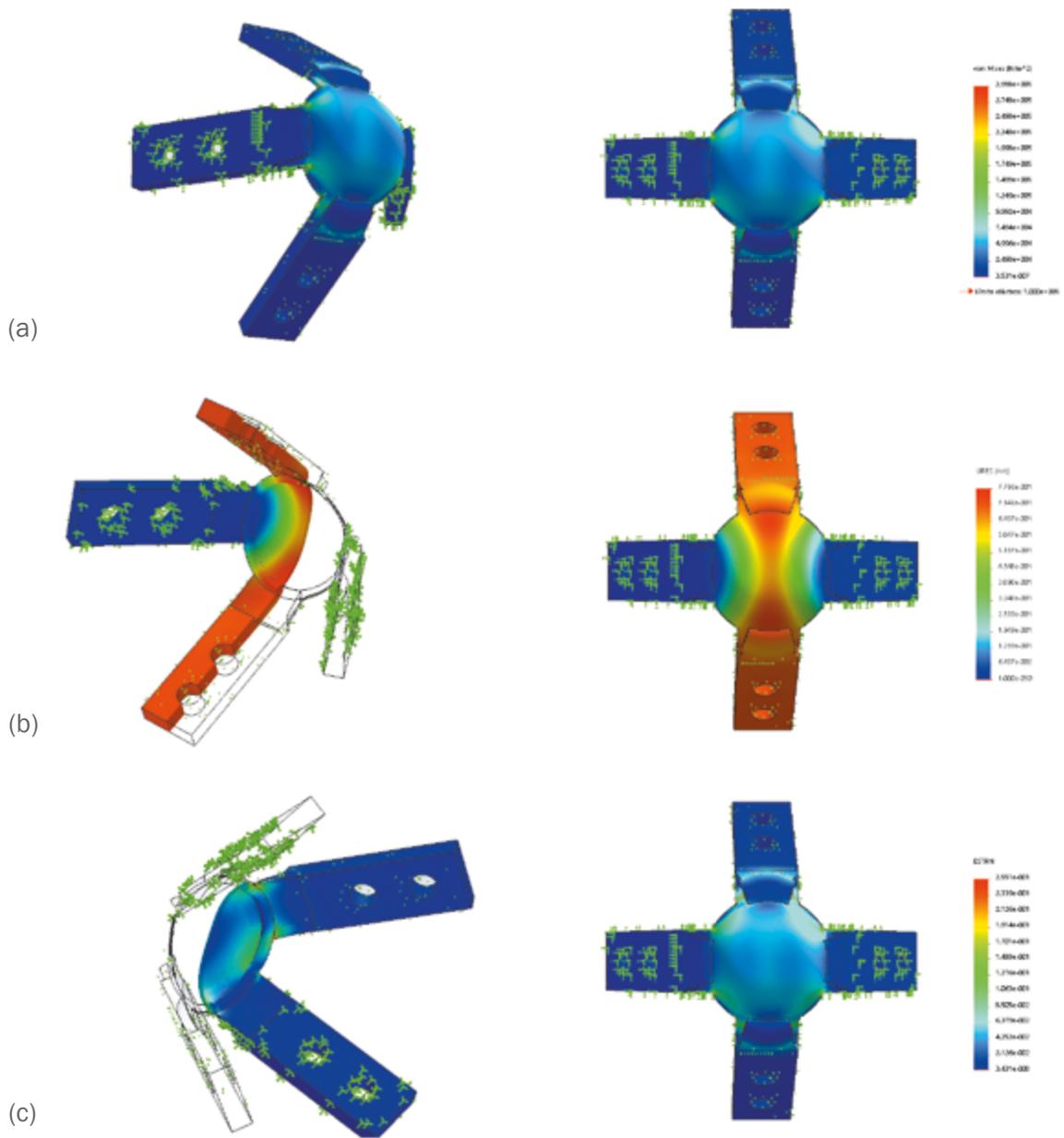


Figura 4.20. Segundo análisis estático MO4MP2: (a) tensión, (b) desplazamiento, (c) deformaciones unitarias.

modelo MO4MP2, donde el área iluminada en verde-azul se encuentra en el inicio de los cuatro cabos y al final de la sujeción, es decir, donde terminan las caras planas de los cabos se presenta la mayor deformación en todo el sistema.

En el análisis de deformación mostrado en la Figura 4.20 (c) ocurre una deficiencia de transmisión en los cabos que se dirigen hacia el centro de la lente, mientras que los otros dos cabos que tiran en dirección contraria transmiten mejor el desplazamiento sobre la superficie esférica.

Prototipo MO2MP1

Las características de este prototipo son un compendio de experiencias obtenidas en la realización de los prototipos MO4MP1 y MO4MP2, además que el nivel de complejidad para la realización de este nuevo modelo aumenta debido a que se plantea introducir las deformaciones a la lente a través de dos servomotores. Se pretende ver la funcionalidad de cada mecanismo y de las lentes antes de adaptarle algún actuador rotativo. Al final de este apartado se establece una comparación de las tres propuestas con la finalidad de elegir un modelo.

Adicionalmente, se establece un nuevo prototipo de lente, resultado de los análisis estáticos del prototipo MO4MP2. Este nuevo prototipo lleva consigo cuatro puntos de sujeción más; los cuatro cabos, y entre cada cabo un pequeño cordón cilíndrico en el borde de la lente distribuido de forma proporcional, el propósito de estos cuatro cordones es que guarden su posición en todo momento. La Figura 4.21 presenta el nuevo modelo con los cordones adicionales.

En la Figura 4.22 se muestra el tercer prototipo del optomecanismo llamado MO2MP1. Todo el modelo se sostiene mediante un bastidor que se conecta a un poste convencional con entrada M6 [véase el inciso (a) de la Figura 4.22].

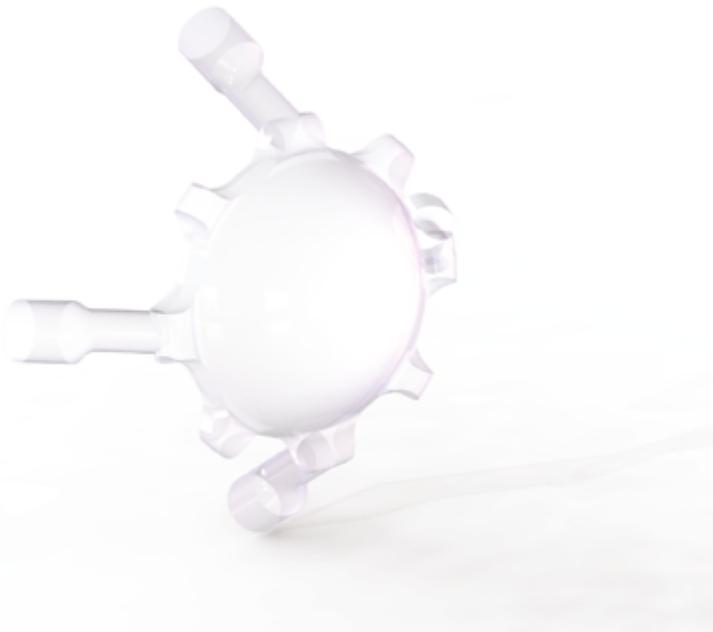
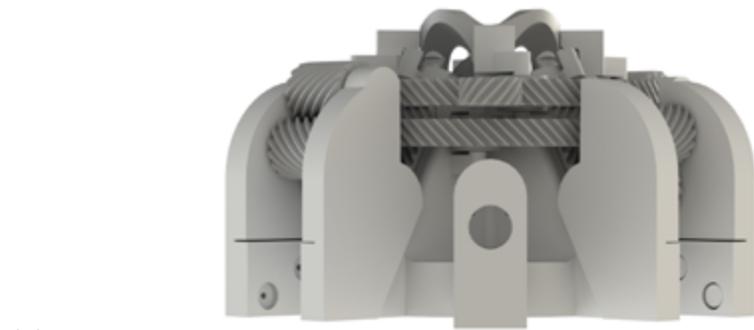
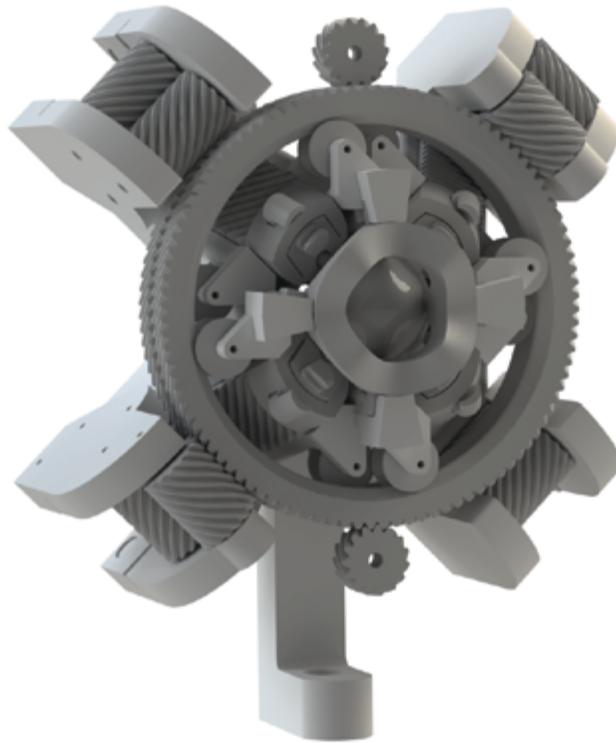


Figura 4.21. Lente para modelo MO2MP1.



(a)



(b)

Figura 4.22. Prototipo M02MP1: (a) vista inferior, (b) vista en perspectiva.

El prototipo cuenta con un sistema mecánico que transmiten la fuerza mediante un engrane helicoidal concéntrico a la lente, mismo que reparte la fuerza a dos puntos opuestos simétricos.

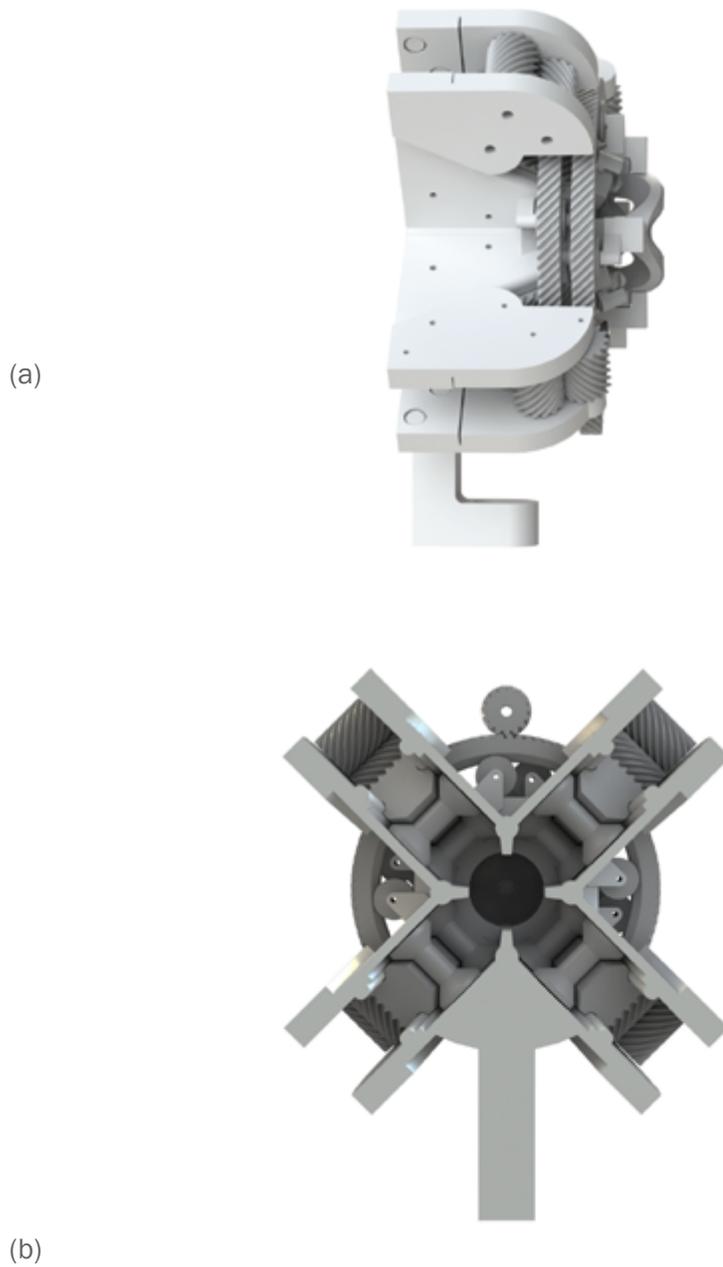


Figura 4.23. Prototipo M02MP1: (a) vista lateral (b) vista posterior.

En la Figura 4.23 se ilustra la vista lateral y trasera en orden descendente, se puede observar que debajo de los engranes hay cuatro perfiles trapezoidales que corresponden a la celda-cremallera donde los cabos de la lente quedan atrapados. El engrane suelto que se encuentra en lo más alto del prototipo establece el punto de transmisión.

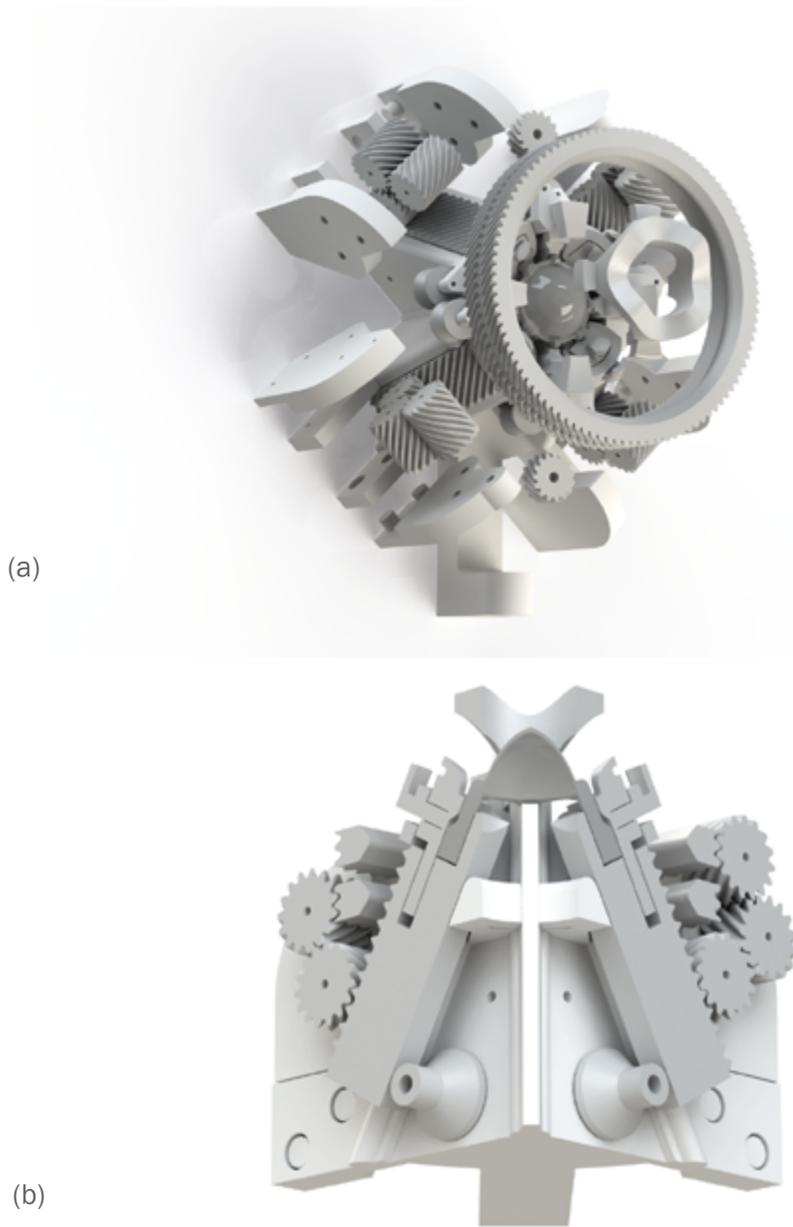


Figura 4.24. Prototipo MO2MP1: (a) vista explosionada (b) corte transversal.

La Figura 4.24 muestra la vista explosionada y de dos cortes formados por dos planos que atraviesan los puntos donde se ejerce la carga mecánica, de tal modo que se puede observar un par de cremalleras cortadas longitudinalmente y estas a su vez muestran el sistema de sujeción de lente mediante una celda.

Cabe señalar que este prototipo tiene una tapa con una apertura que sirve para detener la lente en contacto con los cordones adheridos al modelo en cuatro puntos simétricos del borde de la superficie esférica.

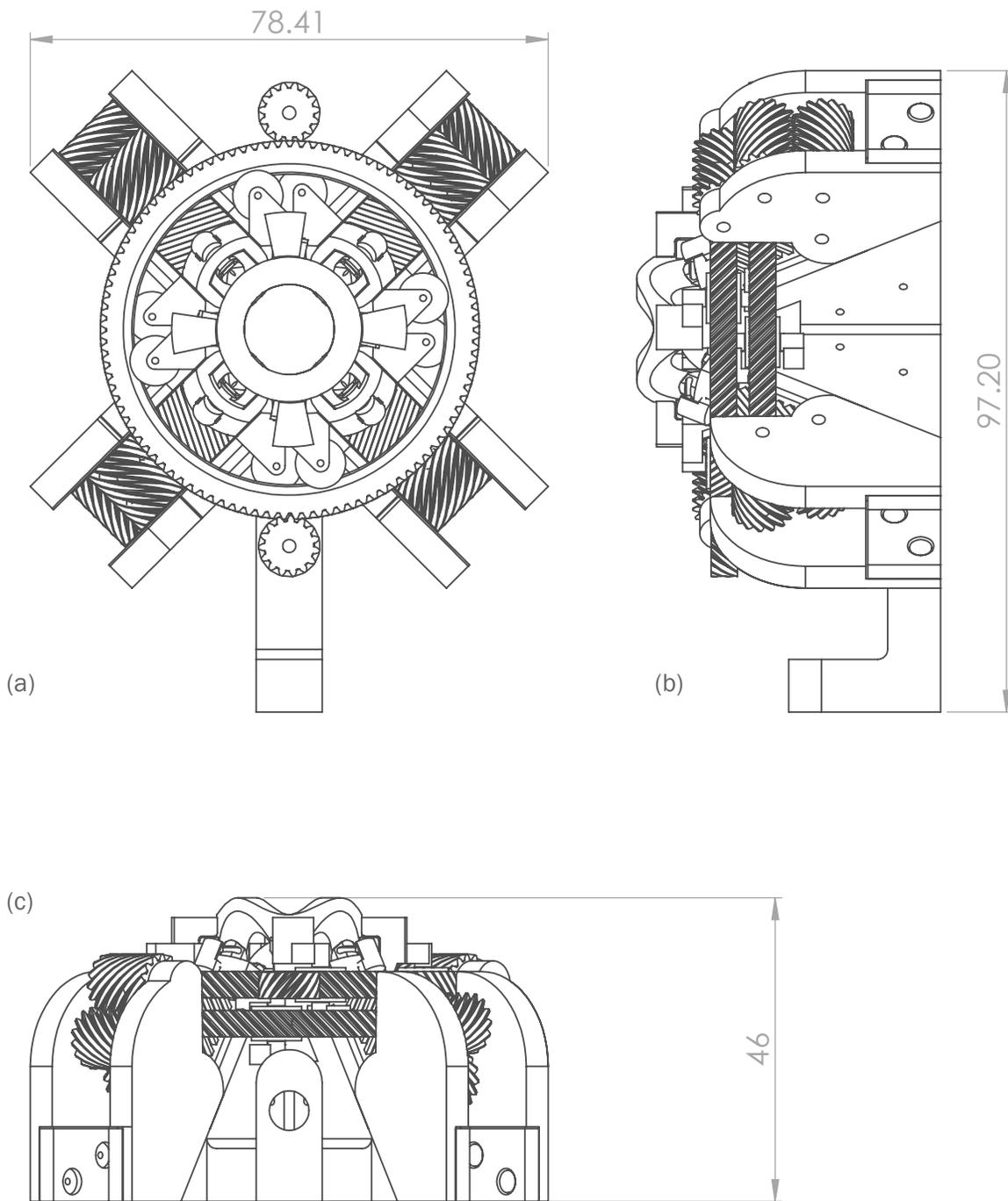


Figura 4.25. Dimensiones generales del prototipo M02MP1: (a) vista frontal, (b) vista lateral y (c) vista inferior.

El prototipo conformado de 52 piezas ocupa un espacio de 71.18 cm^3 y 678.90 cm^2 de superficie total, el peso aproximado del modelo es de 77.82 gramos, todo esto sin contar los motores. Las dimensiones generales del modelo se muestran en la Figura 4.25.

Los análisis estáticos de la lente que a continuación se presentan tienen las mismas propiedades del PDMS de la Tabla 4.1, la ilustración de la malla en el modelo y los parámetros del mallado que se utilizaron para las simulaciones se encuentran tabulados en la Figura 4.26.



Mallado de lente M04MP1		
Propiedades	Unidades	Cantidad
Puntos jacobianos	cte.	4
Tamaño de elementos	mm.	0.3
Tolerancia	mm.	0.015
Número total de nodos	cte.	176274
Número total de elementos	cte.	113422

Figura 4.26. Parámetros del mallado del prototipo M02MP1.

La nueva sujeción diseñada implementa cuatro cordones cilíndricos colocados estratégicamente sobre el borde de la lente, estos tienen la función de fijar la posición de estos cuatro elementos, la superficie de dichos cordones se encuentra iluminada de color azul en la Figura 4.27 (a) bajo la condición de geometría fija en las tres simulaciones realizadas en el software de análisis de elemento finito, mientras que en la Figura 4.27 (b) aparece iluminada en azul una porción de la superficie cilíndrica cónica del cabo, esto indica el área que será sujeta por la celda-cremallera para desplazarse bajo la condición de desplazamiento preinscrito en el software.

La magnitud de dicho desplazamiento es de 1.5 mm, pero la dirección de este movimiento varía según la simulación, en la primera al igual que en los modelos M04MP1 y M04MP2, la dirección del desplazamiento de los cabos se dirige hacia el centro de la lente buscando la compresión de esta misma, en la segunda simulación se busca estirar la superficie esférica dirigiendo las cuatro puntas de los cabos en dirección opuesta al centro del optomecanismo, por último, en la tercera simulación la condición de desplazamiento preinscrito se combina, dos cabos opuestos

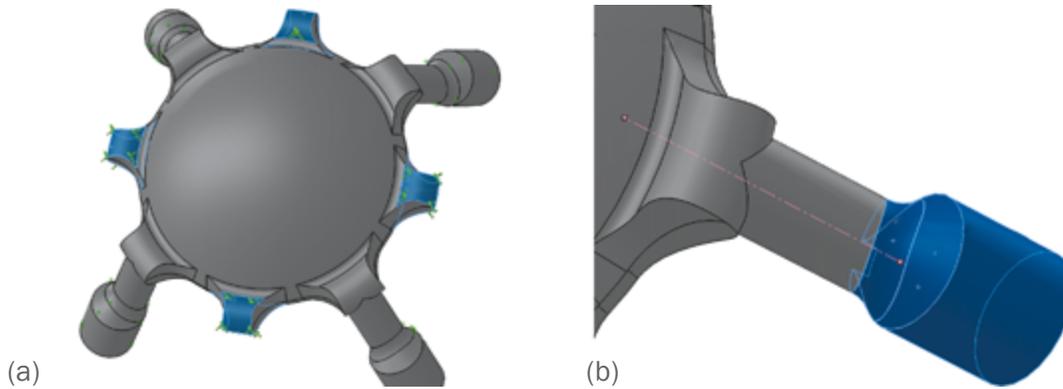


Figura 4.27. Sujeciones de la lente del MO2MP: (a) sujeción en los cordones del borde de la lente, (b) sujeción en el extremo de uno de los cabos.

estiran la lente mientras que los dos cabos restantes son dirigidos hacia el centro de la lente para comprimir la superficie.

Los resultados del análisis de tensión obtenidos en la primera simulación se muestran en la Figura 4.28, pese a que la tensión obtenida como consecuencia de la condición de desplazamiento preinscrito rebasa el límite elástico del PDMS, el nuevo sistema de sujeción empleado presenta la transmisión de cargas mecánicas a la lente como eficiente y mejor distribuida.

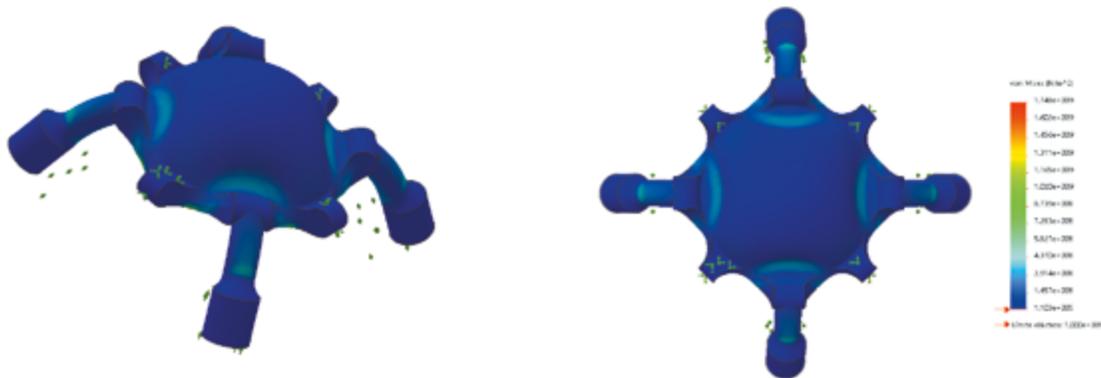


Figura 4.28. Primer análisis de tensión del modelo MO2MP1.

