



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRIA EN TECNOLOGÍA AVANZADA DE
MANUFACTURA

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA
MECÁNICO PARA MANIPULAR UNA
LENTE SINTONIZABLE SÓLIDA
ELÁSTICA POR COMPRESIÓN”**

TESIS:

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA DE MANUFACTURA

PRESENTA:

ID. HERNÁNDEZ ECHEVERRÍA YOSHITO

DIRECTORES:

DR. AGUSTÍN SANTIAGO ALVARADO

MC. SALVADOR MONTESINOS GONZÁLEZ

Huajuapán de León, Oaxaca, México, Octubre de 2016.

Dedicatoria

*A mi Esposa
Nayeli González
que este trabajo sea
un orgullo para ella.*

*A mi madre.
Maria Teresa Aidee
Gracias a su apoyo.*

*A mi hernana Aide y sobrinos
David y Mattew. por el apoyo a
distancia que me han brindado, y
aunque ahora
mis sobrinos son pequeños, espero les
sirva de ejemplo, para que alcancen sus
metas.*

Agradecimientos

En especial a ti señor porque me hiciste realidad este sueño, por todo el amor con el que me rodeas y porque me tienes en tus manos.

A ti, si a ti que estas dedicando un minuto de tu tiempo en leer ésta tesis

Podría escribir una hoja, media cuartilla o un libro entero para agradecer a todas las personas que me han brindado su amor, amistad, apoyo, ánimo y compañía en todas las etapas de mi vida y durante los últimos dos años, en verdad me faltaría pluma y papel para hacerlo debido a que son muchas las personas a las que me gustaría agradecerles. Algunas están aquí conmigo, otras más en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar donde se encuentren o si alguna vez llegan a leer esto, quiero darles las gracias por formar parte de mi vida y porque de una u otra manera me ayudaron a crecer y superarme.

Nayeli, no me equivoco si digo que eres la mejor mujer del mundo, y obvio no por que seas mi esposa verdad, el día de hoy como todos los de días mi vida aprovecho para decirte una vez más gracias por ayudarme y alentarme por estar ahí además por el apoyo incondicional hacia mi, te amo.

Mamá me enorgullece que hoy puedas ver hasta donde me has impulsado y sabes que todo esto y lo que sigue es gracias a ti; gracias por el apoyo y por la confianza, que desde niño has depositado en mí. Gracias, porque aunque estuviste lejos muchos años siempre has estado a mi lado, y que gracias a dios que en este año nos ha permitido estar juntos. Te quiero mucho.

A mis directores: Dr. Agustín Santiago Alvarado, MC. Salvador Montesinos González, no solo el día de hoy, si no por lo que me reste de vida, les agradece la valía del tiempo que durante este proyecto me han dedicado, los consejos y más que nada la paciencia, que me han tenido y sobre todo el enorme conocimiento que al haber trabajado a su lado me llevo.

Al MC. Moisés Manzano Herrera, Dr. Mario Marquez Miranda, Dr. José Alfredo Carazo Luna, MC. Víctor Manuel Cruz Martínez, MC. Brenda Iris Lincona Morán y a todos aquellos que han hecho esto posible, no tengo palabras para agradecerles lo mucho que me han dado, los consejos, observaciones y las horas extras que me dedicaron durante este proyecto, muchas gracias.

A mis amigos, Dra. Marla Berenice Hernández, Dr. Josué Amilcar Aguilar Martínez, por su amistad y gran apoyo aunque a distancia les doy las gracias hoy y siempre, ya que con su apoyo ésta tesis se puede ver impresa. Gerardo Ivan, Nephew, Arturo, Víctor, Celestina (y tus regaños de todos los días), Omar, Maritza, y todas aquellas personas que se me haya pasado mencionar, que en su momento compartieron parte de su tiempo conmigo. Al maestro Rodolfo Palma y al ingeniero Javier (Pachón), por el apoyo brindado y el tiempo extra que me obsequiaron, no tengo como pagar lo que este tiempo compartido con cada uno de ustedes me ha servido, el día de hoy solo me resta decirles muchas gracias.

Resumen

En esta tesis, se describe el diseño, análisis y construcción de una montura y el sistema mecánico de ésta, el cual tiene como función principal soportar y manipular una lente sólida elástica sintonizable que funciona por compresión única en su tipo ¹, con base en las especificaciones de diseño, solicitadas por el cuerpo académico de Óptica de la UTM, validando su funcionamiento con un programa comercial de elemento finito (SOLID WORKS ©)), para posteriormente realizar la construcción de sus componentes mediante la aplicación de una tecnología de manufactura avanzada, lo anterior para determinar el tipo de maquinaria a ocupar, las mejores estrategias de corte y los tipos de cortadores necesarios. Una vez construida se verificarán las tolerancias longitudinales mediante instrumentos de medición tales como el micrómetro y vernier de precisión para finalmente ensamblar el sistema mecánico.

Esta montura permitirá la manipulación mecánica en si misma para producir deformación en una lente sintonizable del tipo sólida elástica, pero con actuación de compresión para cambiar su forma y parámetros geométricos, que es única en su tipo, lo cual representa una complejidad real en la elaboración de los mecanismos y el diseño de ésta.

Se presenta una revisión los trabajos