Los resultados obtenidos en el análisis de desplazamientos se muestran en la Figura 4.29, de lado izquierdo se muestra un corte longitudinal en el modelo y un cambio en la curvatura más perceptible y eficiente. Se destaca en este análisis que cierta porción de la superficie esférica se desplaza alrededor de 1 mm, en comparación con el modelo MO4MP2 el desplazamiento en algún punto de la curvatura de la lente apenas es perceptible, por esta razón, Es importante rediseñar el borde de la lente para resolver y optimizar el comportamiento de la lente dentro de la montura.

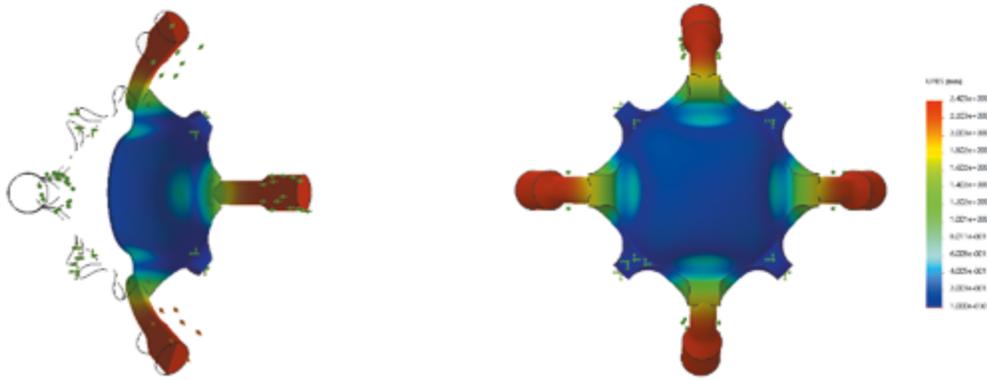


Figura 4.29.
Primer análisis de desplazamiento del modelo MO2MP1.

El análisis de deformaciones unitarias resultantes de la primera simulación que se muestra en la Figura 4.30, tiene un comportamiento favorable para la solución del problema de diseño, en contraste, las partes más propensas a romperse se encuentran en áreas diminutas situadas al principio y fin de cada cordón que sujeta la lente, dichas zonas están iluminadas en color rojo en la misma figura. La zona de los cordones permanece en color azul, lo que significa que no existe ningún tipo de desplazamiento de la lente y, por lo tanto, no existe una deformación en esa área.

En el segundo análisis estático, las zonas del borde de la lente donde el esfuerzo rebasa el límite de tensión del PDMS coinciden a causa de la función que ejercen los cordones adicionales, aunque en la Figura 4.31 (a) se observa una variación descartable en la tensión en todo el modelo según los resultados arrojados por el software, el análisis

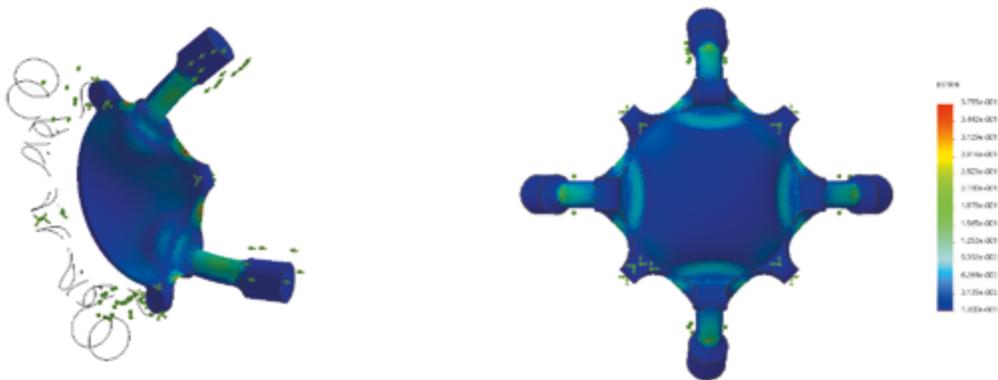


Figura 4.30. Primer análisis de deformaciones unitarias del modelo MO2MP1.

de desplazamiento señala que, aunque la tensión en el modelo es poco perceptible el desplazamiento si es considerable, mejor aún, geométricamente la lente es similar a algunos frentes de onda formados por las aberraciones de bajo orden descritas en el primer capítulo, esto puede verse en la Figura 4.31 (b).

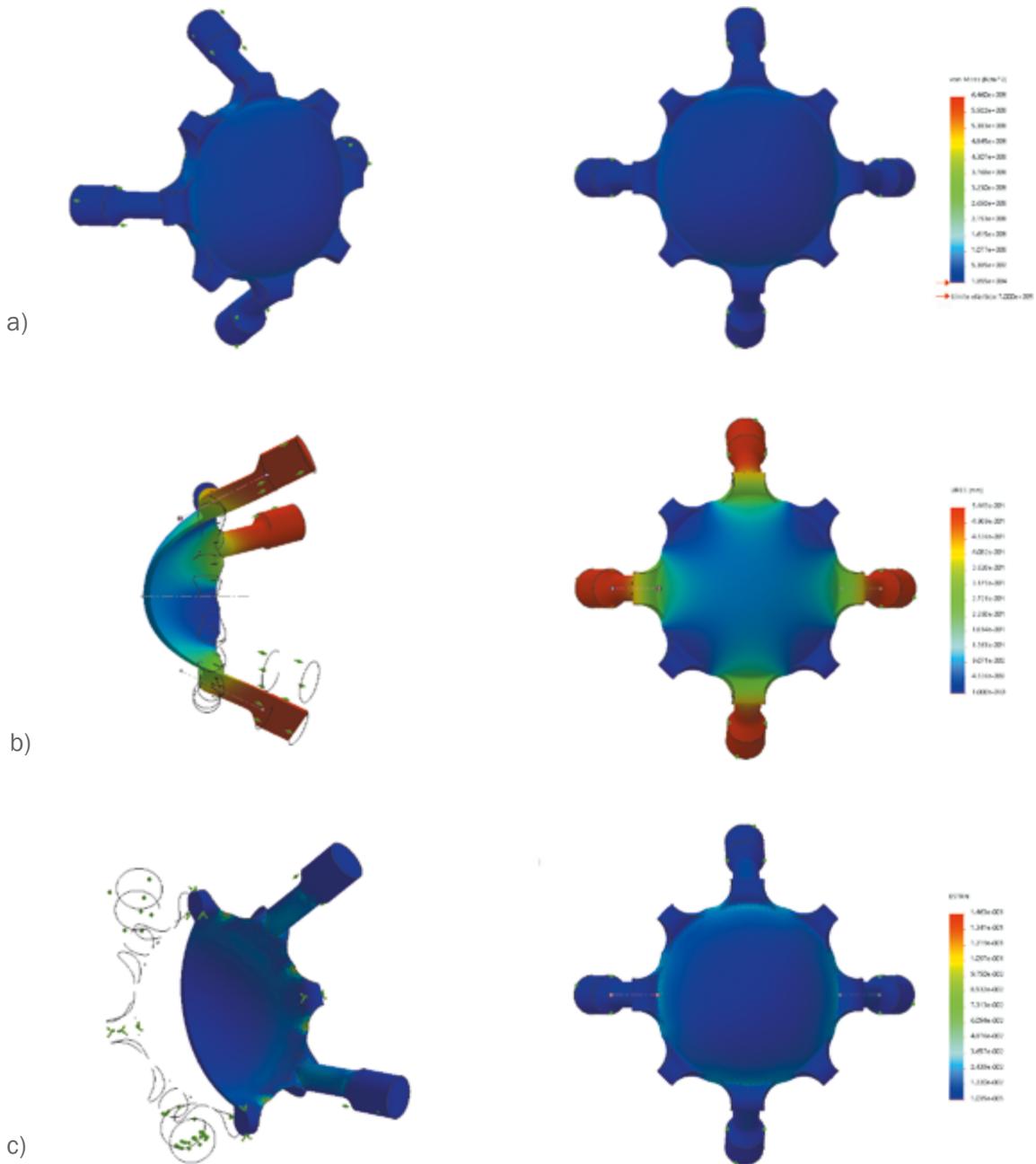


Figura 4.31. Segundo análisis estático del modelo MO2MP1: (a) tensión, (b) desplazamiento y (c) deformaciones unitarias.

En cuanto a la existente relación entre la deformación total y la longitud inicial del modelo, se puede apreciar en la Figura 4.31 (c) que las zonas colindantes al perímetro formado por el borde de la lente son las más afectadas, sobre todo en los extremos de los cordones de sujeción.

Similar a los dos prototipos anteriores, la Figura 4.32 muestra un tercer análisis estático híbrido según las direcciones que condicionan

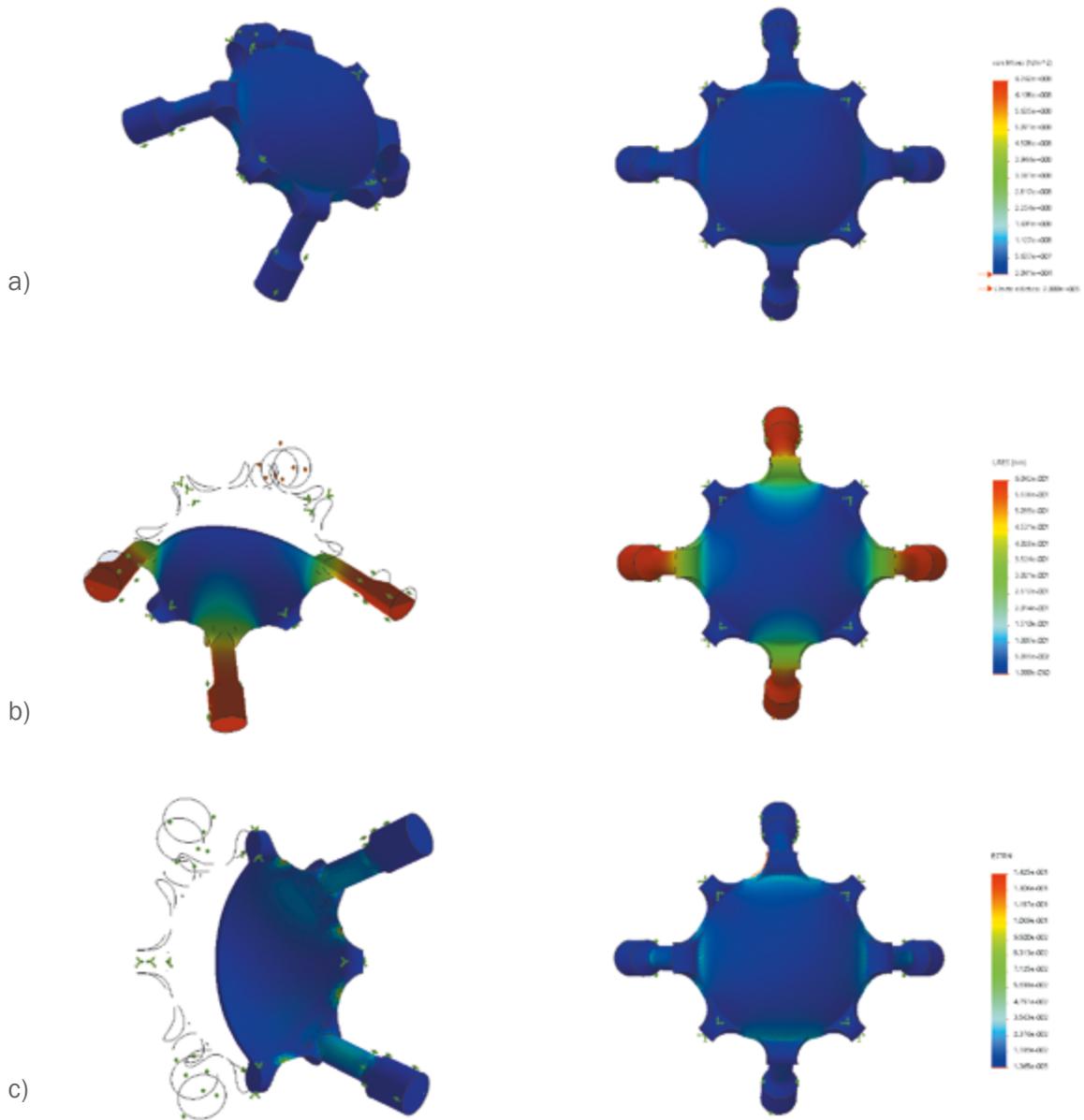


Figura 4.32. Tercer análisis estático del modelo MO2MP1: (a) tensión, (b) desplazamiento y (c) deformaciones unitarias.

el desplazamiento de los cabos, dirigiendo dos de estos simétricamente opuestos hacia el centro del sistema a favor de la compresión, mientras que los dos cabos restantes están condicionados a moverse hacia el exterior del optomecanismo en su propio eje.

Los resultados obtenidos dejan ver que la mejor propuesta de diseño para la realización del optomecanismo es el modelo MO2MP1 debido a la geometría que adopta la lente en los tres análisis estáticos.

4.2 Selección de prototipo

En la siguiente sección se establece una comparación entre los modelos propuestos, esto con base en los resultados de los análisis de elemento finito que facilitan la toma de decisiones en el desarrollo de diseño de la montura. Cabe señalar que en esta etapa se procuraron distintos puntos de vista con relación a la efectividad que podría tener un prototipo con respecto a otro.

También se empleó un método estructurado para la realización de matrices de filtración o selección, y de matrices de evaluación con el objetivo de dar un valor en referencia a un modelo y crear un archivo fácilmente entendible de la razón que hay detrás de las decisiones del concepto (Ulrich & Eppinger, 2013).

Sin embargo, la función del optomecanismo planteado en esta tesis no tiene un modelo de referencia porque no existe en el mercado un optomecanismo con la misma función, las referencias presentadas en el primer capítulo son similares porque utilizan lentes sintonizables, pero ninguna ejerce una carga mecánica en cuatro puntos simétricos a una lente elástica en forma de menisco. Con menos similitud, pero no menos importantes, están las referencias del benchmarking mostradas en la Figura 3.4, las características destacables de estos optomecanismos están tabulados en la Figura 3.12, este proceso recolectó información importante acerca de los elementos optomecánicos y aditamentos empleados convencionalmente en los tableros de experimentación óptica.

Se estableció un juicio que compara objetivamente las tres propuestas de diseño, de tal forma que se tomara en cuenta los datos obtenidos de los análisis estáticos, las propiedades físicas de los prototipos y los criterios carentes de medición. El resultado de la combinación fue una matriz de selección y evaluación con datos de pruebas.

La Tabla 4.4 muestra dos matrices relacionadas por los “Criterios de selección” que ayudan a contabilizar y evaluar los atributos de las monturas propuestas. Primero se consideró el valor máximo obtenido de los análisis estáticos de cada modelo, seguido de esto se destacó en negritas el mejor resultado entre los tres prototipos por cada criterio mensurable, los criterios sin unidad fueron calificados con los símbolos; +, que significa “buen funcionamiento”, 0 equivalente a “funciona de forma similar a algunas referencias” y finalmente - “funcionamiento no aceptable”, así en la parte inferior de la figura se sumaron las veces que estos símbolos o los resultados en negritas estuvieron presentes en cada propuesta.

Tabla 4.4. Matriz de selección y evaluación.

Criterios de selección	Influencia	Unidad	Selección			Evaluación								
			Conceptos			M04MP1		M04MP2		M02MP1				
			M04MP1	M04MP2	M02MP1	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada			
Funcionalidad	75%													
Máximo esfuerzo	10%	MPa	1.16	0.299	1748	3	0.30	5	0.50	1	0.10			
Desplazamientos máximos	10%	mm	2.17	2.07	2.4	5	0.50	5	0.50	5	0.50			
Deformaciones unitarias máximas	5%	Esca-lar	0.957	0.254	0.375	4	0.20	2	0.10	3	0.15			
Peso	3%	gr.	135.6	147.66	144.2	5	0.15	3	0.09	4	0.12			
Volumen	5%	cm ³	54.3	66.115	96.94	5	0.25	5	0.25	2	0.10			
Superficie	2%	cm ²	199.6	314	753	5	0.10	4	0.08	2	0.04			
Eficiencia en la deformación de la lente	40%	No tiene	-		+	2	0.80	2	0.80	4	1.60			
Ergonomía	20%													
Facilidad para la instalación y desinstalación del opto-mecanismo al poste	10%	No tiene	0	0	0	3	0.30	3	0.30	3	0.30			
Facilidad de instalación y desinstalación de la lente al optomecanismo	10%	No tiene	-		0	1	0.10	1	0.10	3	0.30			
Otros	5%													
Facilidad de manufactura	5%	No tiene	+	+	-	4	0.20	4	0.20	3	0.15			
Suma de negritas			4	1	1									
Suma de +			1	1	1									
Suma de 0			1	1	2									
Suma de -			2	2	1									
Puntos			3	0	1		2.90		2.92		3.36			
Lugar			1	3	2		3		2		1			
¿Continuar?			No	No	Si	No	No				Desarrollar			

Los puntajes obtenidos de la matriz de selección están basados en las siguientes equivalencias; + es igual a 1 punto, al número 0 no se le asigna puntaje y el símbolo - equivale a -1 punto, de manera similar los resultados escritos en negritas valen 1 punto.

La matriz de “Evaluación” mostrada de lado derecho en la Tabla 4.5 contiene calificaciones en escala del 1 al 5 de todos los criterios de selección en los tres prototipos, dichas calificaciones se multiplicaron por el porcentaje asignado condensadamente a cada criterio y este resultado se colocó en las columnas de “Evaluación ponderada”, al final de la tabla está sumado el puntaje de cada prototipo y basado en eso se elige el modelo de mejor rendimiento. La rúbrica preparada para evaluar los modelos se describe en la siguiente figura.

Tabla 4.5. Escala de evaluación.

Desempeño relativo	Calificación
Deficiente	1
Aceptable	2
Regular	3
Bueno	4
Muy bueno	5

Según lo evaluado hasta la matriz de selección, el prototipo M04MP2 suma 0 puntos, mientras que los otros dos prototipos tienen una nota positiva, por lo cual, este prototipo no pasaría a la siguiente fase. Por otra parte, el modelo que parece tener mejores atributos es el M04MP1 porque tiene un diseño compacto y las deformaciones unitarias resultantes de este prototipo demuestran un comportamiento eficaz y el predilecto para desarrollarse, no obstante, se comprobó este juicio a través de la matriz de evaluación donde la ponderación de cada criterio se toma en cuenta, el rubro de mayor importancia ocupa el 40% y cambia el lugar de preferencia en la matriz de evaluación como el segundo mejor.

El criterio de “Eficiencia en la deformación de la lente” adquiere un valor funcional o no, a partir de la similitud de la deformación de la lente con respecto a la geometría que tiene el frente de onda expuesto en la Figura 1.9, por esta razón, la solución M02MP2 es la mejor evaluada ponderadamente pese a que las propiedades físicas de los otros dos prototipos tienen magnitudes ligeramente más favorables con respecto a las de la tercera propuesta.

4.3 Optimización del borde de la lente

La razón por la cual el máximo esfuerzo del MO2MP1 fue calificado como deficiente, es porque los resultados en los análisis estáticos demuestran que esta se romperá con facilidad, por esta razón, se corrigió este comportamiento mediante la adición de un aro integrado al borde de la lente y cuya función es resistir la carga mecánica sin que la superficie esférica se rompa cuando los cabos sean desplazados de su posición de reposo.

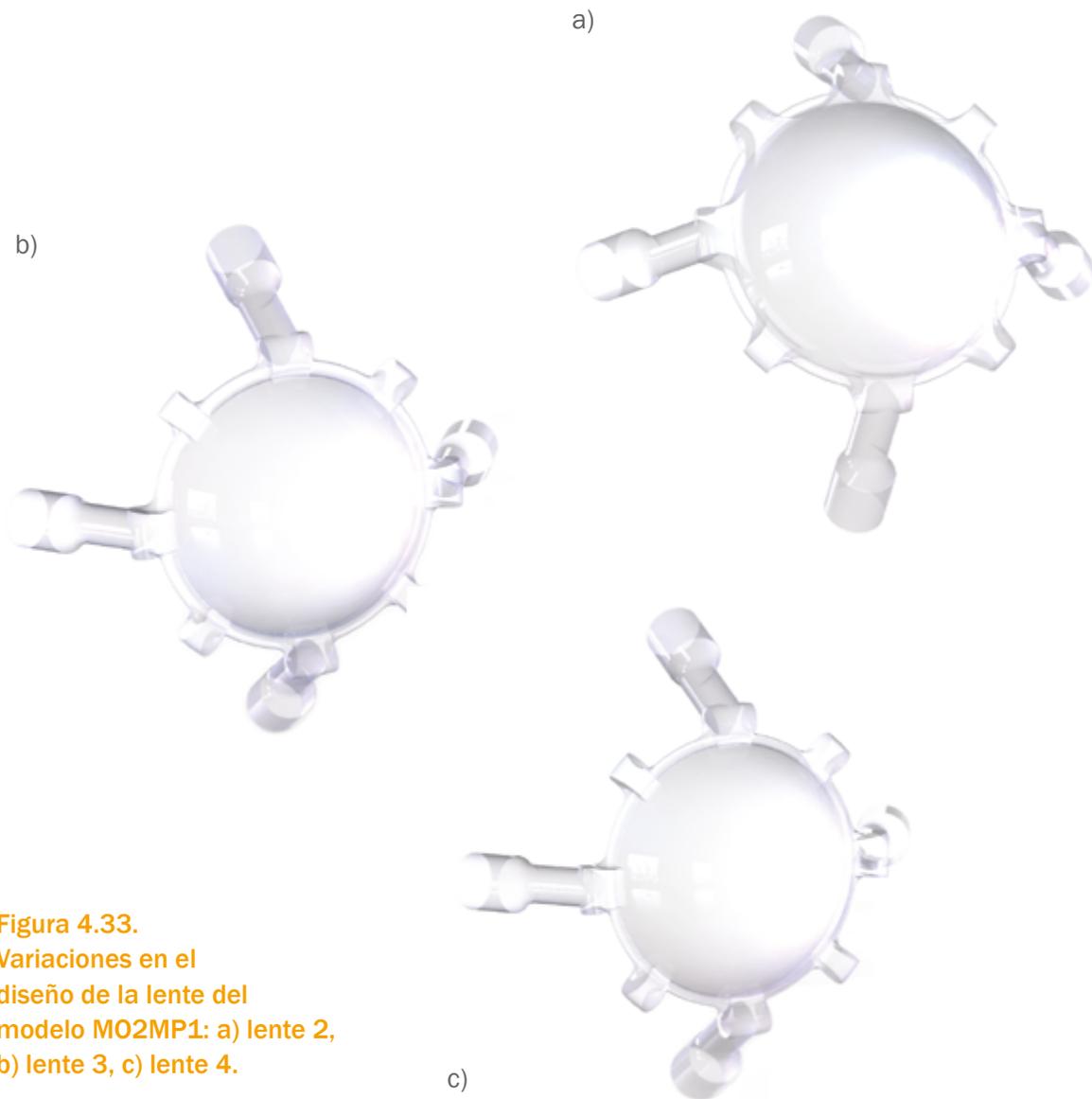


Figura 4.33.
Variaciones en el
diseño de la lente del
modelo MO2MP1: a) lente 2,
b) lente 3, c) lente 4.

La Figura 4.33, muestra tres variantes en el diseño de la lente del optomecanismo, el inciso a) es la “lente 2” expuesta en la Tabla 4.6, el b) es la “lente 3” y el c) es la “lente 4”, cada uno se analizó bajo las mismas condiciones del análisis estático de la Figura 4.31 que es la Lente 1. Además, no solo se modificó esta parte de la lente sino que también se hicieron algunas variantes geométricas en la zona donde los cabos hacen contacto con la superficie esférica y en los extremos de los cordones de sujeción situados entre cabo y cabo.

Tabla 4.6. Tabla comparativa de los análisis.

Propiedades	Unidades	Lente 1	Lente 2	Lente 3	Lente 4
Puntos jacobianos	Cte.	4	4	4	4
Tamaño de elementos	mm.	0.3	0.3	0.3	0.3
Tolerancia	mm.	0.015	0.015	0.015	0.015
Número total de nodos	Cte.	101132	101132	96430	60632
Número total de elementos	Cte.	62790	62790	59942	36435
Tensión máxima	MPa	646	0.331	638.2	535.8
Desplazamiento máximo	mm.	0.54	0.9	0.75	0.61
Diámetro transversal del aro integrado al borde de la lente	mm.	sin aro	0.6	0.8	0.6

La Figura 4.34 ilustra el análisis de tensión de las lentes 2, 3 y 4, por consiguiente la información gráfica contenida en esta figura junto con los datos numéricos de la tabla anterior, indican que el modelo geométrico de la lente 2 es el más indicado para fabricarse, por otro lado, cabe destacar que esta sección es un resumen de muchas pruebas con otras variantes en el diseño de los cabos y los cordones, mismas que resultaron ser pruebas fallidas.

La mejor solución para corregir los problemas en el estiramiento de la lente precede de la adición de unos nervios que amortiguan y distribuyen la carga mecánica, estos se localizan junto a cada cabo, cada cordón de sujeción y al aro del borde de la lente agregado que entre otras cosas funciona similar a una liga o goma elástica. El diseño de estos nervios en la lente 2 ocupa una mayor superficie sobre la lente y la liga en comparación con la variación 3 y 4, a esta diferencia en la geometría de la sujeción se le amerita el mejor rendimiento. En el caso de la lente 3, la liga de diámetro más grande limita el movimiento en la superficie esférica.

Después de este análisis se tomó la decisión que la lente 2 es el prototipo que será montado al optomecanismo y en el siguiente capítulo se explica la manufactura de este.

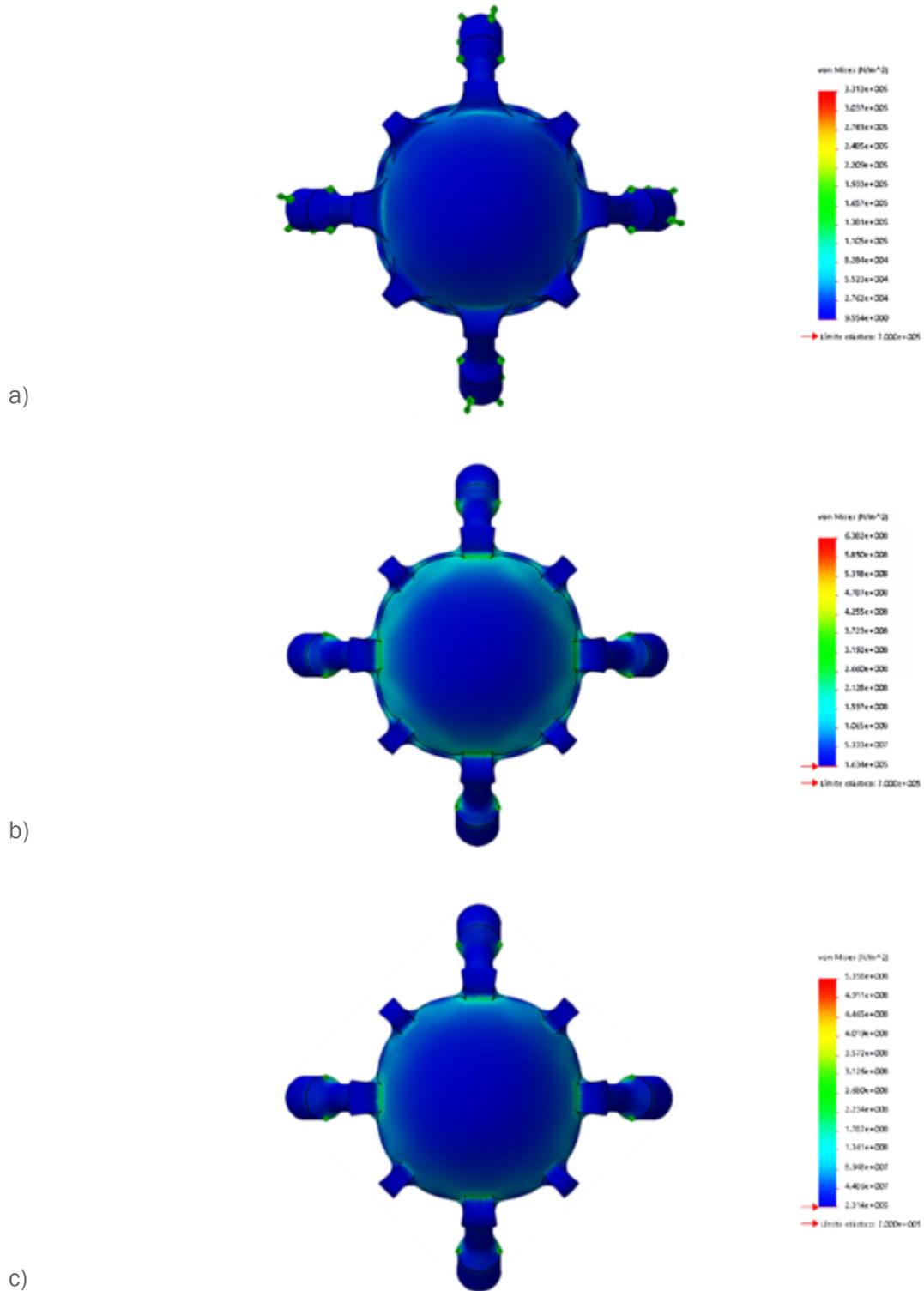


Figura 4.34. Optimización de la lente para el prototipo M02MP1: (a) lente 2, (b) lente 3 y (c) lente 4.

4.4 Diseño de bastidor

El diseño de bastidor se refiere a la realización de la pieza que soportará la montura previamente diseñada y presentada en la Figura 4.22, en donde no es tomado en cuenta el volumen, masa y geometría de los motores, a continuación se da una breve explicación del porqué se utiliza cierto modelo y bajo que condiciones.

Algunas monturas optomecánicas en proceso de diseño y la montura para cristalino utilizada por (García J. M., 2019) utiliza un motor a pasos modelo 28BYJ-48 que trabaja auxiliado por un sensor de frente de onda Michelson cuya tarea es regular el movimiento de los motores, por este motivo, se utilizó este modelo de servomotor puesto que su tamaño y costo son accesibles para la fabricación del prototipo piloto, no obstante, el diseño del MO2MP1 puede adaptarse a otro tipo de actuador rotativo debido a la característica de adaptabilidad puesto que cuenta con un amplió espacio entre cada extremidad donde actúan las cremalleras, otra característica que lo hace adaptable es el par de engranes concéntricos a la lente que permiten recibir cargas mecánicas desde cualquiera de los cuatro espacios establecidos por la geometría en forma de x que el optomecanismo presenta.

De esta manera la Tabla 4.7 describe las propiedades físicas del motor 28BYJ-48 y la suma de estas propiedades para el uso de dos y cuatro motores, estas cantidades fueron sumadas correspondientemente a la masa y volumen registrados en la presentación de cada modelo y ese es el resultado que se mostró en cada concepto en la Tabla 4.4.

Tabla 4.7. Tabla de propiedades físicas del motor 28BYJ-48.

Propiedades físicas	Unidades	Magnitud	Total para sistema de 4 motores	Total para sistema de 2 motores
Peso	gr.	33.19	132.76	66.38
Volumen	cm ³	12.88	51.52	25.76
Superficie	cm ²	37.05	148.2	74.1

Primeramente se diseño el bastidor que sujetaría el sistema, para este proceso se propuso un modelo básico, e independiente capaz de montar y desmontar por si en el futuro se quisiera cambiar esta interfaz para añadir otro tipo de sistema, esta característica también puede ser útil para dar mantenimiento al artefacto en caso de ser requerido.

Después de diseñar el bastidor se implementó un estudio que consiste en evaluar el comportamiento de la pieza con distintos parámetros

en su geometría bajo las condiciones estáticas que se requieran, en este caso, se toma en cuenta el peso total del prototipo MO2MP1, a las cuales se suma la masa de los dos motores contemplados en el modelo, luego se ejecuta un análisis estático a la pieza y posteriormente se establece un rango de valores discretos que se deseen modificar, posteriormente el software utilizado para realizar los análisis de elemento finito genera una serie de iteraciones en el rango establecido, y este a su vez los resultados de cada combinación.

La Tabla 4.8 muestra los datos utilizados durante este proceso, en la primera parte de la tabla se describen las propiedades físicas utilizadas en los análisis estáticos y en la parte inferior de la tabla se puntualiza los datos del mallado.

En la Figura 4.35 (a) se muestra el mallado del bastidor, los puntos morados representan la carga de peso aplicada a seis perforaciones sobre el cuerpo del prototipo, en esos puntos unos pernos de 3/16 de

Tabla 4.8. Propiedades del ABS y propiedades del mallado.

Propiedades del ABS		
Tipo: Isotrópico elástico lineal		
Propiedades	Unidades	Cantidad
Límite elástico	N/m ²	32000000
Límite de tracción	N/m ²	30000000
Módulo elastico	N/m ²	2030000000
Coefficiente de Poisson	Cte.	0.394
Densidad de masa	kg/m ³	1020
Módulo cortante	N/m ²	318900000
Mallado de bastidor		
Propiedades	Unidades	Cantidad
Puntos jacobianos	Cte.	4
Tamaño de elementos	mm.	1
Tolerancia	mm.	0.05
Número total de nodos	Cte.	274567
Número total de elementos	Cte.	183594

diferentes longitudes sujetarán al sistema, en la parte inferior de la pieza un punto de color verde indica el lugar donde fue aplicada la condición de geometría fija, situada en una séptima perforación donde se atornillará un perno M6 a un poste móvil.

La Figura 4.35 (b) muestra el análisis de tensión del bastidor, basándose en la escala de color ilustrada en el extremo derecho de la imagen, nótese que la mayor parte de la superficie del bastidor se en-

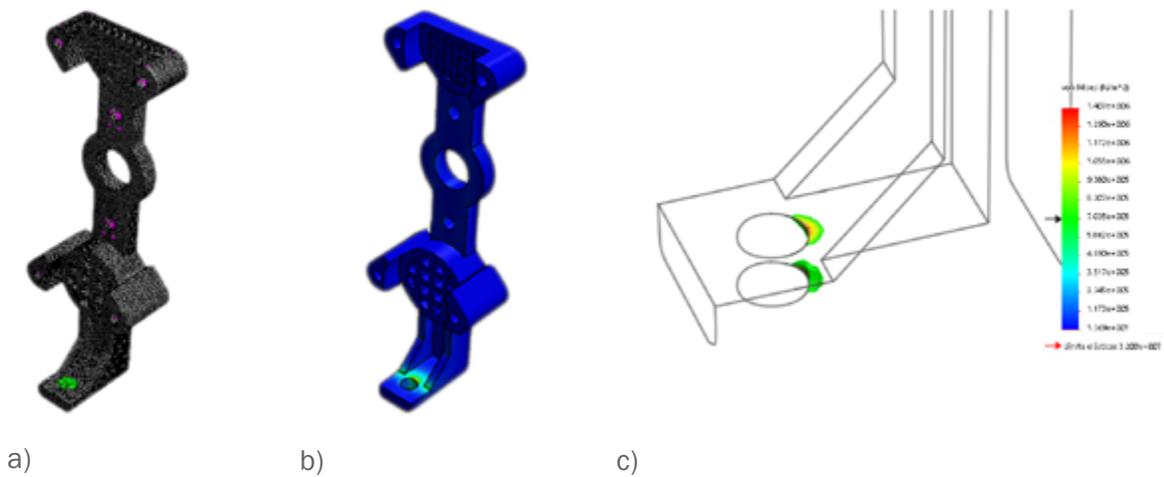


Figura 4.35. Mallado y análisis de tensión.

cuenta en reposo, mientras que en el inciso (c), se muestra que cierta zona colindante a los nervios y aledaña al orificio donde se colocará el tornillo M6 se presenta la tensión más significativa en todo el modelo. La cantidad aplicada para hacer el estudio de diseño fue el doble del peso del sistema, incluyendo los motores, esta cantidad equivale a 3 N a lo que el prototipo soportó sin complicación alguna.

Cabe señalar, que a pesar de que los resultados fueron positivos, existe una amplia posibilidad que el optomecanismo no sea utilizado adecuadamente por el operador, un caso concurrente podría ser que el usuario aplicara un poco más de fuerza que la necesaria para colocar el artefacto, dejara caer el peso de sus brazos o parte de todo su peso por diversas circunstancias, en ese caso el bastidor tendría que soportar más peso del contemplado en el diseño, por tal motivo, se hizo el estudio de diseño para aumentar la resistencia y rendimiento de la pieza.

Se registraron cuarenta escenarios donde el espesor inicial del par de nervios cambia cada 0.5 mm en un intervalo de 1 mm hasta 3 mm y el espesor de la pared que sujeta al perno M6 cambia cada 0.25 mm de 4.25 mm a 6 mm. Adicionalmente, el par de nervios que tienen forma de triángulo rectángulo aumenta 6 mm la longitud de sus catetos, como consecuencia el cateto colindante con la pared horizontal absorbe la máxima tensión ubicada en el orificio que atraviesa el perno. En la Figura 4.35 c) se muestra dicha tensión de manera aislada, de este modo el valor máximo de la tensión en pieza pasó de 1.407 MPa a 0.547 MPa, es decir, una sexta parte del valor del límite elástico, con lo cual se descarta algún tipo de deformación permanente o ruptura a costa del incremento marginal de la masa de apenas 3.6 g.

Escenarios	Espesor nervios (mm)	Espesor soporte (mm)	Tensión (MPa)	Masa (g)
1	1	4.25	0.837	28.261
2	1.5	4.25	0.792	28.879
3	2	4.25	0.783	29.500
4	2.5	4.25	0.781	30.126
5	3	4.25	0.748	30.757
21	1	5.25	0.714	28.770
22	1.5	5.25	0.692	29.419
23	2	5.25	0.669	30.072
24	2.5	5.25	0.659	30.730
25	3	5.25	0.646	31.393
36	1	6	0.592	29.152
37	1.5	6	0.575	29.824
38	2	6	0.577	30.501
39	2.5	6	0.557	31.182
40	3	6	0.547	31.869

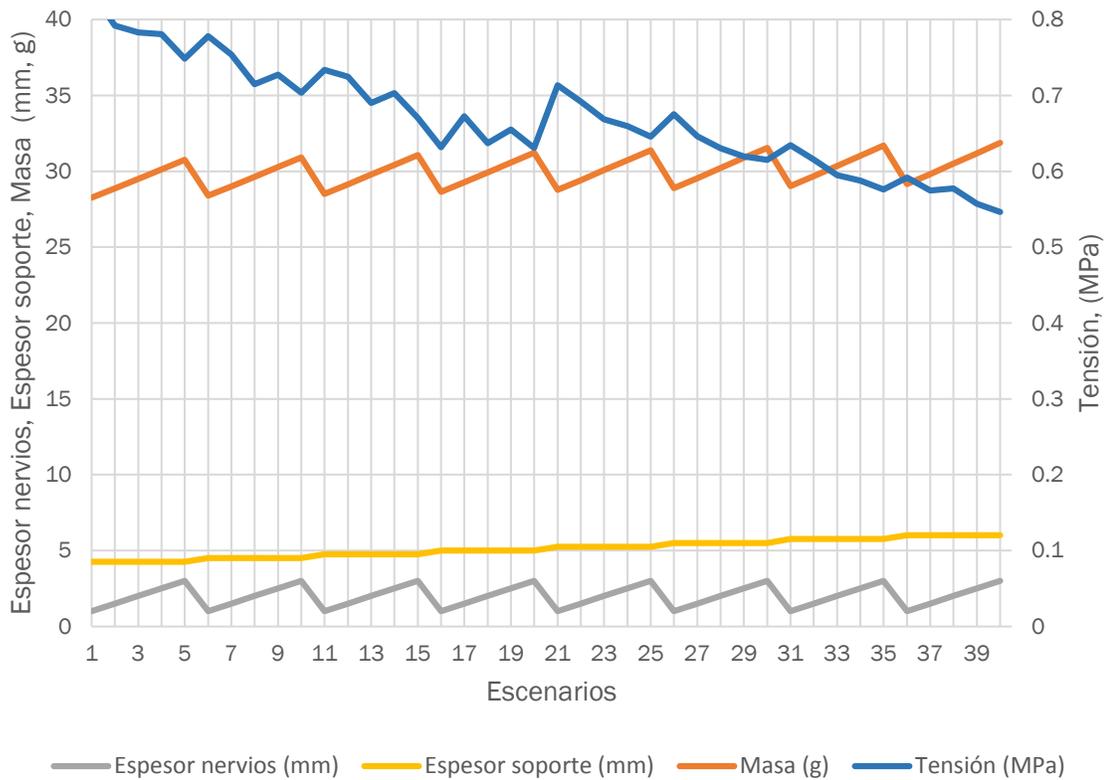


Figura 4.36. Tabla de escenarios y gráfica de la relación espesor-tensión-masa.

En la parte superior de la Figura 4.36 se tabularon quince de los cuarenta escenarios contemplados para el estudio de diseño con el propósito de dar una muestra de las iteraciones realizadas, más abajo se ilustra una gráfica donde se hace una relación proporcional entre el aumento de espesores, la tensión resultante y la respectiva proporción de la masa.

El modelado final del bastidor se muestra en la Figura 4.37 desde la vista lateral y en perspectiva.

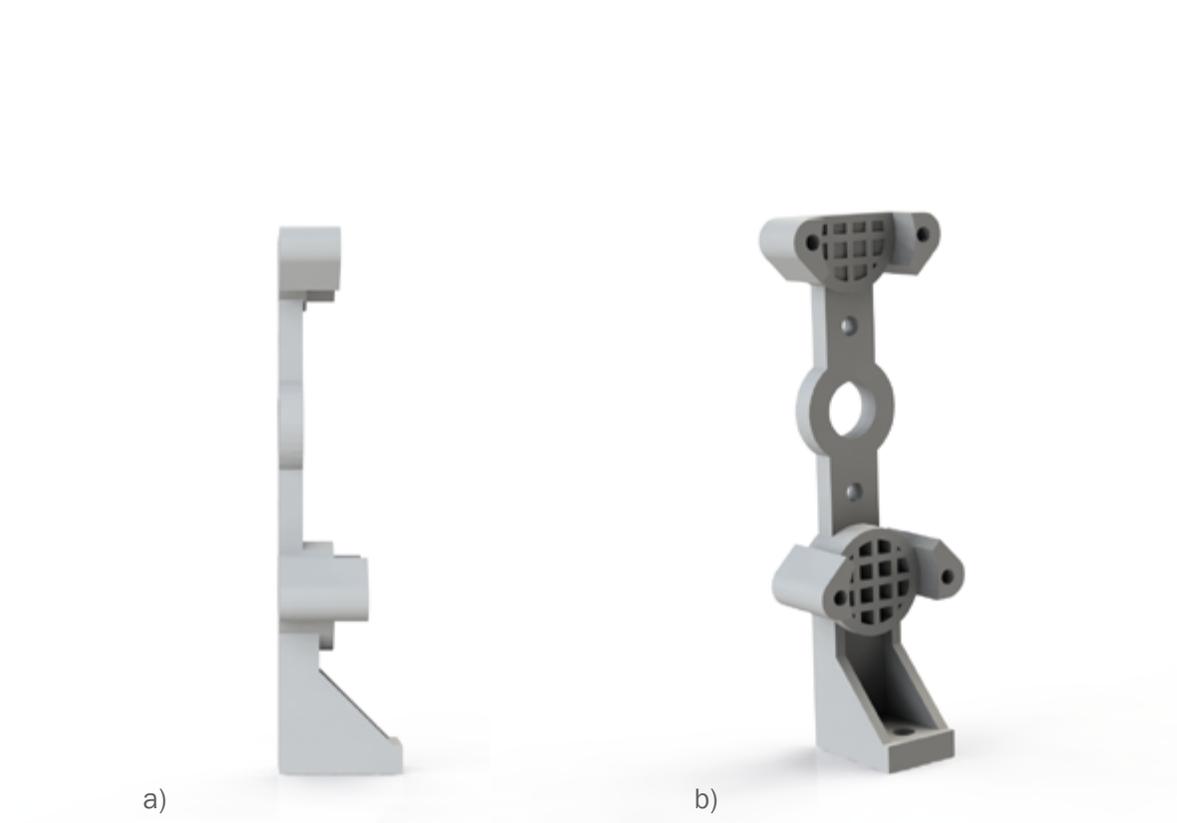


Figura 4.37. Bastidor final: (a) vista lateral, (b) vista en perspectiva.

4.5 Prototipo final

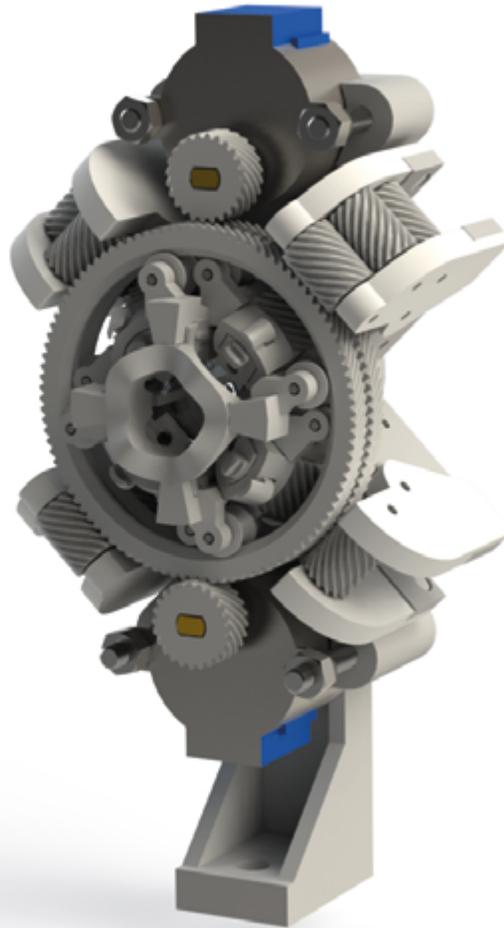


Figura 4.38. Vista en perspectiva del prototipo final M02MP1.

Frente a la evidencia recaudada se llegó al resultado final del diseño de la montura optomecánica, aunque el siguiente capítulo contiene algunas modificaciones menores debido al refinamiento en la impresión 3D, en este punto el prototipo está completamente diseñado, la Figura 4.38 muestra en perspectiva el ensamble del optomecanismo..

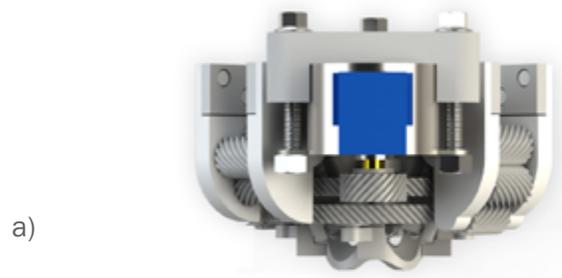


Figura 4.39. Montura optomecánica final: (a) vista superior, (b) vista frontal y (c) vista inferior.

La Figura 4.37 y 4.38 ilustran las vistas principales del prototipo final con los servomotores integrados, un par de pernos M4 de 1" se encargan de sujetar el motor colocado en la parte superior, mientras que otro par del mismo espesor y cuerda, pero de 1 1/2" longitud sujetan al motor restante.

Adicionalmente, en las siguientes dos páginas se presentan tres vistas en corte en distintas posiciones, la Figura 4.39 muestra en orden descendente un corte transversal que pasa por el centro de la lente y por

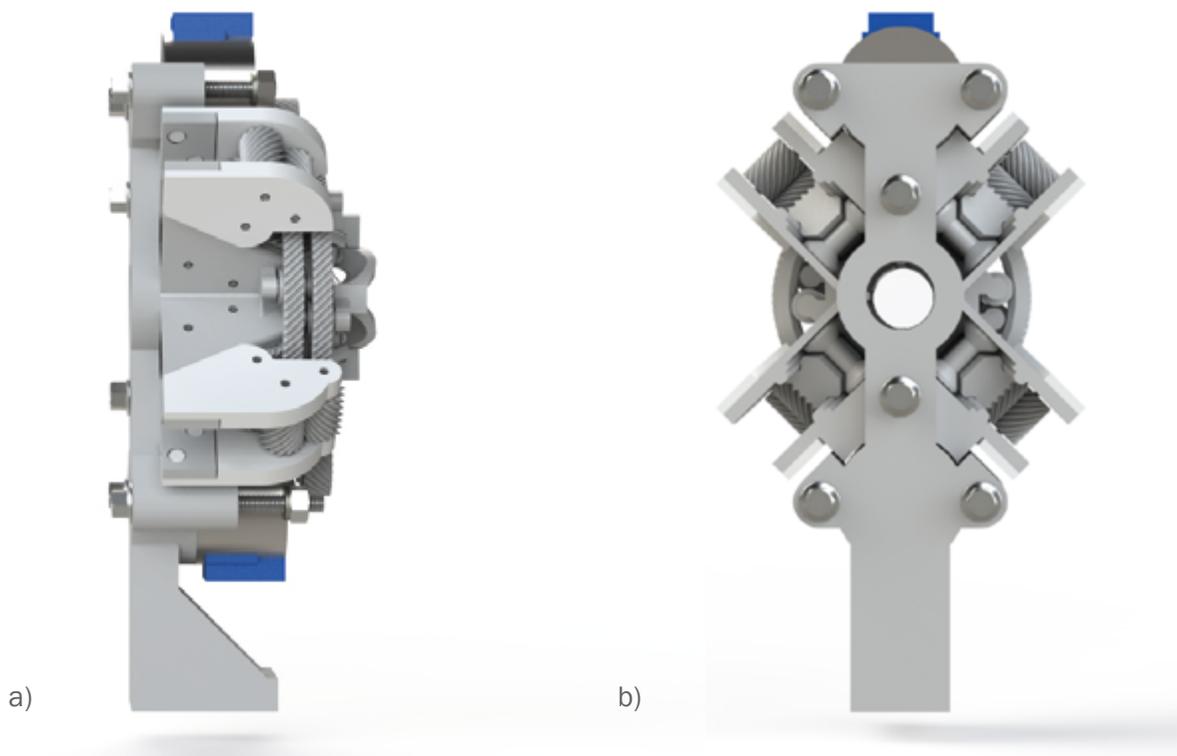


Figura 4.40. Montura optomecánica final: (a) vista lateral, (b) vista posterior.

los cordones de sujeción, además, en este corte se puede apreciar el funcionamiento del engrane concéntrico donde dos de los cuatro rodillos que sostienen al engrane se ven cortados, esto es con el propósito de mostrar el modo de agarre y deslizamiento en la pieza que transmite la carga mecánica, en segundo lugar se muestra un corte longitudinal con el propósito de exhibir el orificio del perno M6 que sujetará al bastidor, asimismo se muestran las conexiones que sujetan al optomecanismo con el bastidor a través de un par de pernos M4 de 1/2".

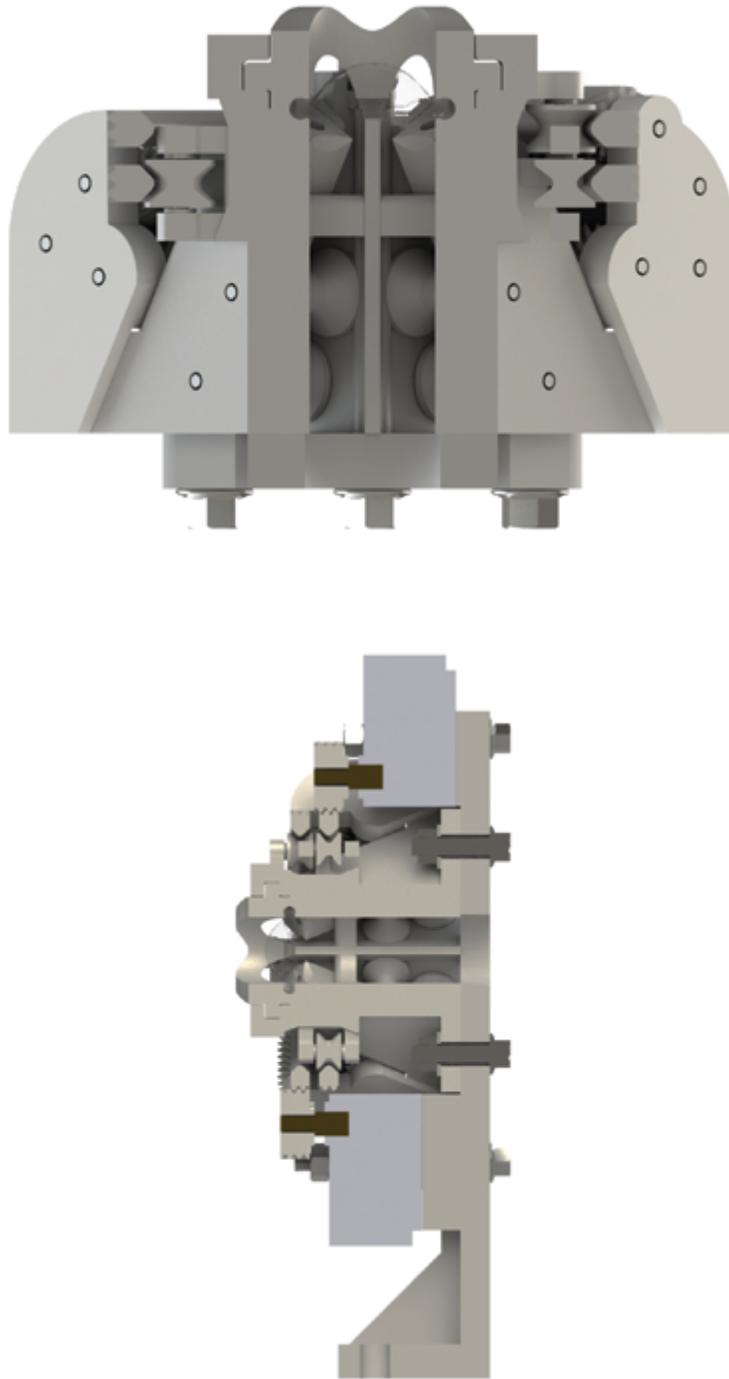


Figura 4.41. Corte transversal y longitudinal de la montura optomecánica final.

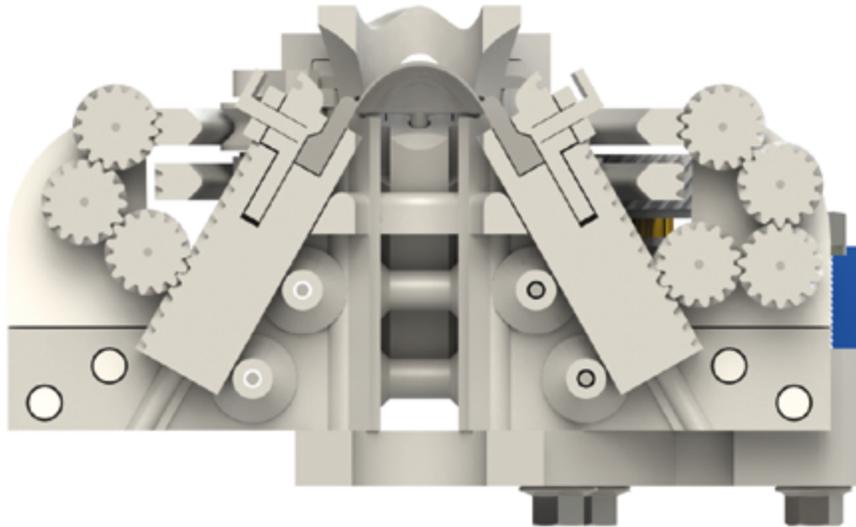


Figura 4.42. Corte sobre el eje longitudinal de un par de cabos de la lente de la montura optomecánica final.

La tercera vista en corte ilustrada en la Figura 4.40 se creó a partir de un plano paralelo y coincidente al eje de acción de la celda-cremallera que es el mismo eje longitudinal de los cabos, de esta forma, estos elementos muestran el funcionamiento de la sujeción de la celda y los demás componentes que intervienen para sostener los cabos de la lente, asimismo, se pone a la vista el ensamble más complejo de todo el sistema, puesto que el engrane concéntrico más distante de las cremalleras necesita la adición de un piñón más, por lo tanto, para que las dos cremalleras se dirijan hacia el centro del optomecanismo al mismo tiempo se necesita agregar un piñón extra, de lo contrario una cremallera avanzaría hacia el centro del optomecanismo, mientras que la cremallera opuesta avanzaría hacia el exterior, dicho de otra forma una componente empujaría mientras que la otra tiraría. Por esta razón, se tiene de un lado tres piñones y del lado opuesto cuatro.

Los rodillos que deslizan al engrane concéntrico y los piñones en el sistema a excepción de los adaptados a los motores, son sostenidos por unos travesaños de acero de 1.4 mm de diámetro, estos son montados sobre un par de soportes que se insertan a presión por medio de dos orificios ubicados en cada extremo de la base que sostiene a las cremalleras.

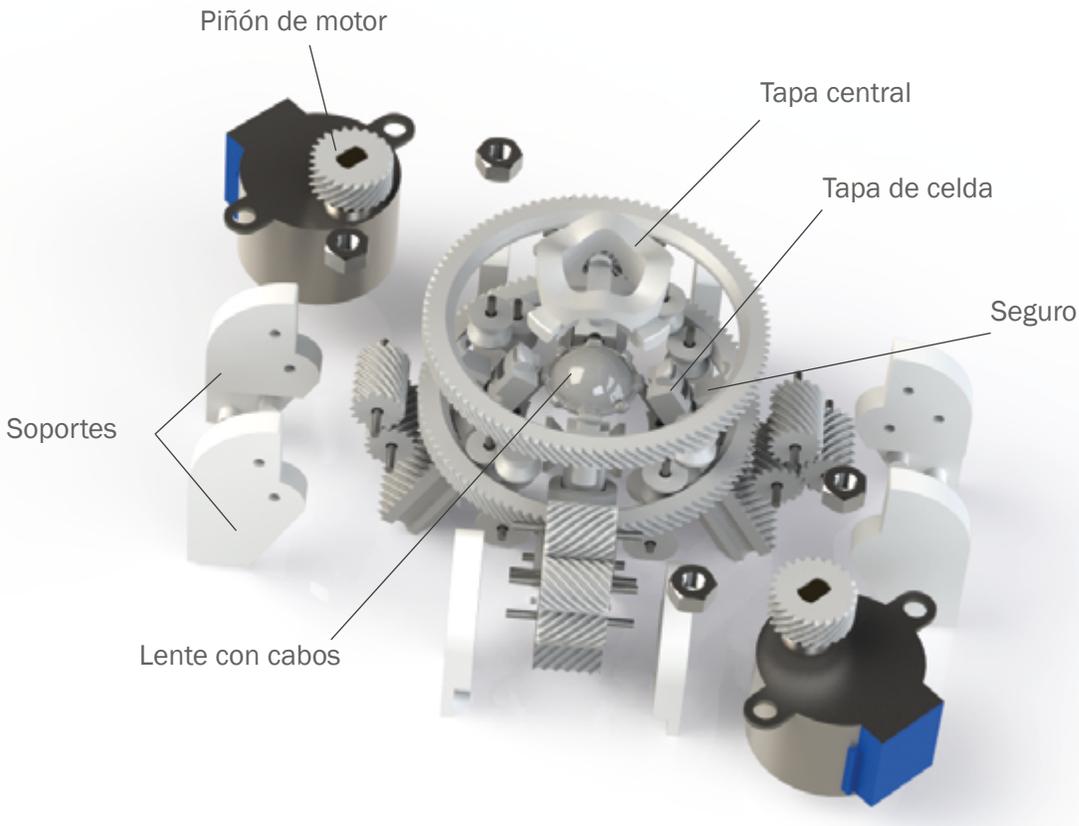


Figura 4.43. Vista explosionada.

Para una mejor comprensión de lo explicado anteriormente, la Figura 4.41 muestra al optomecanismo de manera explosionada y sin el bastidor ni la base, en tanto que la Figura 4.42, ilustra otra vista explosionada del modelo, pero esta vez con todas sus componentes y la señalización de cada una de ellas, a pesar de eso, en la sección de anexos se adjuntan las hojas de proceso de manufactura de cada pieza, donde se especifican los pormenores de los componentes.

El prototipo final está conformado por noventa y dos piezas y la masa aproximada es de 160.63 g, el volumen es de 139.23 cm³ y la superficie ocupada es de 1082.88 cm² según lo calculado por el software utilizado, las dimensiones del prototipo se encuentran en la sección de anexos en los planos constructivos del prototipo.

La manufactura del prototipo se dividió en tres partes, la impresión en 3D, la fabricación de la lente con el proceso que implica esta acción, y finalmente el ensamble del artefacto, en el siguiente capítulo se describe el procedimiento que se siguió para la construcción del modelo.

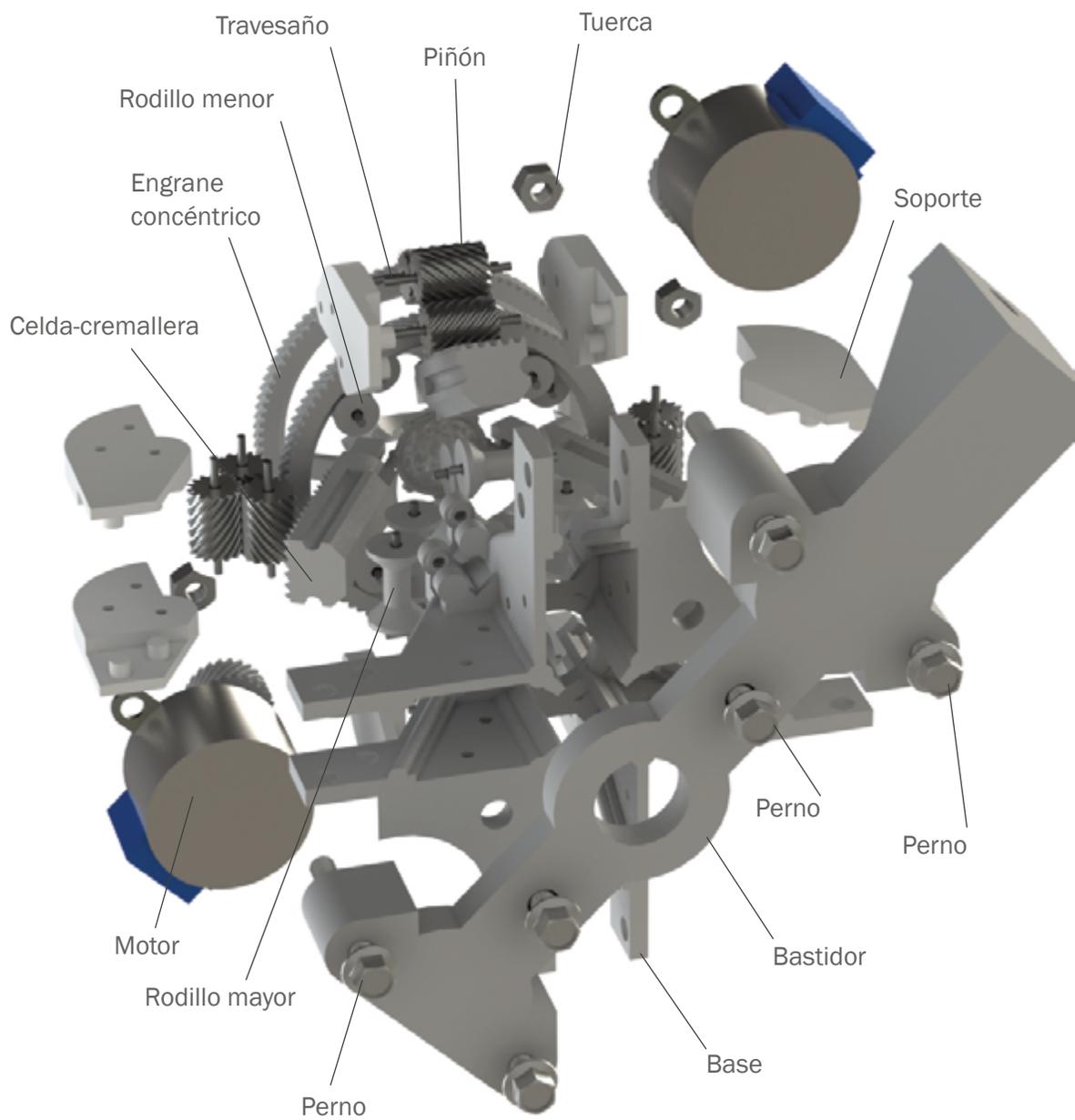


Figura 4.44. Vista explosionada 2.

Capítulo 5

Manufactura

5.1 Impresión de prototipo final

La impresión 3D resultó ser una tarea relativamente sencilla, para que esto sucediera así se consideraron algunas pruebas de impresión con las componentes que necesitan mayor resolución, en este caso, fueron los engranes y piñones, las caras cilíndricas dentadas de estos elementos son primordiales para el funcionamiento del optomecanismo, los cuales al imprimirse en PLA tuvieron complicaciones debido a que la impresión no se enfriaba lo suficientemente rápido para que las superficies dentadas se mantuvieran en la posición correspondiente con respecto al modelo digital.

En la Figura 5.1 se muestra una impresión en ABS color blanco y la misma pieza impresa en PLA de color negro, la variación en términos de altura, el ángulo de hélice, incluso en la forma de la punta de los dientes cambia, tras las disimilitudes, el engrane impreso con PLA presentó un ligero pandeo consecuencia de la contracción del material al enfriarse.

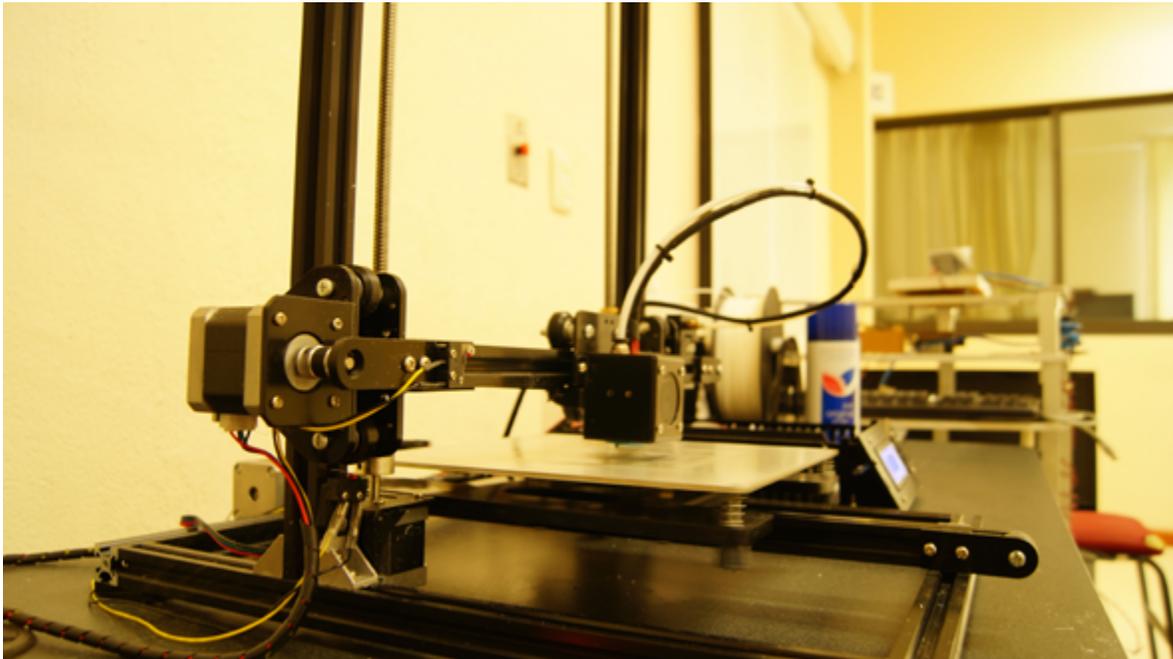


Figura 5.1. Pruebas de impresión de engrane: (a) impreso en ABS y (b) impreso en PLA.

La temperatura saliente del ABS en impresiones 3D se encuentra en un rango entre 220 °C y 240 °C, como opción alterna se consideró imprimir con PLA, puesto que la temperatura de salida de este material varía entre 190 °C y 220 °C, conjuntamente la cama de impresión para el ABS se recomienda a una temperatura de 110 °C, mientras que para el PLA una cama calentada no es esencial para este material (Abeykoon, C., Sri-Amphorn, P., & Fernando, A. 2020).

Sin embargo, se comprobó que el PLA tenía más complicaciones debido al comportamiento del material y antes de agregar una especie de bastones a la geometría de los piñones y engranes para que estos se lograran sostener adecuadamente, las piezas dentadas se imprimieron exitosamente en ABS debido al efecto de la cama de impresión caliente y al enfriamiento gradual de las piezas.

Por otra parte, la impresora que se utilizó para la realización del prototipo no cuenta con una protección que aisle el proceso de impresión a las condiciones ambientales (ver Figura 5.2) pese a que la impresora se encontraba en un espacio bien acondicionado para el funcionamiento de la máquina, factores como la humedad, temperatura ambiente y punto de rocío pueden influir, por lo cual, según la experiencia adquirida para tener una mejor resolución en las piezas se evitó imprimir bajo condiciones de lluvia o temperaturas bajas, puesto que un enfriamiento muy rápido afecta la adherencia entre una capa y otra.



Se observó en las impresiones con PLA que las tolerancias adecuadas para cada pieza varían según el plano, la tolerancia que se debe tener para caras planas paralelas a la plancha es descartable mientras se tengan alturas en múltiplos de 0.1 mm, mientras que cualquier cara en un plano perpendicular a la plancha debe tener una tolerancia de 0.05 mm, prácticamente la tolerancia que tiene una impresora 2D convencional.

El resto de las tolerancias se tomaron en cuenta desde el proceso de diseño y estas se basan en los parámetros descritos en el apartado

Figura 5.2.
Impresora 3D.

2.6 del capítulo dos, donde según la forma y el detalle de la pieza se deben considerar las tolerancias.

Otra componente del optomecanismo que presentó problemas fue la base, ya que generalmente los software de impresión generan de forma automática unos hilos delgados que sirven de apoyo, como una especie de cimbra o andamiaje cuando una geometría tiene superficies en voladizo, sin embargo, en el caso de la base del optomecanismo el software no pudo generar estos apoyos, por lo cual, se intervino directamente en el modelo extrayendo láminas a partir de una cuadrícula dibujada en la planta de la pieza hasta las diversas alturas requeridas para soportar el material.

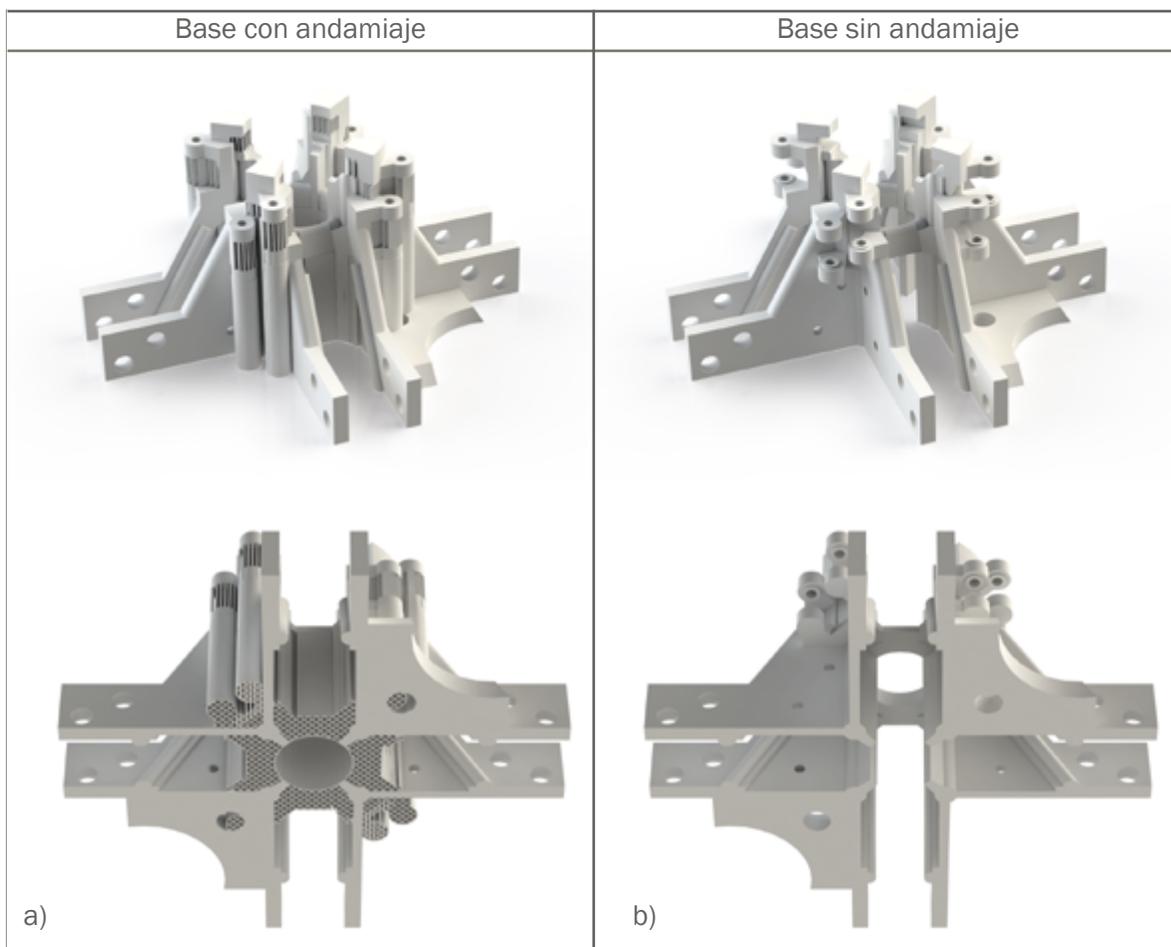


Figura 5.3. Base adaptada a la impresión: (a) dos vistas en perspectiva con estructura de apoyo, (b) dos vistas en perspectiva del modelo original.

La afirmación anterior puede comprenderse mejor a través de la Figura 5.3 que muestra las diferencias entre el modelo con y sin andamios, las láminas del cimbrado tienen un espesor de 0.5 mm con el objetivo de que fueran removidas fácilmente, por la baja resistencia a la cortante que tiene el ABS.

Estratégicamente todas las piezas fueron replanteadas para una mejor impresión con ABS, esto a consecuencia del proceso de prueba, todos a excepción de los soportes que sostienen a los piñones, estas piezas tienen una geometría sencilla y sin voladizos, de dimensiones ideales para que el material no se pandee y de esta forma aprovechar la alta resistencia al esfuerzo cortante que tiene el PLA, para así cumplir con el propósito que tiene la componente.

5.2 Manufactura de la lente

La construcción de la lente es una tarea que comienza a partir del diseño del molde, donde a partir del modelo de la lente se busca una línea de partición del objeto sobre la que no exista alguna pared con ángulo de salida negativo, ya que de otra forma el diseño no permitiría la extracción de la pieza de PDMS.

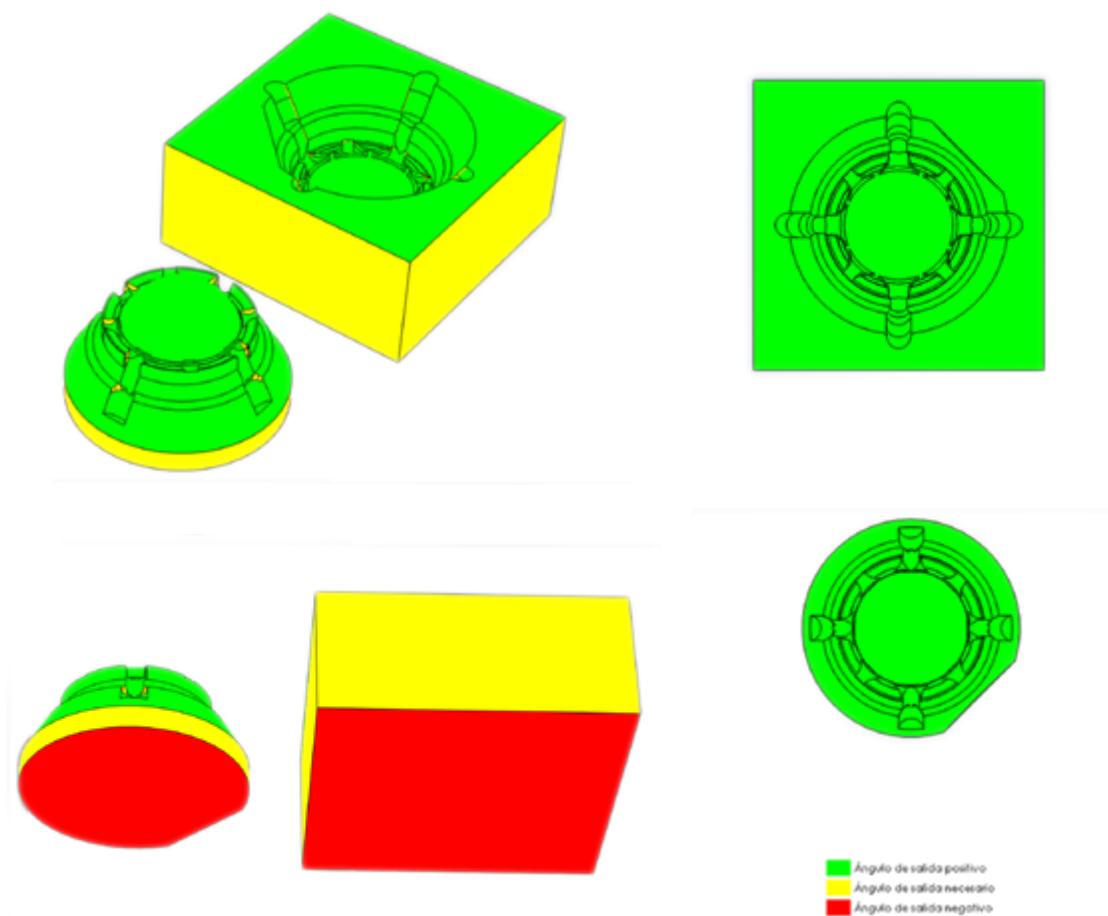


Figura 5.4.
Pruebas en moldes.

La Figura 5.4 muestra el molde de la lente macho en forma cónica y el molde hembra dentro de un prisma rectangular, de este modo, las superficies de interés están iluminadas en color verde, lo cual significa que la pieza de PDMS no se atorará después de fraguar.



Figura 5.5. Preparación de superficie para maquinado.



Figura 5.6. Montaje de material para maquinar y primeros cortes.

Después de diseñar el molde se preparó el material donde se trabajó el maquinado, primero se cortó una porción de 2 mm de longitud a un cilindro de aluminio, posteriormente, las caras transversales del cilindro fueron niveladas dejando al prisma circular una altura de 1.9 mm, mismo que fue perforado y cortado con un machuelo de 1/4" 20NC para después ser atornillado a una placa de PVC expandido, con el propósito de sostener el prisma sobre la cama de la fresadora CNC sobre el cual fue cortado, este procedimiento se describe en la Figura 5.5 y 5.6 de las siguientes páginas.



a)



b)



c)



d)

Figura 5.7. Moldes maquinados y acabado final: (a) molde hembra, (b) molde macho, (c) ensamble de los moldes, (d) pulido de los moldes.

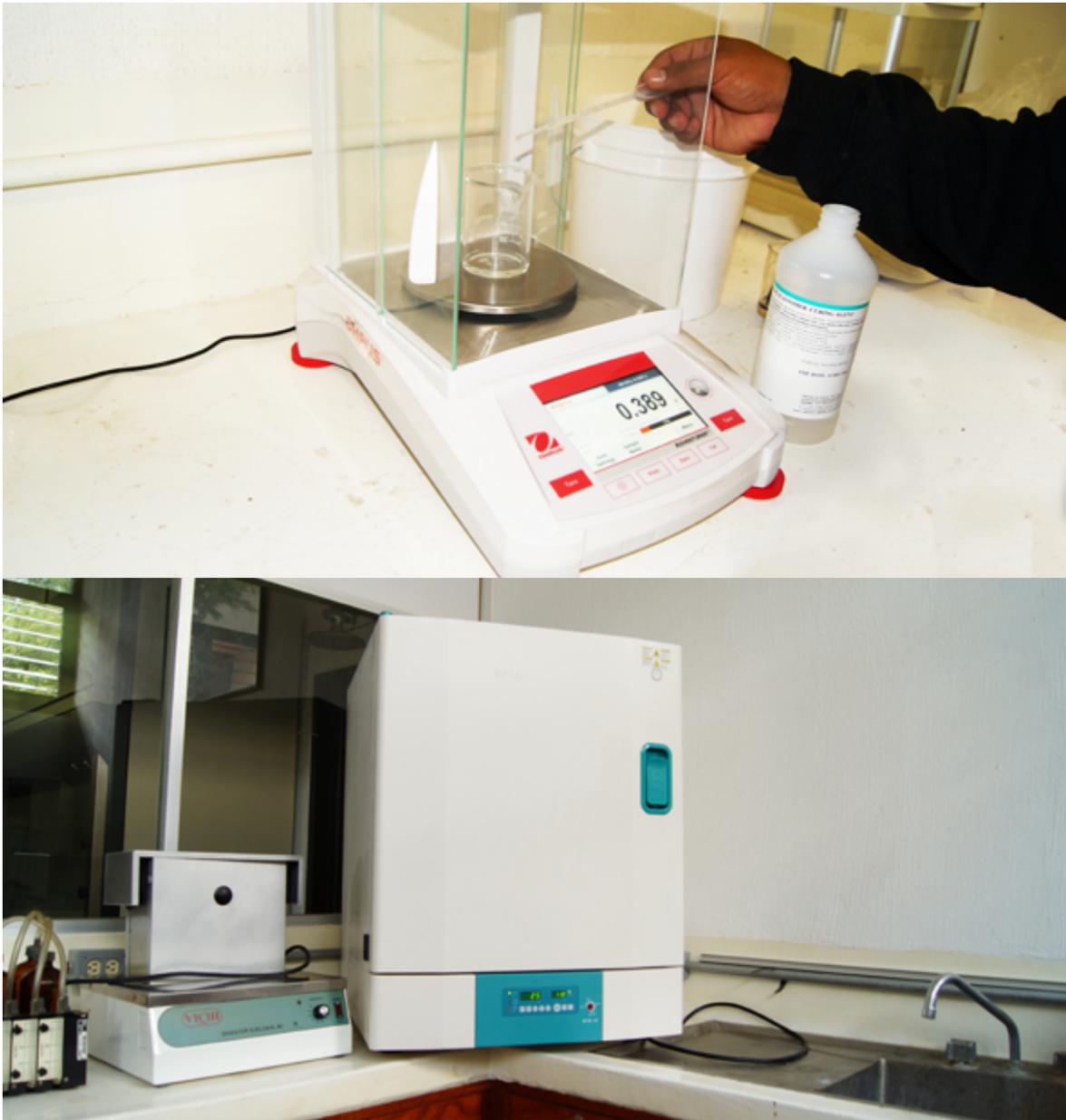


Figura 5.8.
Curado de la lente.

Una vez maquinados los moldes [ver Figura 5.7 (a), (b)] la resolución del acabado no fue suficiente, pese haber utilizado un cortador de 1/32 con punta esférica avanzando 0.01 mm sobre los tres ejes, por esta razón, los moldes fueron pulidos cuidadosamente [ver Figura 5.7(d)] con una rueda de lana fieltro hasta desaparecer las aristas consecuencia de la definición de la fresadora CNC.

Después, los moldes se limpiaron bien y se vertió 2 ml de PDMS Silgard 184 con 0.2 ml de catalizador, entonces la lente se fabricó en proporción 10:1 y bajo una temperatura de curado de 100 °C durante 30 minutos (Márquez 2019).

El resultado se presenta en la Figura 5.9, la extracción se facilitó gracias al diseño de unos canales donde desemboca el excedente del PDMS líquido, estos siguen la trayectoria de los cabos de la lente y permiten el acceso de aire a presión para auxiliar la separación de las contrapartes.



Figura 5.9. Lente desmoldada.

5.3 Ensamble

Una vez ensamblado todo el sistema optomecánico (ver figura 5.10), se hicieron pruebas de funcionamiento para determinar el comportamiento de la lente cuando es deformada. El siguiente apartado describe los resultados de las pruebas, que consisten en la manipulación del sistema con ayuda del control electrónico, el cual mediante un esfuerzo radial colocó a los cuatro cabos de la lente en diferentes posiciones.

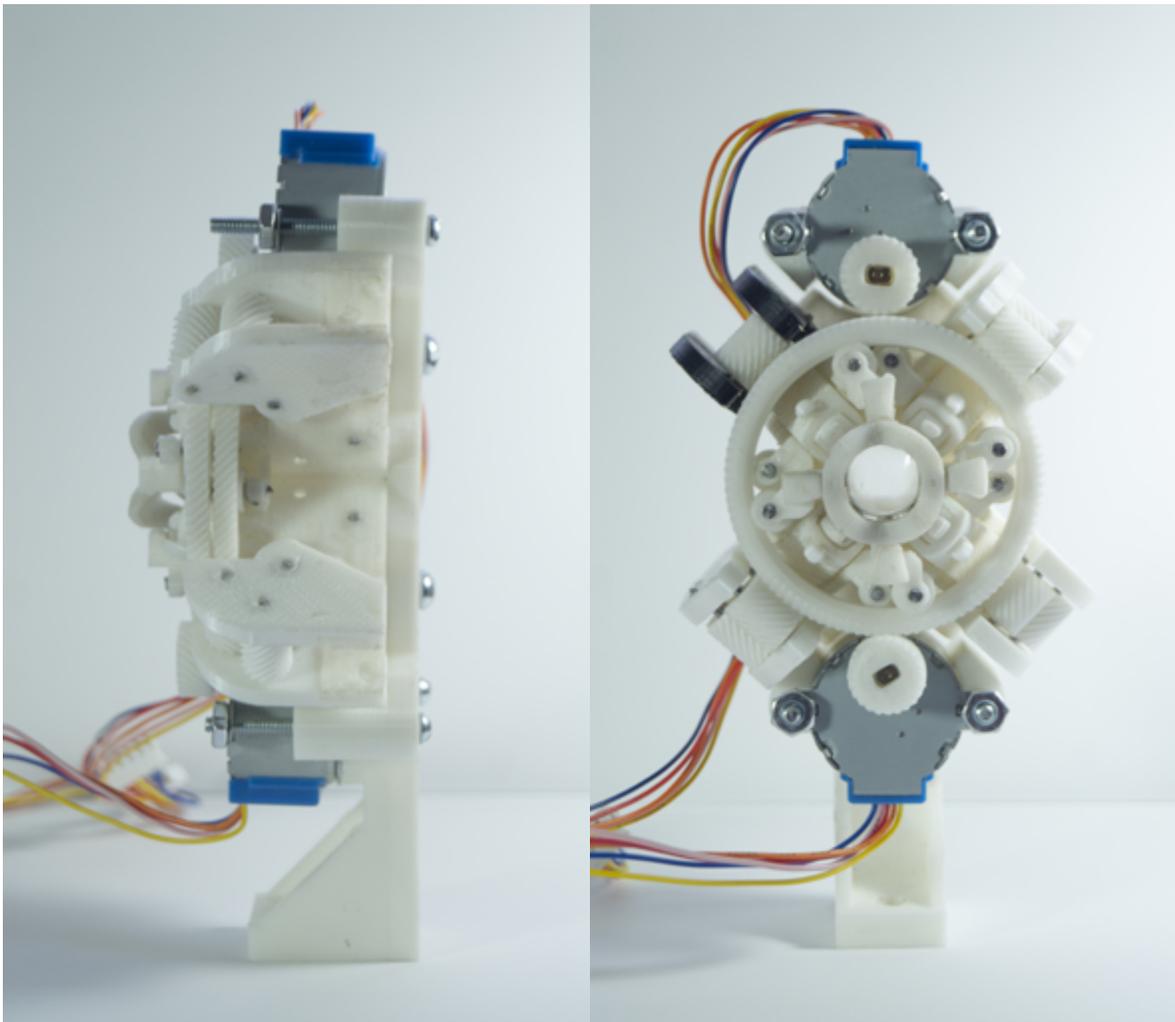


Figura 5.10. Ensamble de la montura optomecánica para introducir errores refractivos de bajo orden.

Capítulo 6

Resultados, conclusiones y trabajo a futuro

.....

6.1 Resultados

En la Figura 6.1 (a) se presenta el optomecanismo cuando la lente se encuentra en reposo, es decir, en la posición inicial sin algún esfuerzo aplicado a la lente.

La Figura 6.1 (b) muestra la misma lente, pero en posición de compresión desde los cuatro puntos simétricos, como resultado puede apreciarse la deformación de la lente y el cambio de curvatura. Finalmente, en la Figura 6.1 (c) es más perceptible este cambio debido a que los cuatro cabos están sometidos a la tensión, mientras que los cordones de la lente conservan su posición.

De esta manera, el prototipo final cumple su función como montura optomecánica para introducir errores de bajo orden. Las pruebas de evaluación fueron realizadas en el Laboratorio de Ciencias de la Imagen y Física de la Visión del INAOE en Puebla.

Haciendo énfasis se observa distorsión de curvatura en la imagen presentada por la lente en el inciso b) y c), se indica la presencia de errores refractivos de bajo orden.

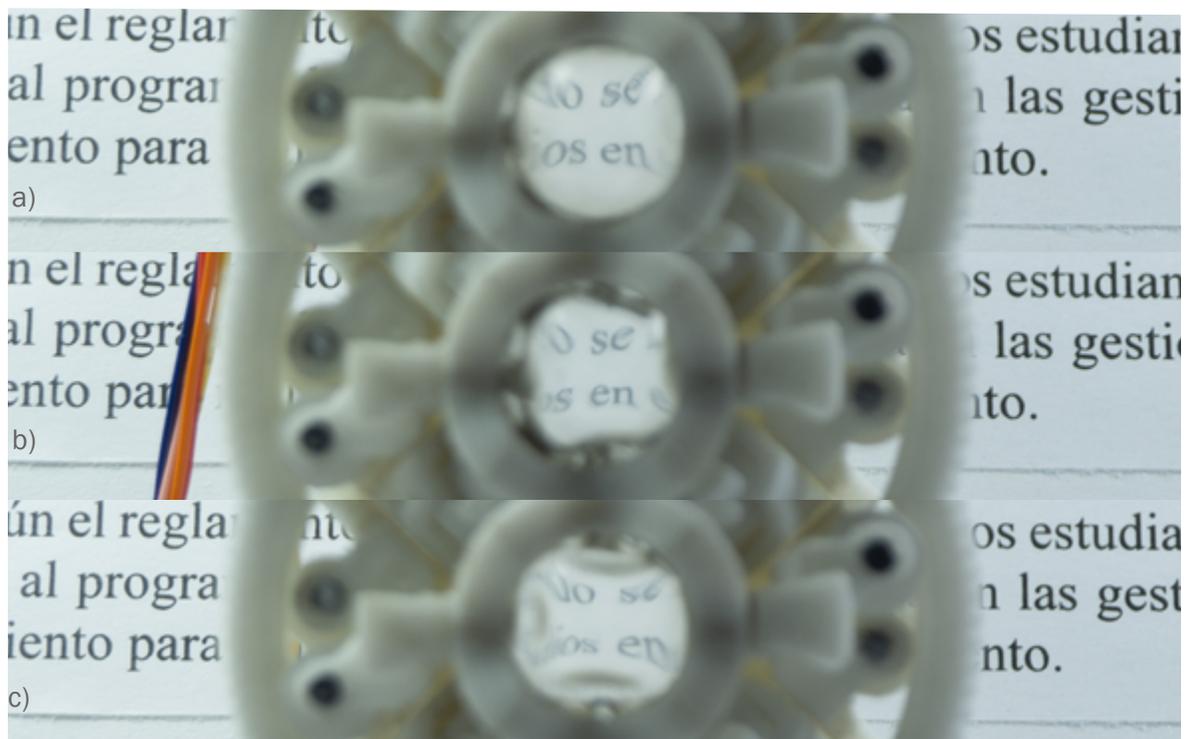


Figura 6.1. Montura optomecánica en función. (a) Lente en reposo. (b) Deformación de la lente aplicando cargas mecánicas sobre los cuatro cabos en dirección hacia el centro geométrico de la lente. (c) Deformación lente tirando de los cuatro cabos hacia el exterior.

6.2 Conclusiones

Mediante la estructura metodológica de Ulrich & Eppinger, se completaron las fases para la ejecución de un prototipo final, la primera fase llamada planeación, mostró el reconocimiento del producto, es decir, el diseño y construcción de un dispositivo para deformar parcialmente una lente hecha de PDMS para ser utilizado sobre una cubierta óptica universal, lo que dio paso al cumplimiento de los objetivos que a continuación se enlistan:

1. El producto fue definido mediante los requerimientos arrojados por el usuario, se crearon objetivos a partir de las características en las aberraciones de bajo orden y el benchmarking con las monturas AC-1A, SCL60C, 830-0035-02 y X-Y 12.7 mm.
2. A través de los requerimientos del producto se desarrollaron posibles soluciones al problema de diseño, esto permitió diseñar modelos digitales de monturas optomecánicas con 2 y 4 motores.
3. Los modelos digitales propuestos fueron estudiados a través de un software comercial de Análisis de Elemento Finito. De esta forma, se eligió el prototipo MO2MP1.
4. Se generaron los planos y se imprimieron todos los elementos de la montura optomecánica MO2MP1 optimizado, mediante un software de diseño asistido por computadora y de manufactura asistida por computadora (CAD/CAM). También se fabricó la lente de PDMS a través de la manufactura de unos moldes de aluminio mediante el mismo tipo de software para la realización del maquinado.
5. Se ensambló el prototipo final y se hizo la prueba de funcionamiento que muestra los resultados esperados.

A través de la fase de diseño de concepto de la metodología aplicada, se resolvieron las necesidades del producto, dicha acción se complementó con la técnica VDC que consiste en reutilizar los modelos conceptualizados para optimizar sus funciones gradualmente, lo que más tarde daría paso a la creación de los prototipos MO4MP1, MO4MP2 y MO2MP1.

La fase de diseño a nivel sistema se complementó con los principios de diseño mecánico, lo que facilitó la impresión de los componentes,

al mantener una cara plana en cada pieza, adicionalmente, la fase de diseño a detalle dejó una serie de mediciones en los prototipos que ayudó a seleccionar al prototipo con mejor funcionalidad.

El prototipo MO2MP1 fue seleccionado como resultado de la fase de diseño a nivel sistema y la fase de diseño a detalle, donde este prototipo destacó por los desplazamientos máximos alcanzados de 2.4 mm, lo que mostró un mejor comportamiento de la lente en términos de funcionalidad. En la fase de pruebas y refinamiento, este prototipo se perfeccionó mediante análisis estáticos que mejoraron el funcionamiento en el diseño de sujeción de la lente y el bastidor que sostiene el sistema.

Finalmente, la construcción y ensamble del optomecanismo tuvo lugar en la fase de inicio de producción bajo el sistema de producción bajo pedido.

El proceso para diseñar y fabricar esta montura optomecánica para introducir errores refractivos, puede considerarse como un prototipo alfa, el cual puede evolucionar y optimizarse con el acceso a tecnologías más avanzadas, sin embargo, el proyecto es una aportación al diseño de artefactos que la ingeniería en diseño puede desarrollar en el campo de la física óptica.

Este trabajo muestra como la Ingeniería en Diseño puede coadyuvar a otras áreas científicas, de esta forma, la solución de este problema de diseño podría homologarse a otros casos, por lo tanto, la metodología más los principios de diseño y técnicas aplicadas son pertinentes en problemas de diseño somático multidisciplinarios.

6.3 Trabajo a futuro

Un factor fundamental en el trabajo a futuro es la reducción de volumen que va de la mano con la experimentación de impresión o fabricación con otros materiales, lo cual podría aportar a la durabilidad del artefacto.

Otra acción de seguimiento a este trabajo tiene que ver con el ensamble de otros sistemas optomecánicos que puedan complementar la función de esta montura, tal es el caso de la función del cristalino u otra superficie de asfericidad variable que convenga para la experimentación en la óptica visual y pueda ser ensamblado en una sola montura.

La cuantificación de los errores refractivos es un trabajo extenso y bien podría ser un tema de tesis relevante en el área de la física óptica, por esta razón no se incluye en este trabajo.

Referencias

.....

- Abeykoon, C., Sri-Amphorn, P., & Fernando, A. (2020). Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(3), 284-297. Ahmad, A. (2017). *Handbook of Optomechanical Engineering*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Angel S. Cruz-Felix. (2015). Manufacture and analysis of a refractive surface with variable asphericity to model the human cornea. SPIE.
- Antún-Callaba, J., & Ojeda-Toche, L. (2002). "Benchmarking" de procesos logísticos. Ciudad de México: Ingeniería. Investigación y Tecnología.
- Arias, H. N., Molina, P. M., & Meneses, F. J. (2015). Reconstrucción de objetos por perfilometría interferométrica con sistema de posicionamiento de mira periódica. DYNA.
- Berchon, M. (2014). La impresión 3D. Guía para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales y manitas engeneral. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili, SL.
- Bicharra, G. A., Kunz, J., Fischer, M., & Pinto, G. M. (2004). Cómo dejar atrás esas reuniones eternas. Harvard: Harvard Business Review.
- Carles Riba, A. M. (2006). Ingeniería Concurrente: Una metodología integradora. Barcelona, España.
- Chaur, J. B. (2004). Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Clarkson, J., & Huhtala, M. (2005). *Engineering Design. Theory and practice. A symposium in honour of Ken Wallace*. Cambridge UK: edc Cambridge.
- Cruz-Félix, A. S. (Diciembre de 2012). Análisis de nuevos perfiles de ablación corneales para la corrección de la visión humana. Sta. Ma. Tonantzintla, Pue, México: INAOE.
- Cruz-Felix, A. S. (2015). Manufacture and analysis of a refractive surface with variable asphericity to model the human cornea. SPIE.
- Darío, R. M. (2009). PROTOTIPOS RÁPIDOS Y REFLEXIÓN CRÍTICA COMO HERRAMIENTAS PARA ENSEÑAR EL DISEÑO CAD 3D-2D . *Graphica* '09.
- Dixon, J. R., & Poli, C. (1995). *Engineering Design and Design for Manufacturing: A Structured Approach* . Charlottesville, VA: Field Stone Pub.
- Edmund Optics. (24 de Abril de 2019). Edmund Optics Worldwide. Obtenido de www.edmundoptics.com
- EKSMA Optics. (24 de Abril de 2019). EKSMA Optics. Obtenido de www.eksmaoptics.com: <http://eksmaoptics.com/opto-mechanical-components/optical-mounts-830>
- Farah, S. A. (2008). Diseño y fabricación en la instrumentación astronómica: OSIRIS. México D.F.: UNAM.
- Federico Carpi, G. F. (2011). Bioinspired Tunable Lens with Muscle-Like Electroactive Elastomers. *Advanced Functional Materials*, 4152–4158.
- Fernández, J. G., López, G. V., Sánchez, L. R., & Antuña, N. R. (2010). DFMA, DISEÑO PARA FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE. Gijón Asturias : Fundación Prodintec. .
- French, M. (1994). An annotated list of design principles. U.K: Lancaster University. Lancaster UK: Springer.

Referencias

- G. Beadie, M. L. (2008). Tunable polymer lens . OPTICS EXPRESS , 11847-11857.
- García, J. M. (2019). Caracterización de un compuesto polimérico al modificar sus parámetros de síntesis para generar elementos refractivos sintonizables. Huajuapán de León. OAX: UTM.
- García, J. R. (1997). Fundamentos de óptica geométrica. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Garzón-Alvarado, D. A., Roa, M. A., & Ramírez, A. M. (2008). Modelado computacional del globo ocular ante cargas de presión intraocular . Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas.
- Girotra, K., Terwiesch, C., & Ulrich, K. (2010). Idea Generation and the Quality of the Best Idea. Pennsylvania: Management Science.
- Hofer, H. A. (2001). Dynamics of the eye's wave aberration. Journal of the Optical Society of America A, 497-506.
- Irene Simonini, A. P. (2015). Customized Finite Element Modelling of the Human Cornea. PLOS ONE, 23.
- ISO. (2019). International Organization for Standardization. Obtenido de www.iso.org
- Juan Rafael León Rojas, C. E. (2013). El ojo. Miztli Tepatli(2).
- Kailash, K. S. (2006). Optics: Principles and Applications. London UK: Elsevier.
- Katz, M. (2002). Introduction to geometrical optics. New Jersey: World Scientific.
- Khanzode, A., Fischer, M., Reed, D., & Ballard, G. (2006). A Guide to Applying the Principles of Virtual Design & Construction (VDC) to the Lean Project Delivery Process. Stanford, CA: Center for Integrated Facility Engineering.
- Kunz, J., & Fischer, M. (2012). Virtual Design and Construction: Themes, Case Studies and Implementation Suggestions. Stanford, CA: Center for integrated Facility Engineering.
- Kuo, A. C. (1999). Polymer Data Handbook. Oxford UK: Oxford University Press, Inc.
- M.D. Peces Peña, J. M. (2012). El globo ocular y los anexos oculares. El sistema visual y los reflejos oculares. En C. Borobia, Valoración del daño corporal. Medicina de los seguros. (págs. 22-31). Barcelona, España: Elsevier Masson .
- Malacara, D. (2015). Óptica básica. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica .
- Marín, M. C. (2006). Óptica Fisiológica: el sistema óptico del ojo y la visión binocular. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Marlon Andrés Osorio-Delgado, L. J.-T.-C.-G.-M.-R.-G.-T.-H. (2017). Biomedical applications of polymeric biomaterials. DYNA, 241-252.
- Mohammad, N. T., Foster, C., & Gongal, D. (2014). Finite element modelling of cornea mechanics: a review. SciELO Analytics, 60-65.
- Murillas, F. J. (2016). Diseño conceptual mediante técnicas VDC - Virtual Design and Construction- como herramienta en la gestión de proyectos. España : Universidad de la Rioja .

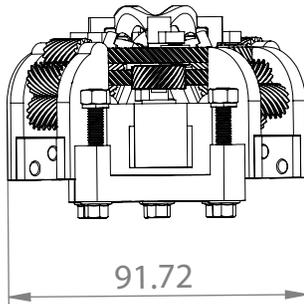
Referencias

- Newport. (16 de Abril de 2019). www.newport.com. Obtenido de <https://www.newport.com/p/AC-1A>
- Olarte, V. R. (2011). Entendiendo e interpretando las aberraciones ópticas. *cien. tecnol. salud. vis. ocul*, 105-122.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. (2007). *Engineering Design*. London, UK: Springer.
- Reyes Rodríguez, A. (2018). ESTUDIO DE TOLERANCIAS DE DISTINTAS TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D.
- Reyes, V. H. (2012). Análisis de ingeniería del sistema de sujeción de una lente sólida elástica a una montura mecánica. Huajuapán de León, Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca .
- Robledo, M. N. (2015). *Impresión 3D aplicada a la optomecánica*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Robson, D. (19 de Enero de 2015). Por qué hay tantas personas con miopía en el mundo. BBC World.
- Rosales, M. A., Juárez, M. A., López, E. O., Ibarra, J., & Tepichín, E. (2009). Anterior corneal profile with variable asphericity. *APPLIED OPTICS*, 6594-6599.
- Sabelotodo.org. (s.f.). www.sabelotodo.org. Obtenido de Anatomía del globo ocular humano: <http://www.sabelotodo.org/anatomia/globoocular.html>
- Sagrario, M. M. (2004). *Óptica geométrica*. Barcelona: Ariel.
- Salazar-Serrano, L. J., Torres, P. J., & Valencia, A. (2017). A 3D Printed Toolbox for Opto-Mechanical. *PLOS ONE*, 1371.
- Santiago-Alvarado. (2009). Propiedades físico-químicas de membranas PDMS empleadas en lentes líquidas. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, 61-66.
- SEGOB. (2019). Diario Oficial de la Federación. Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4824044&fecha=22/12/1986
- STANDA LTD. (25 de Abril de 2019). Standa. Obtenido de [www.standa.lt: http://www.standa.lt/products/catalog/mounts_accessories?item=155&prod=mounting_posts_12_mm_series&print=1](http://www.standa.lt/products/catalog/mounts_accessories?item=155&prod=mounting_posts_12_mm_series&print=1)
- Tepichín, E. L.-O.-d.-I.-L.-Z. (3 de Noviembre de 2011). Objective performance of a set of uncorrected 20/20 normal eyes: clinical reference. Obtenido de SPIE.DIGITAL LIBRARY: <http://dx.doi.org/10.1117/12.902211>
- ThorLabs. (17 de Abril de 2019). ThorLabs. Obtenido de www.thorlabs.com: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8220&pn=SCL60C
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- World Health Organization. (2019). *World report on vision*.
- Yanguas, F. G. (2001). Ingeniería y diseño. *DYNA*, 25-27.
- Yoder, P. J., & Vukobratovich. (2015). *Opto-Mechanical Systems Design*. Boca Raton, FL. Tylor & Francis Group.

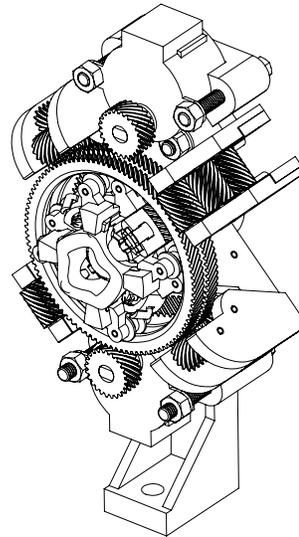
Referencias

Anexos

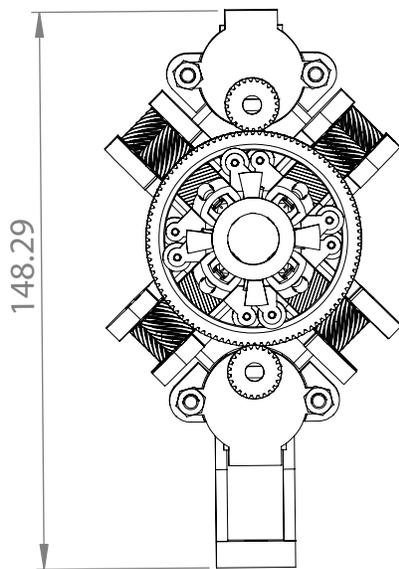
.....



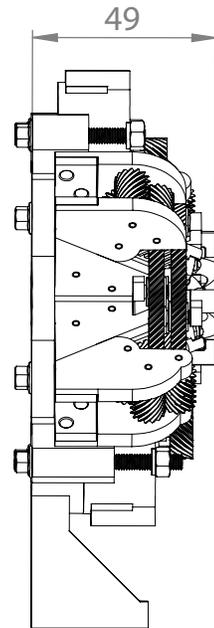
VISTA SUPERIOR



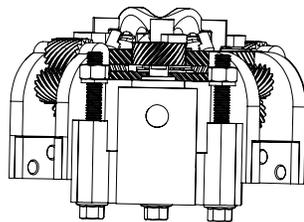
ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



VISTA INFERIOR



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-01

PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECAÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

1:2

TOLERANCIA:

VARIAS

HOJA:

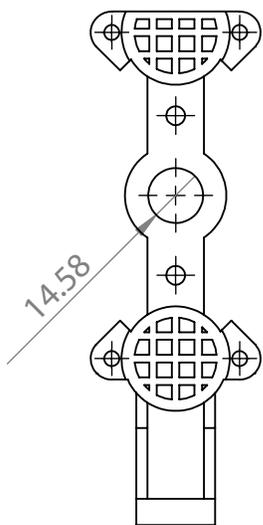
01 DE 25

DIBUJANTE:

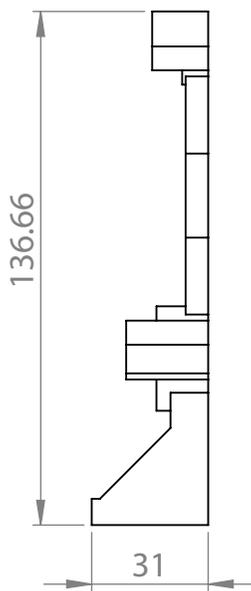
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

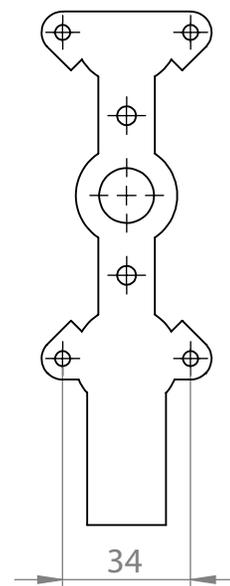
MONTURA OPTOMECAÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN



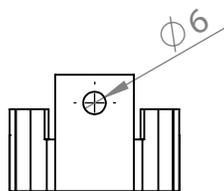
VISTA FRONTAL



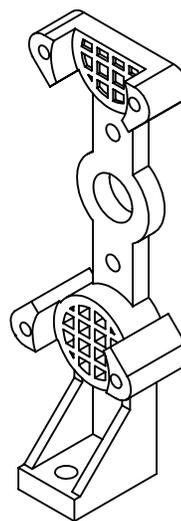
VISTA LATERAL



VISTA POSTERIOR



VISTA INFERIOR



ISOMÉTRICO



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-02

PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECAÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

1:2

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

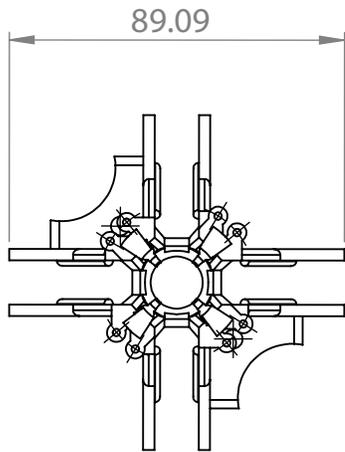
02 DE 25

DIBUJANTE:

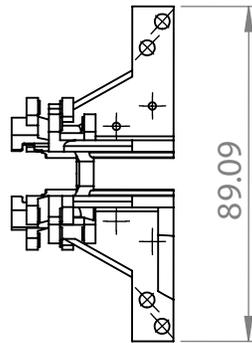
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

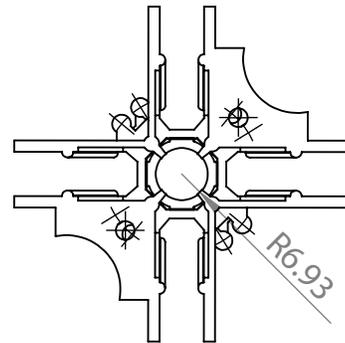
BASTIDOR



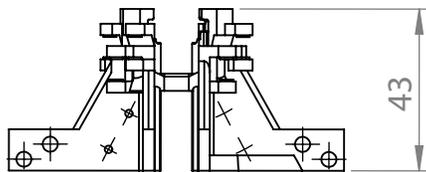
VISTA FRONTAL



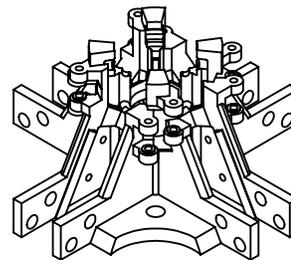
VISTA LATERAL



VISTA POSTERIOR



VISTA SUPERIOR



ISOMÉTRICO



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-03

PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

1:2

TOLERANCIA:

VARIAS

HOJA:

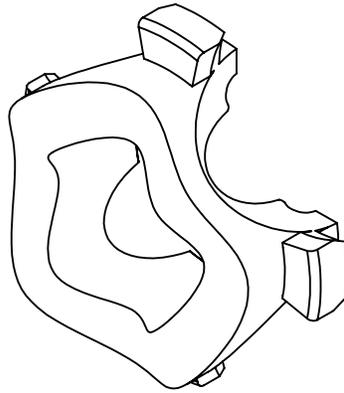
03 DE 25

DIBUJANTE:

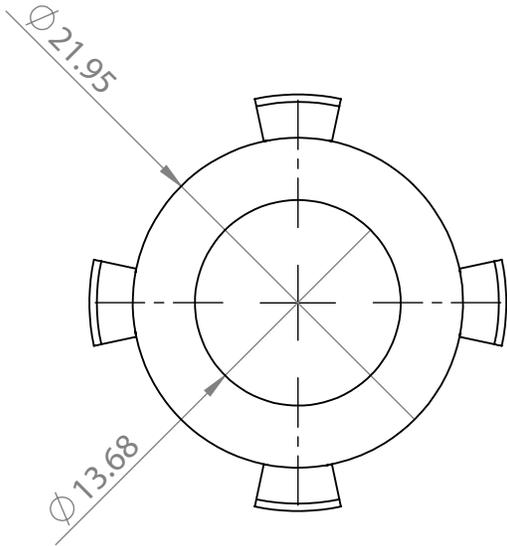
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

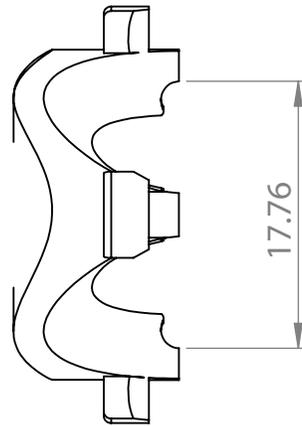
BASE



ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-04

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

2:1

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

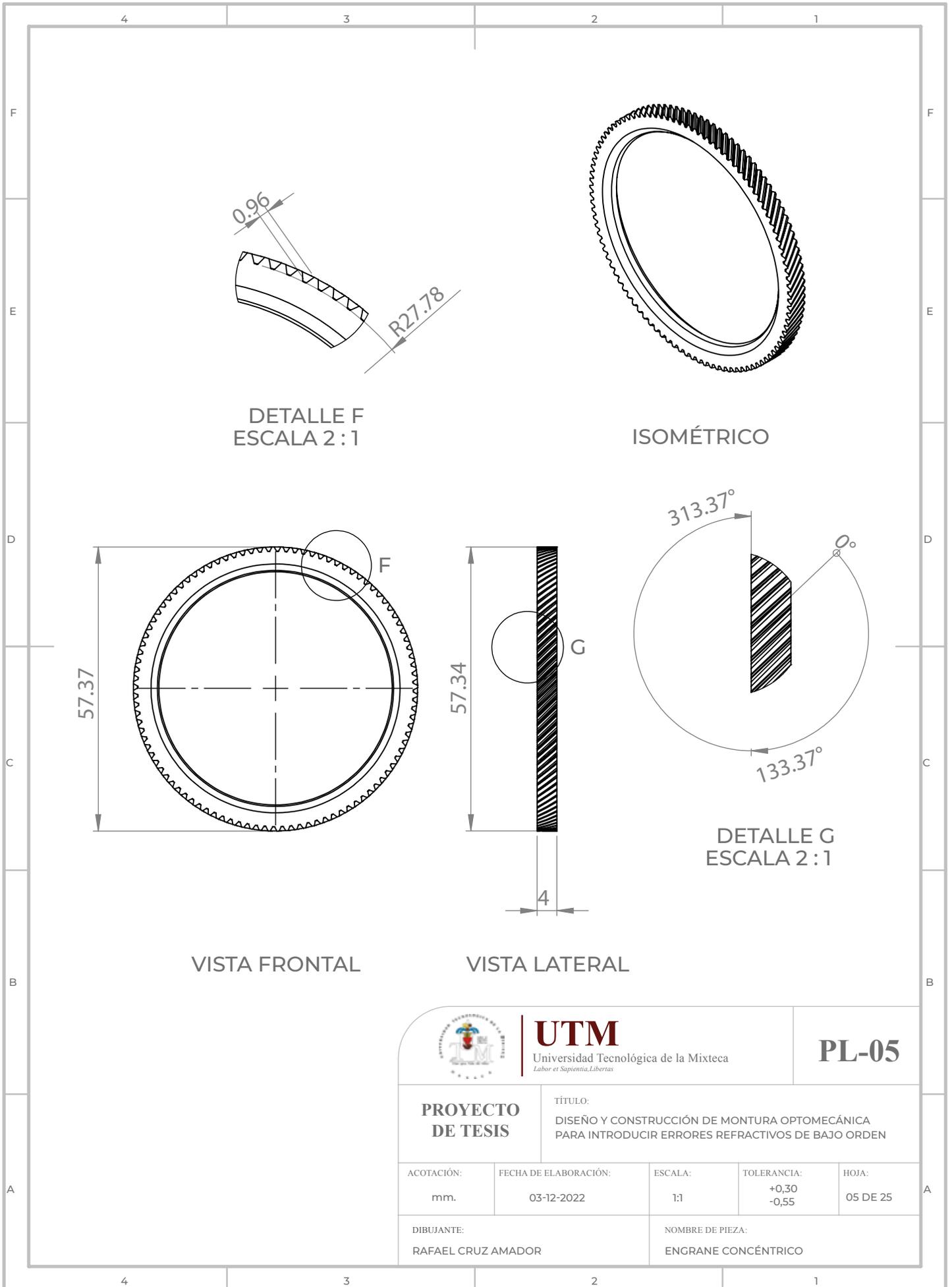
04 DE 25

DIBUJANTE:

RAFAEL CRUZ AMADOR

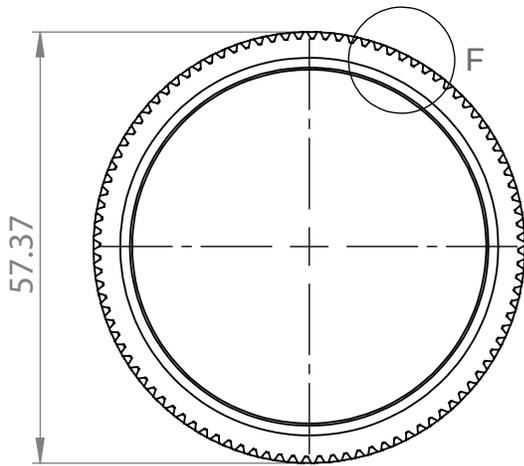
NOMBRE DE PIEZA:

TAPA CENTRAL

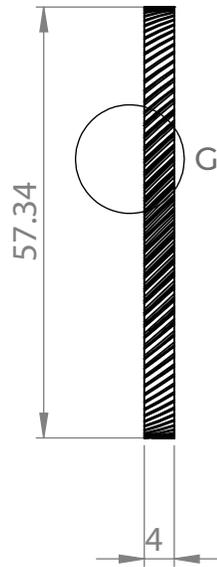


DETALLE F
ESCALA 2 : 1

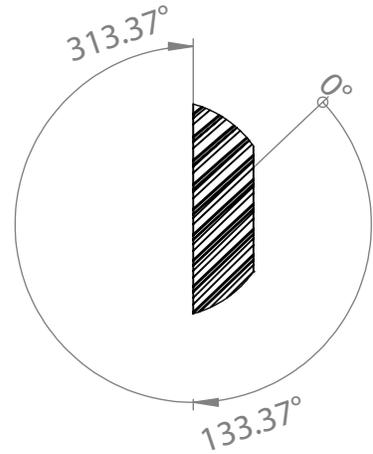
ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL

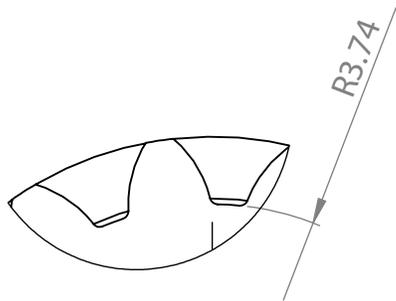


VISTA LATERAL

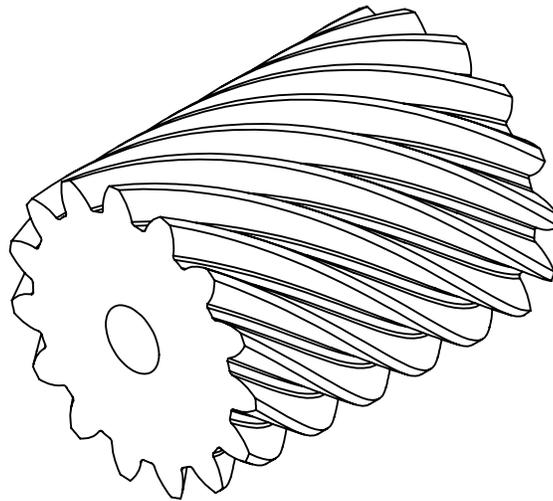


DETALLE G
ESCALA 2 : 1

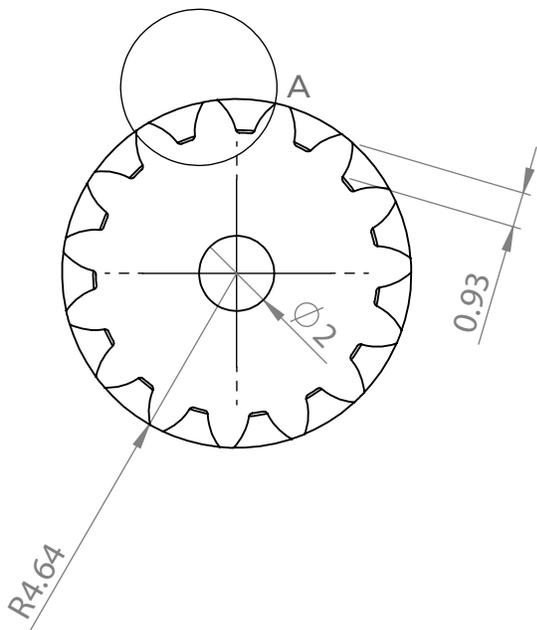
 UTM Universidad Tecnológica de la Mixteca <i>Labor et Sapientia, Libertas</i>		PL-05		
PROYECTO DE TESIS		TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN		
ACOTACIÓN:	FECHA DE ELABORACIÓN:	ESCALA:	TOLERANCIA:	HOJA:
mm.	03-12-2022	1:1	+0,30 -0,55	05 DE 25
DIBUJANTE: RAFAEL CRUZ AMADOR		NOMBRE DE PIEZA: ENGRANE CONCÉNTRICO		



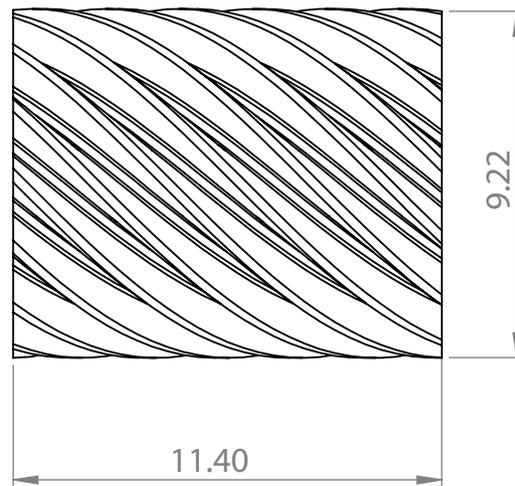
DETALLE A
ESCALA 10 : 1



ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-06-A

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

5:1

TOLERANCIA:

+0,30
-0,55

HOJA:

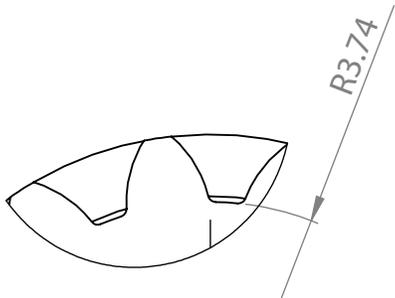
06 DE 25

DIBUJANTE:

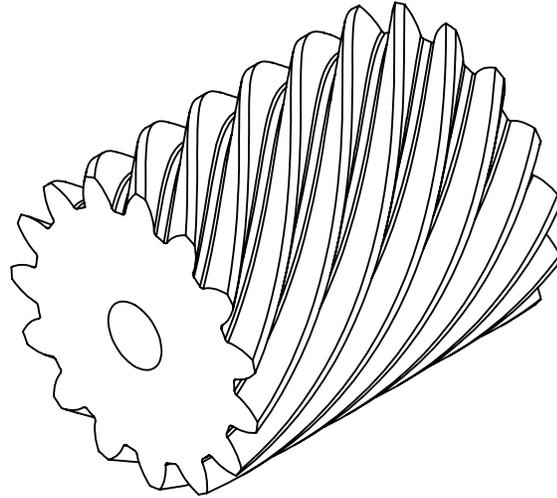
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

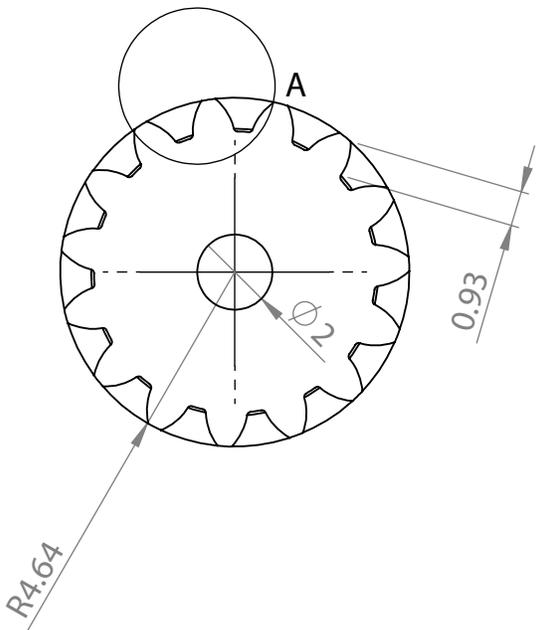
PIÑÓN - CREMALLERA A



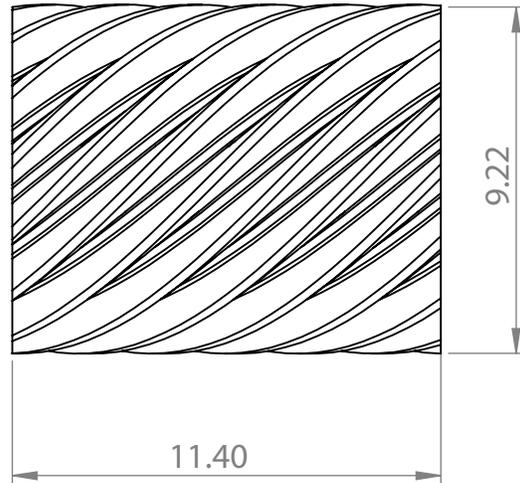
DETALLE A
ESCALA 10:1



ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-06-B

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECAÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

5:1

TOLERANCIA:

+0,30
-0,55

HOJA:

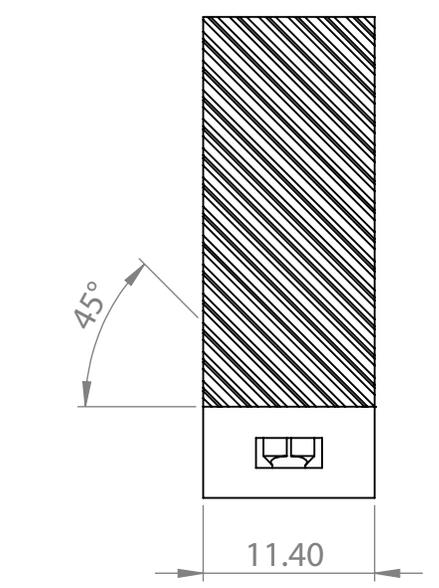
06 DE 25

DIBUJANTE:

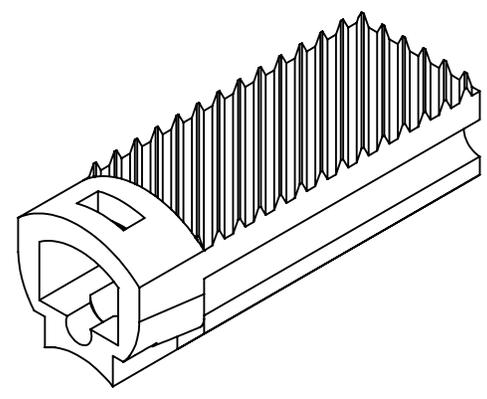
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

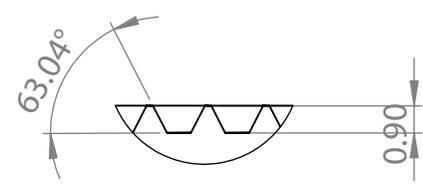
PIÑÓN - CREMALLERA B



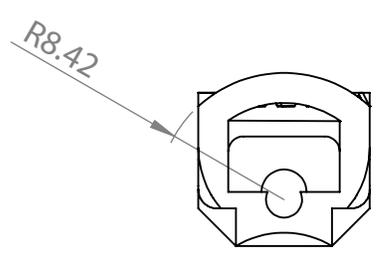
VISTA SUPERIOR



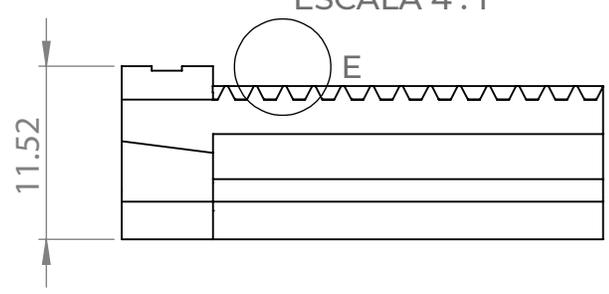
ISOMÉTRICO



DETALLE E
ESCALA 4 : 1



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



UTM
Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-07

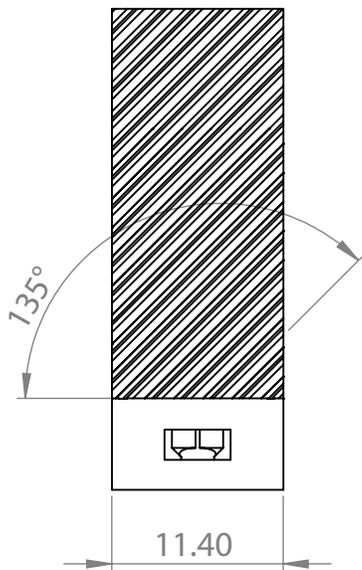
PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

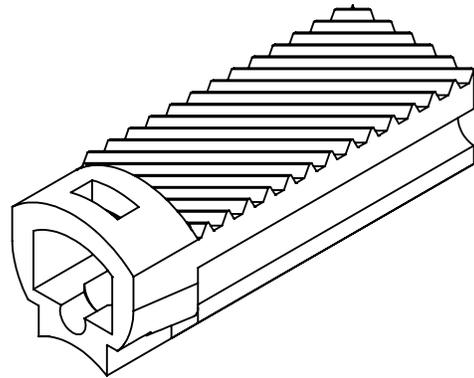
ACOTACIÓN: mm.	FECHA DE ELABORACIÓN: 03-12-2022	ESCALA: 2:1	TOLERANCIA: +0,30 -0,55	HOJA: 07 DE 14
-------------------	-------------------------------------	----------------	-------------------------------	-------------------

DIBUJANTE:
RAFAEL CRUZ AMADOR

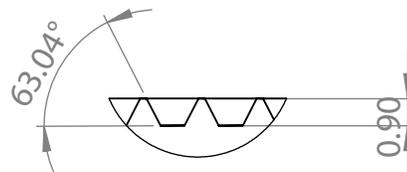
NOMBRE DE PIEZA:
CREMALLERA DERECHA



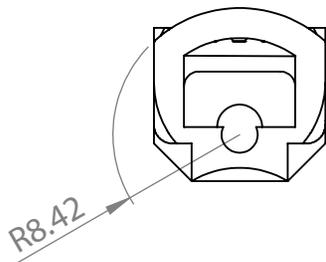
VISTA SUPERIOR



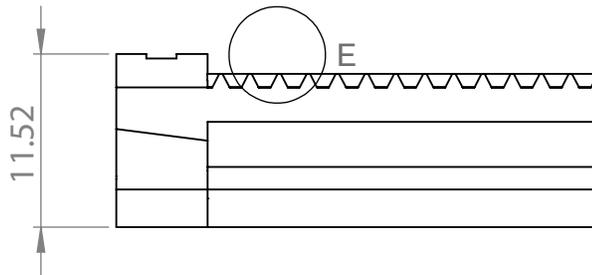
ISOMÉTRICO



DETALLE E
ESCALA 4:1



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-08

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

2:1

TOLERANCIA:

+0,30
+0,55

HOJA:

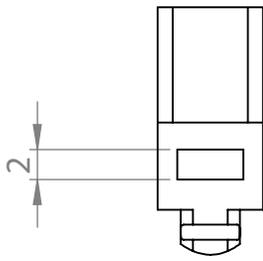
08 DE 25

DIBUJANTE:

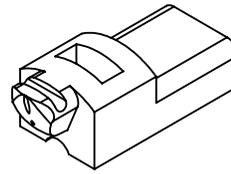
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

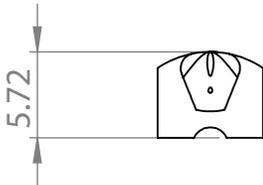
CREMALLERA IZQUIERDA



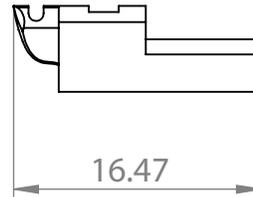
VISTA SUPERIOR



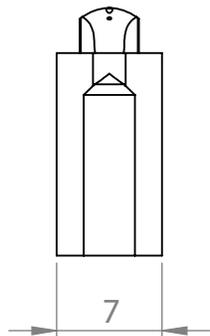
ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



VISTA INFERIOR



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-09

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

2:1

TOLERANCIA:

+0,30
-0,05

HOJA:

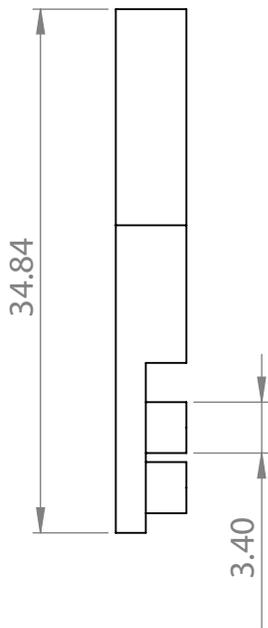
09 DE 25

DIBUJANTE:

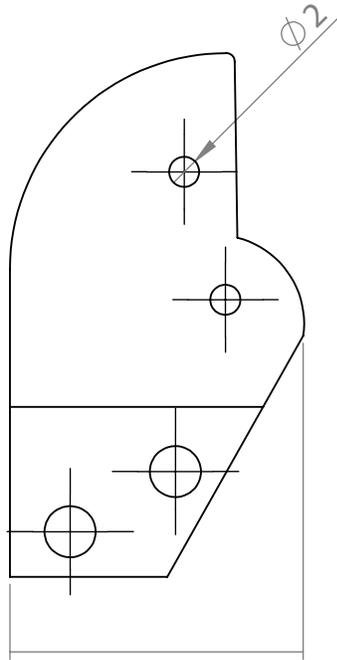
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

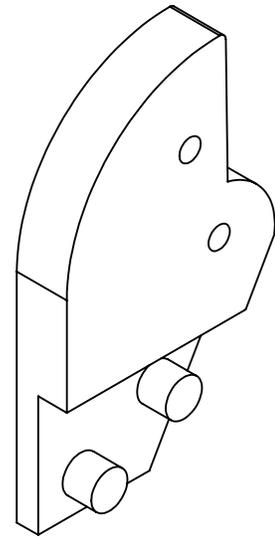
TAPA - CELDA



VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL



ISOMÉTRICO



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-10

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

2:1

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

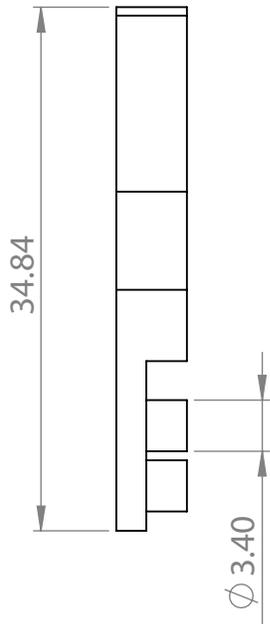
10 DE 25

DIBUJANTE:

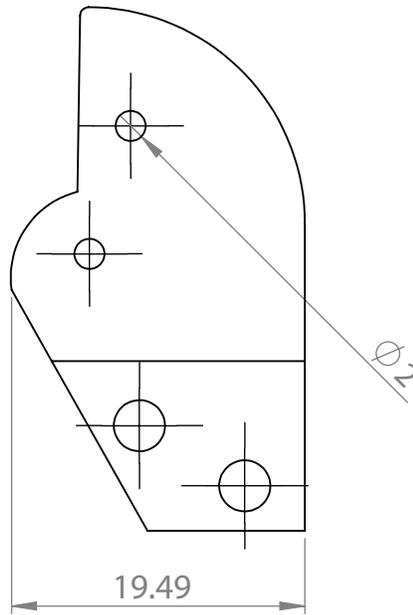
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

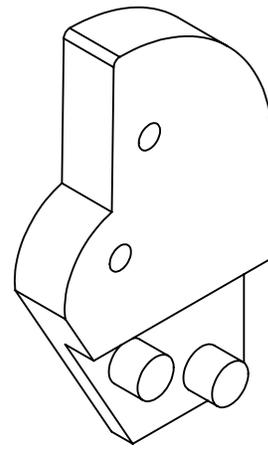
SOPORTE - 2 PIÑONES A



VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL



ISOMÉTRICO



UTM

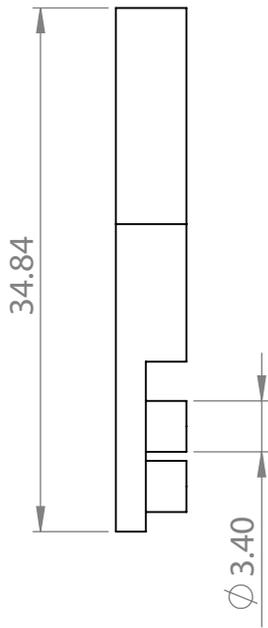
Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-11

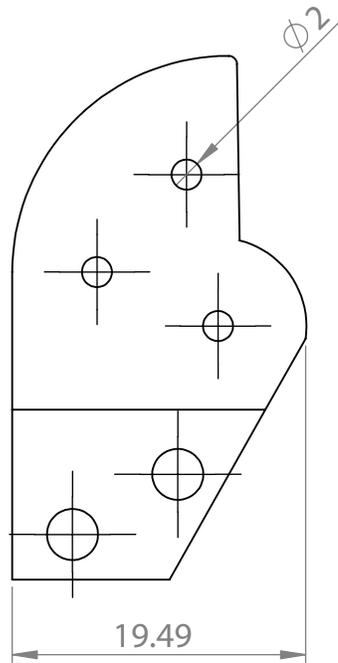
PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECAÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

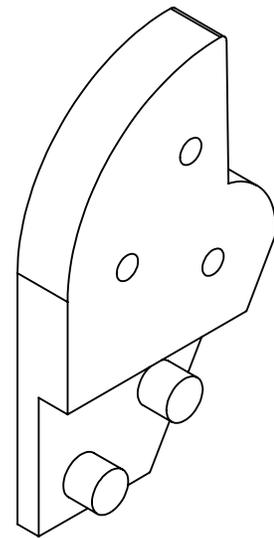
ACOTACIÓN: mm.	FECHA DE ELABORACIÓN: 03-12-2022	ESCALA: 2:1	TOLERANCIA: +0,05 +0,00	HOJA: 11 DE 25
DIBUJANTE: RAFAEL CRUZ AMADOR		NOMBRE DE PIEZA: SOPORTE - 2 PIÑONES B		



VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL



ISOMÉTRICO



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-12

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

2:1

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

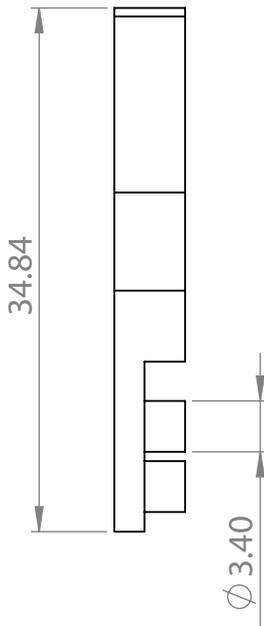
12 DE 25

DIBUJANTE:

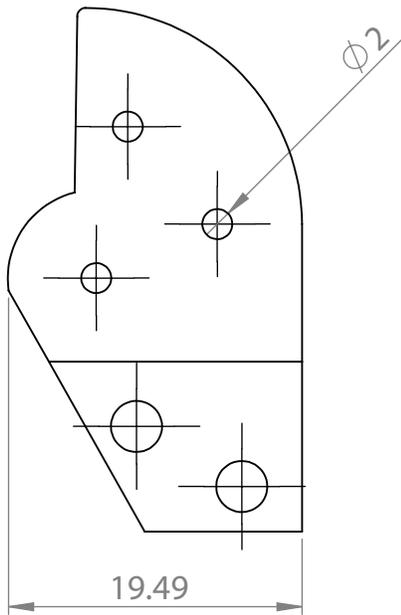
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

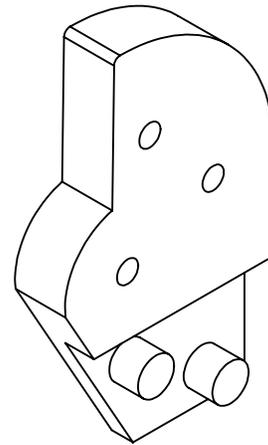
SOPORTE - 3 PIÑONES A



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



ISOMÉTRICO



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-13

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

2:1

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

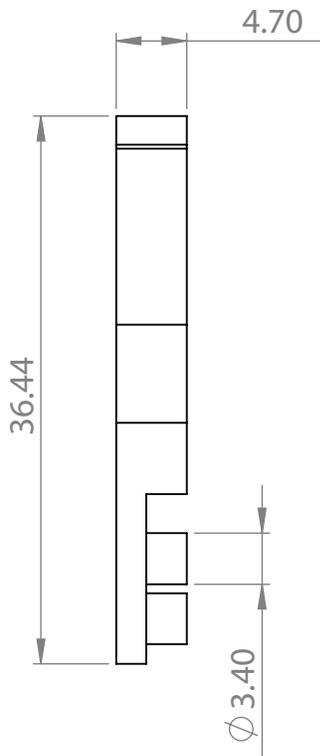
13 DE 25

DIBUJANTE:

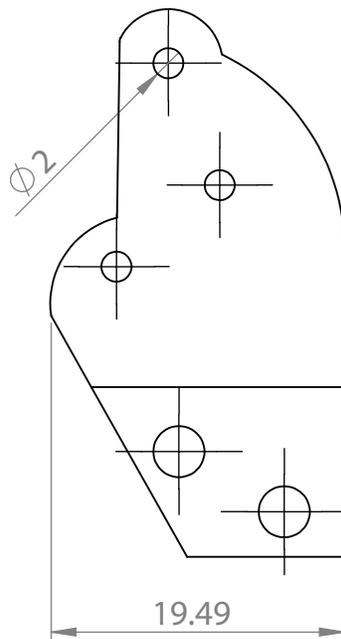
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

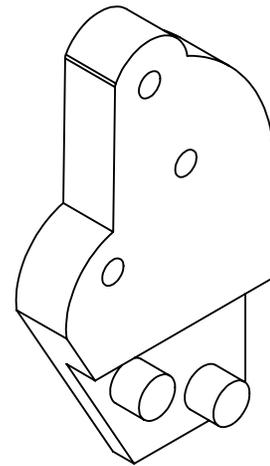
SOPORTE - 3 PIÑONES B



VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL



ISOMÉTRICO



UTM

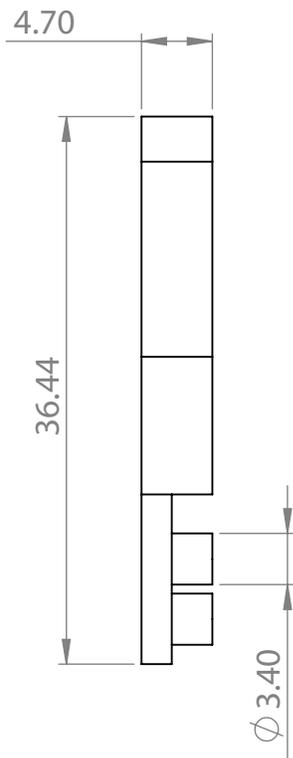
Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-14

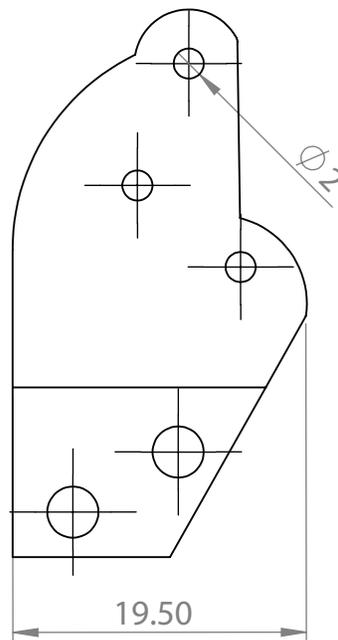
PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

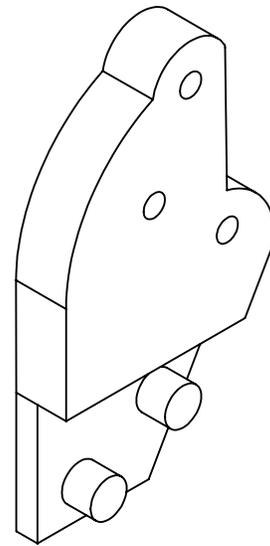
ACOTACIÓN: mm.	FECHA DE ELABORACIÓN: 03-12-2022	ESCALA: 2:1	TOLERANCIA: +0,05 +0,00	HOJA: 14 DE 25
DIBUJANTE: RAFAEL CRUZ AMADOR		NOMBRE DE PIEZA: SOPORTE - 3 PIÑONES C		



VISTA LATERAL

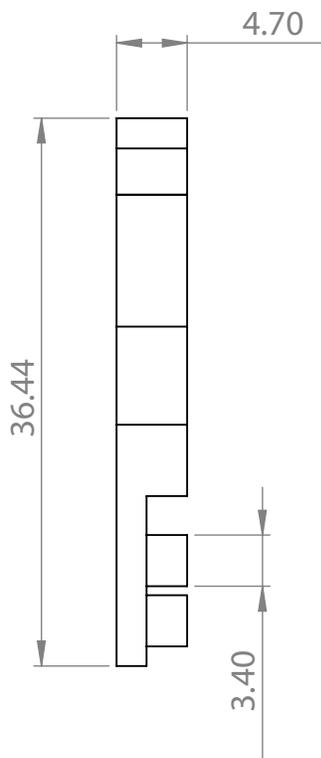


VISTA FRONTAL

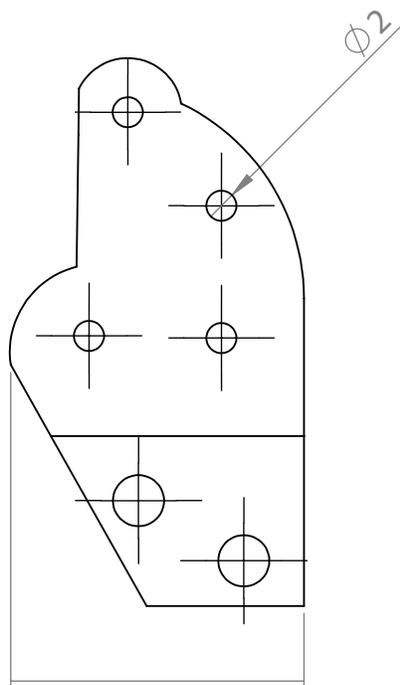


ISOMÉTRICO

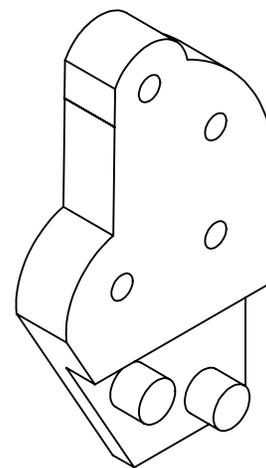
 UTM Universidad Tecnológica de la Mixteca <i>Labor et Sapientia, Libertas</i>		<h1>PL-15</h1>		
PROYECTO DE TESIS		TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECAÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN		
ACOTACIÓN:	FECHA DE ELABORACIÓN:	ESCALA:	TOLERANCIA:	HOJA:
mm.	03-12-2022	2:1	+0,05 +0,00	15 DE 25
DIBUJANTE: RAFAEL CRUZ AMADOR		NOMBRE DE PIEZA: SOPORTE - 3 PIÑONES D		



VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL



ISOMÉTRICO



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-16

PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

2:1

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

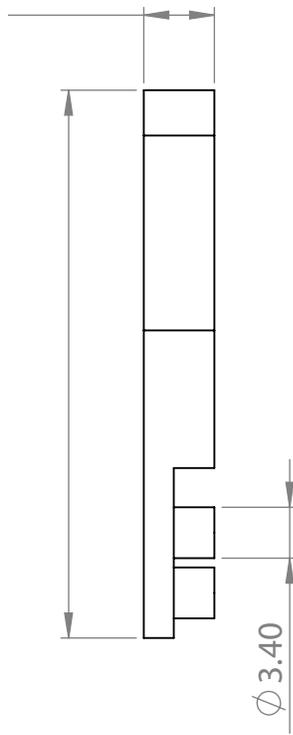
16 DE 25

DIBUJANTE:

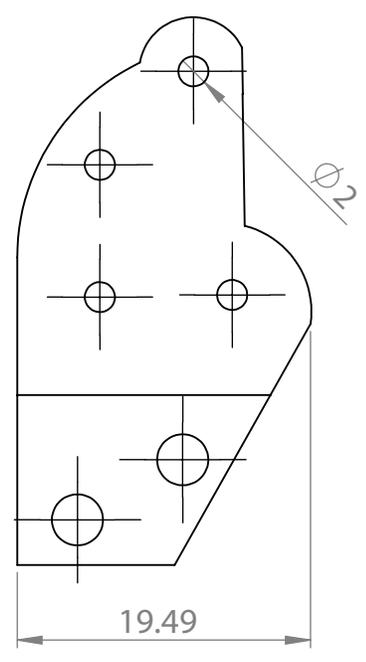
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

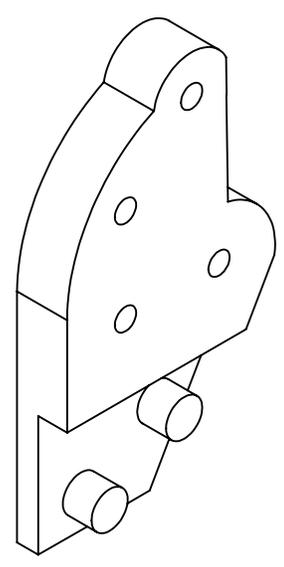
SOPORTE - 4 PIÑONES A



VISTA LATERAL

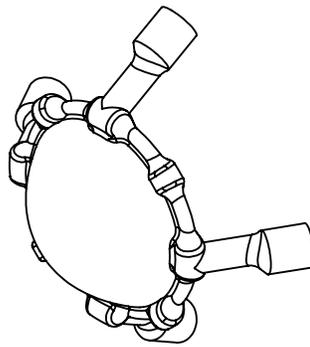


VISTA FRONTAL

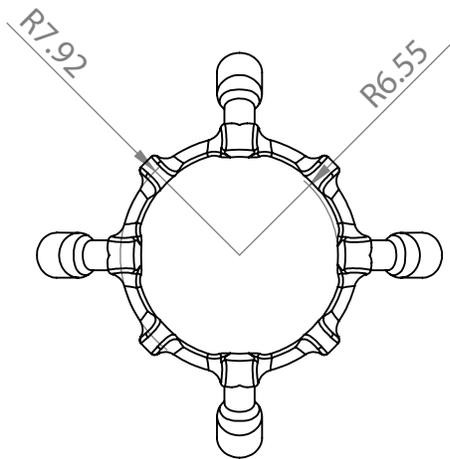


ISOMÉTRICO

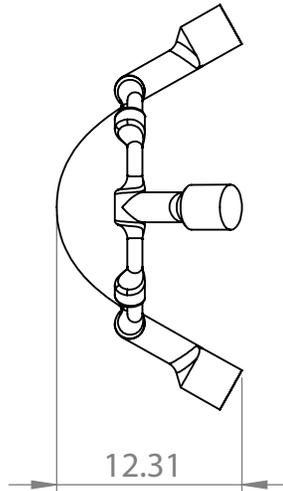
 UTM Universidad Tecnológica de la Mixteca <i>Labor et Sapientia, Libertas</i>		<h1>PL-17</h1>		
ACOTACIÓN:	FECHA DE ELABORACIÓN:	ESCALA:	TOLERANCIA:	HOJA:
mm.	03-12-2022	2:1	+0,05 +0,00	17 DE 25
DIBUJANTE: RAFAEL CRUZ AMADOR		NOMBRE DE PIEZA: SOPORTE - 4 PIÑONES B		



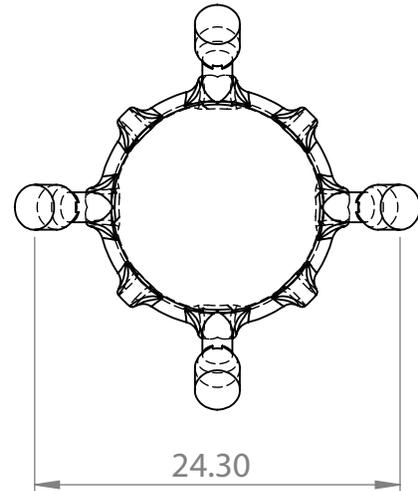
ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



VISTA POSTERIOR



UTM

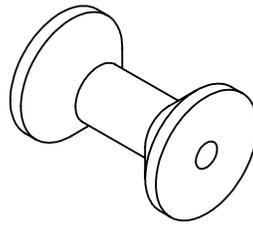
Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-18

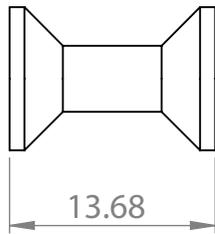
PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

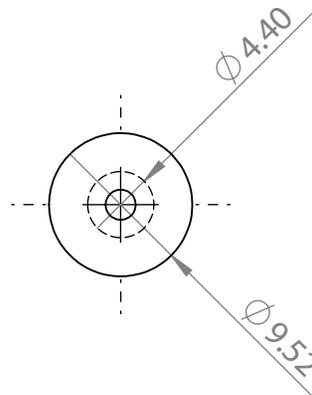
ACOTACIÓN: mm.	FECHA DE ELABORACIÓN: 03-12-2022	ESCALA: 2:1	TOLERANCIA: +0,05 +0,00	HOJA: 18 DE 25
DIBUJANTE: RAFAEL CRUZ AMADOR		NOMBRE DE PIEZA: LENTE DE PDMS		



ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



UTM

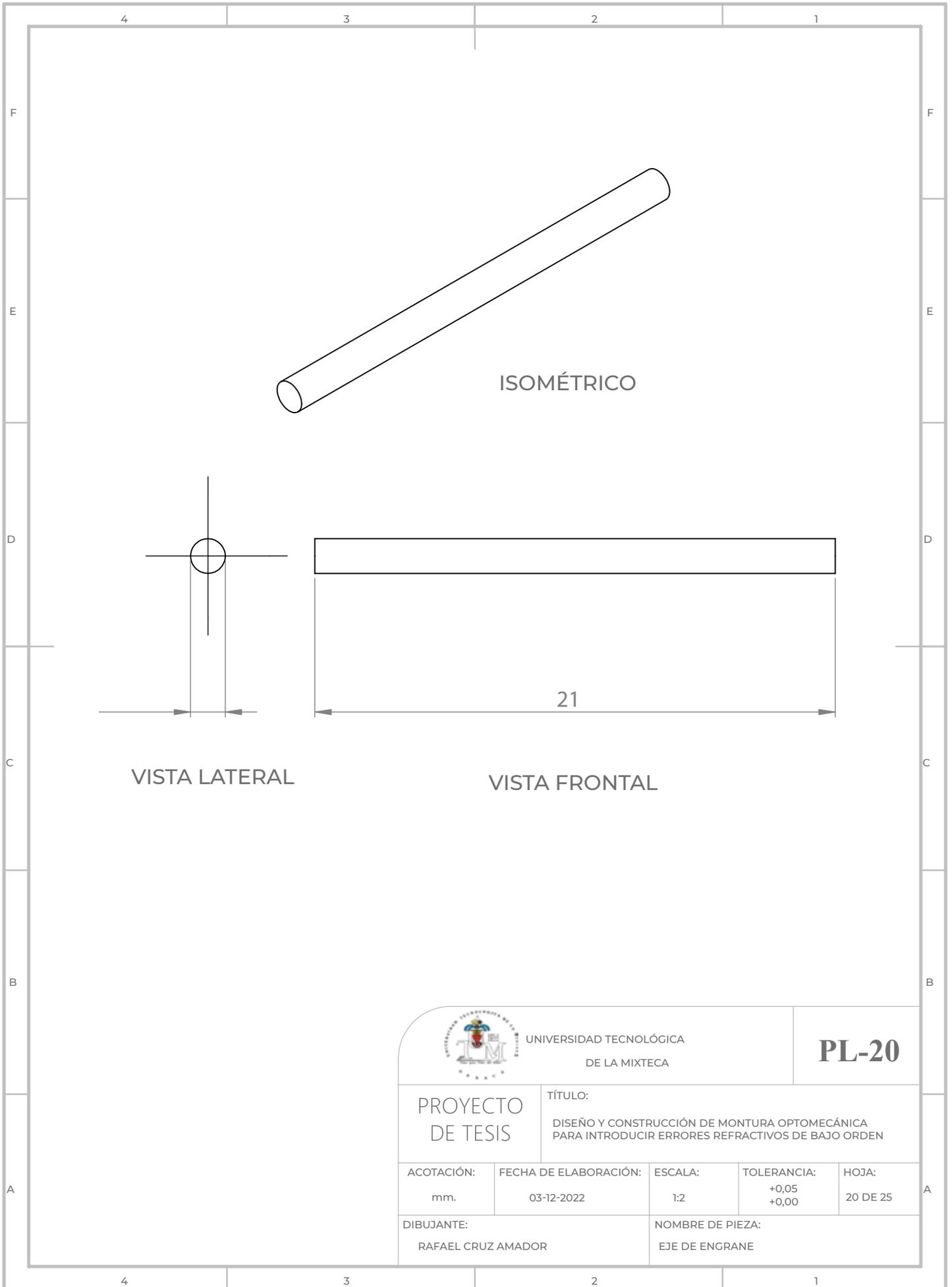
Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-19

PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECAÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN: mm.	FECHA DE ELABORACIÓN: 03-12-2022	ESCALA: 2:1	TOLERANCIA: +0,05 +0,00	HOJA: 19 DE 25
DIBUJANTE: RAFAEL CRUZ AMADOR		NOMBRE DE PIEZA: RODILLO MAYOR		



ISOMÉTRICO

VISTA LATERAL

VISTA FRONTAL

21



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
DE LA MIXTECA

PL-20

PROYECTO
DE TESIS

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECAÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

1:2

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

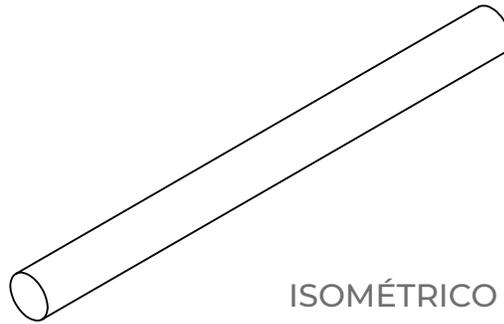
20 DE 25

DIBUJANTE:

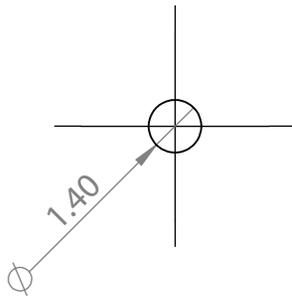
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

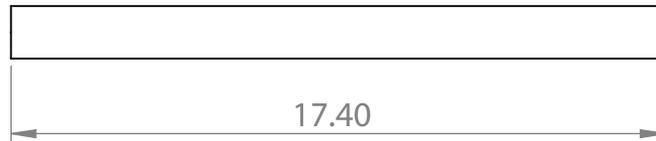
EJE DE ENGRANE



ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-21

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECAÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

5:1

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

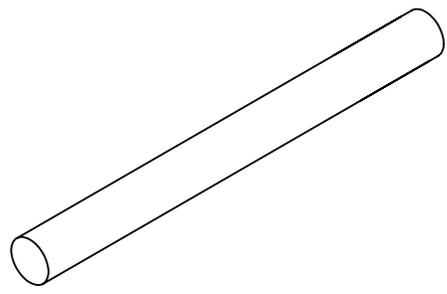
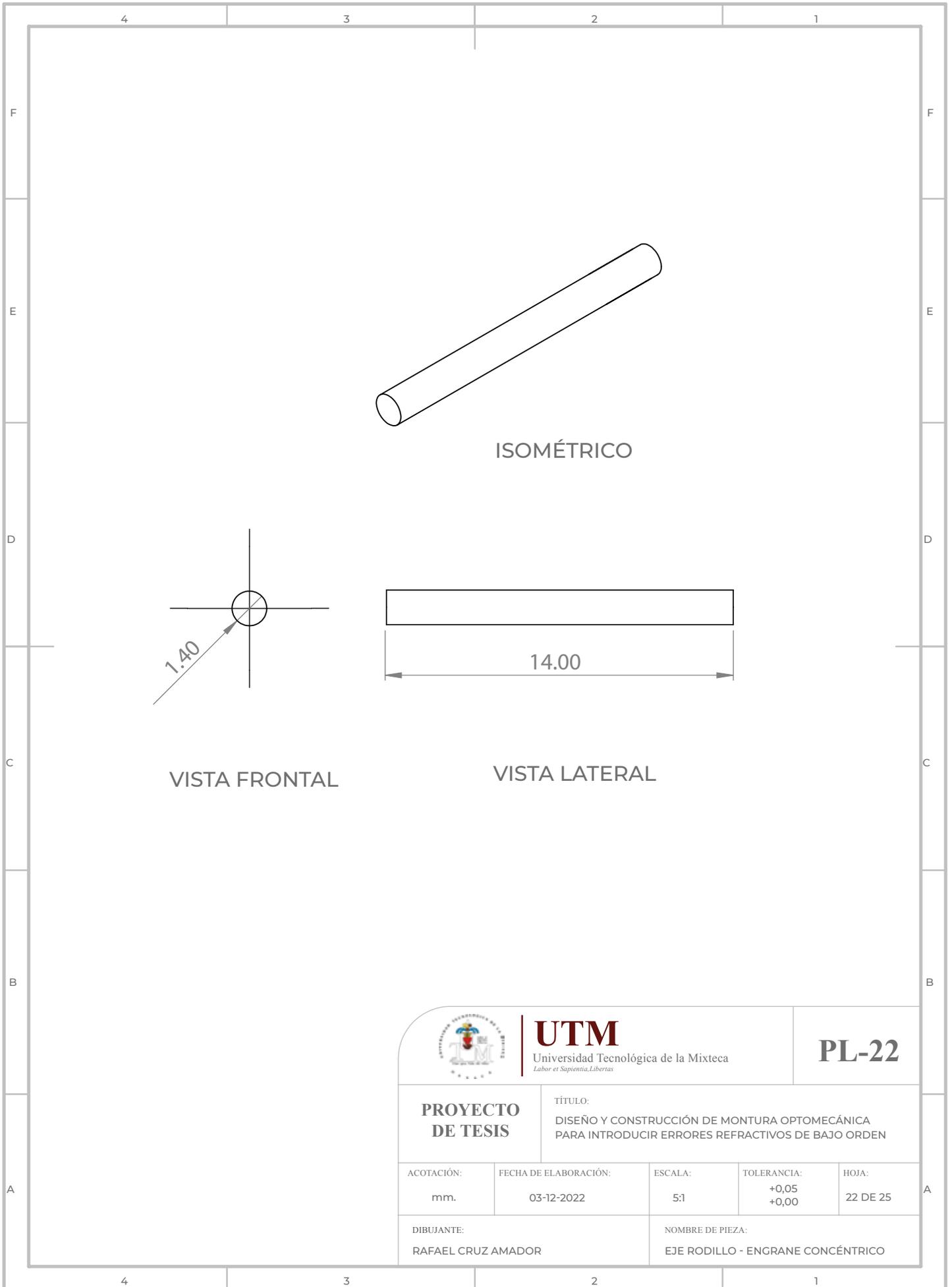
21 DE 25

DIBUJANTE:

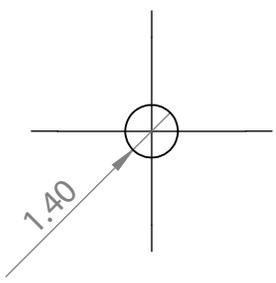
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

EJE RODILLO - CREMALLERA



ISOMÉTRICO

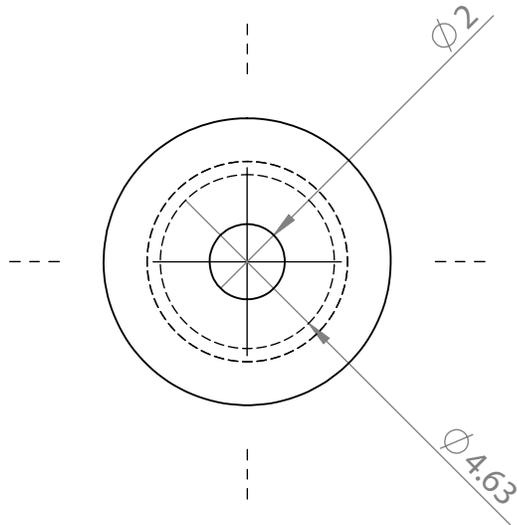


VISTA FRONTAL

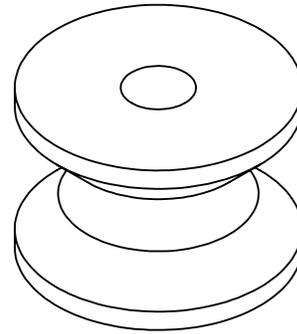


VISTA LATERAL

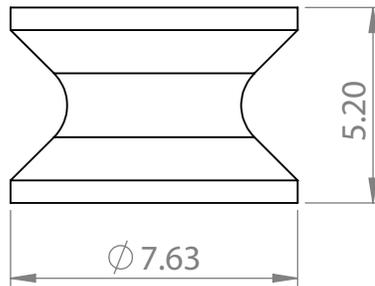
 UTM Universidad Tecnológica de la Mixteca <i>Labor et Sapientia, Libertas</i>		<h1>PL-22</h1>		
ACOTACIÓN:	FECHA DE ELABORACIÓN:	ESCALA:	TOLERANCIA:	HOJA:
mm.	03-12-2022	5:1	+0,05 +0,00	22 DE 25
DIBUJANTE: RAFAEL CRUZ AMADOR		NOMBRE DE PIEZA: EJE RODILLO - ENGRANE CONCÉNTRICO		



VISTA SUPERIOR



ISOMÉTRICO



VISTA FRONTAL



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-23

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

5:1

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

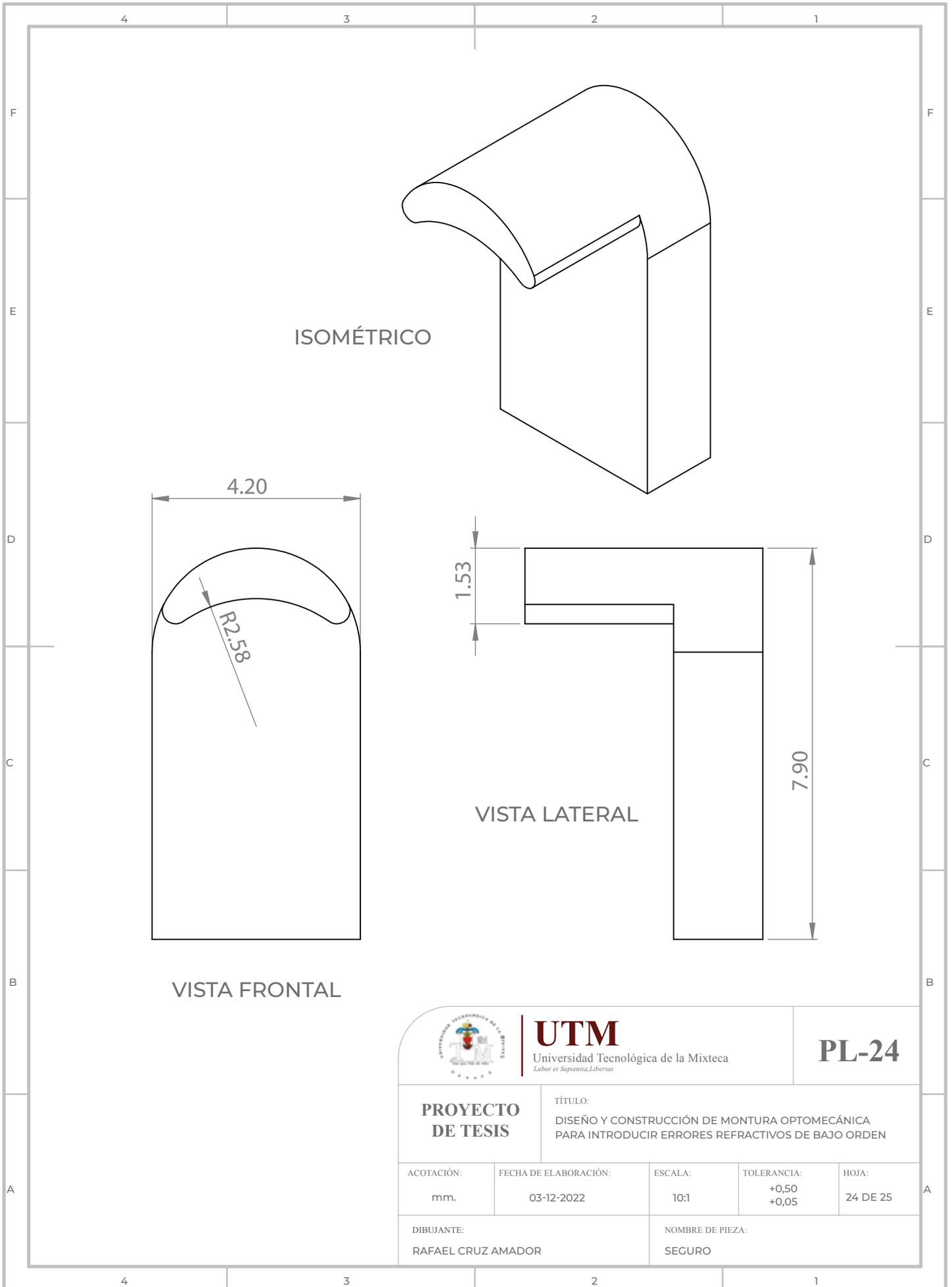
23 DE 25

DIBUJANTE:

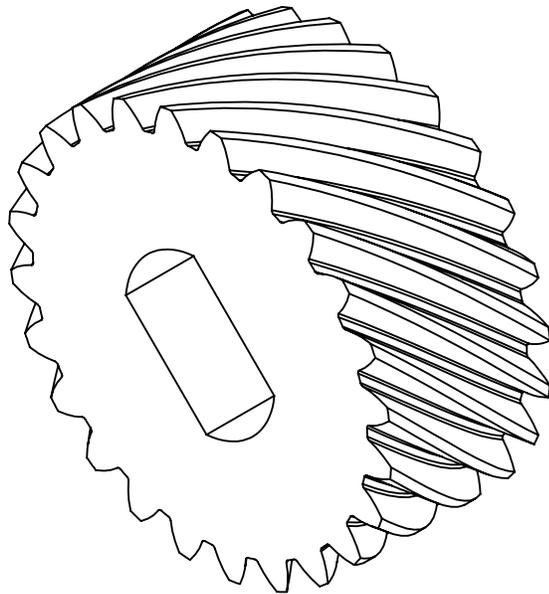
RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

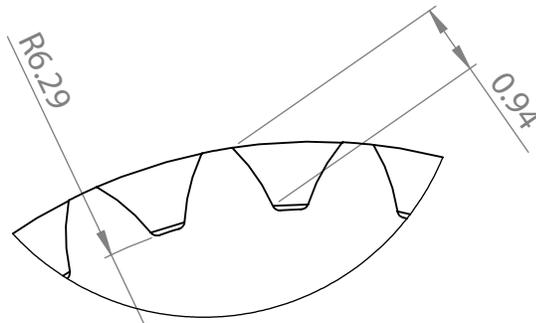
RODILLO MENOR



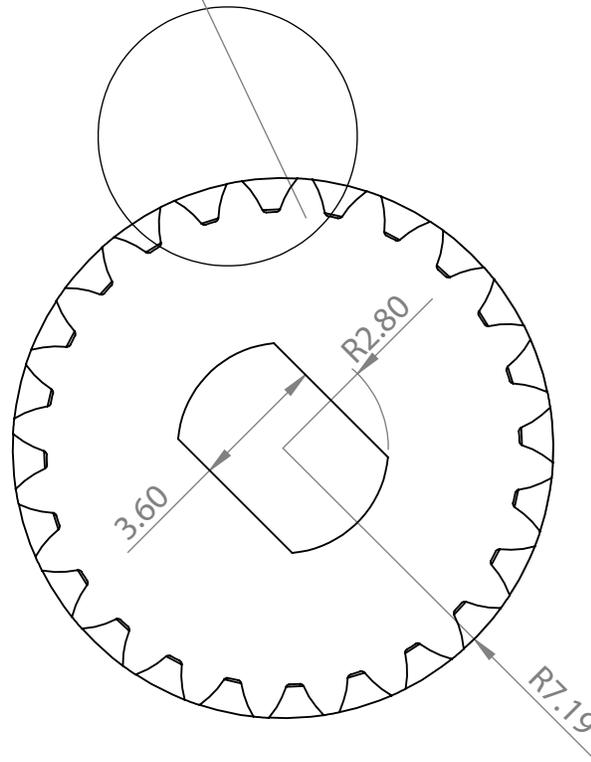
		UTM Universidad Tecnológica de la Mixteca <i>Labor et Sapientia, Libertas</i>		PL-24	
PROYECTO DE TESIS		TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN			
ACOTACIÓN: mm.	FECHA DE ELABORACIÓN: 03-12-2022	ESCALA: 10:1	TOLERANCIA: +0,50 +0,05	HOJA: 24 DE 25	
DIBUJANTE: RAFAEL CRUZ AMADOR		NOMBRE DE PIEZA: SEGURO			



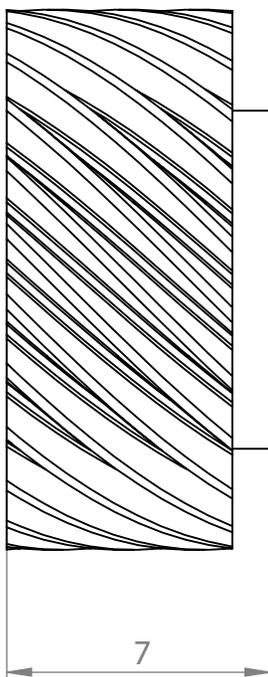
ISOMÉTRICO



DETALLE A
ESCALA 10:1
A



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-25

**PROYECTO
DE TESIS**

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECÁNICA
PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

5:1

TOLERANCIA:

+0,05
+0,00

HOJA:

21 DE 25

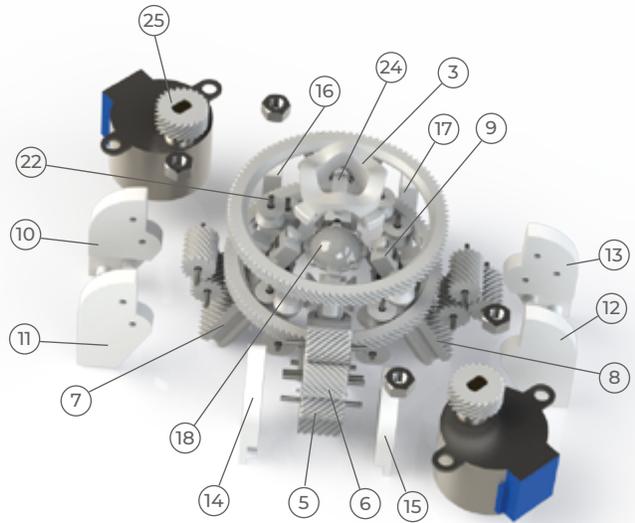
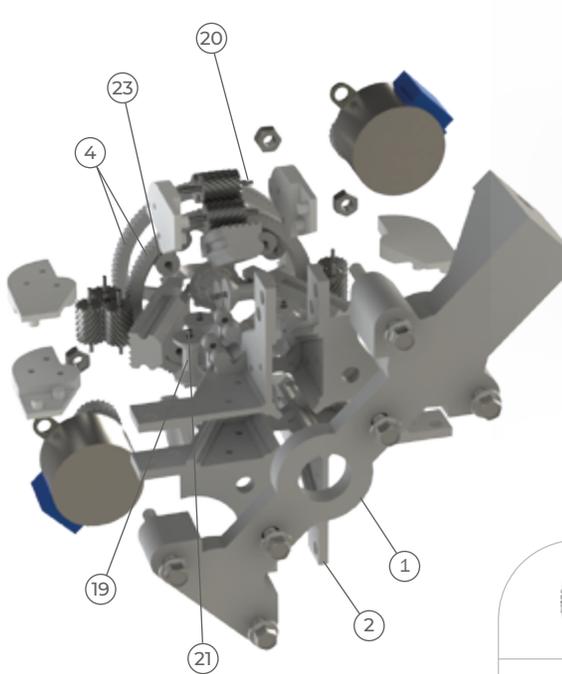
DIBUJANTE:

RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

PIÑÓN - MOTOR

N° DE ELEMENTO	NOMBRE DE LA PIEZA	CANTIDAD
1	BASTIDOR	1
2	BASE	1
3	TAPA CENTRAL	1
4	ENGRANE CONCÉNTRICO	2
5	PIÑÓN - CREMALLERA A	7
6	PIÑÓN - CREMALLERA B	5
7	CREMALLERA DERECHA	2
8	CREMALLERA IZQUIERDA	2
9	TAPA - CELDA	4
10	SOPORTE - 2 PIÑONES A	1
11	SOPORTE - 2 PIÑONES B	1
12	SOPORTE - 3 PIÑONES A	1
13	SOPORTE - 3 PIÑONES B	1
14	SOPORTE - 3 PIÑONES C	1
15	SOPORTE - 3 PIÑONES D	1
16	SOPORTE - 4 PIÑONES A	1
17	SOPORTE - 4 PIÑONES B	1
18	LENTE DE PDMS	1
19	RODILLO MAYOR	8
20	EJE DE ENGRANE	12
21	EJE RODILLO - CREMALLERA	8
22	EJE RODILLO - ENGRANE CONCÉNTRICO	8
23	RODILLO MENOR	8
24	SEGURO	4
25	PIÑÓN - MOTOR	2



UTM

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Labor et Sapientia, Libertas

PL-26

PROYECTO DE TESIS

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MONTURA OPTOMECAÁNICA PARA INTRODUCIR ERRORES REFRACTIVOS DE BAJO ORDEN

ACOTACIÓN:

mm.

FECHA DE ELABORACIÓN:

03-12-2022

ESCALA:

SIN ESCALA

TOLERANCIA:

VARIAS

HOJA:

01 DE 14

DIBUJANTE:

RAFAEL CRUZ AMADOR

NOMBRE DE PIEZA:

EXPLOSIVO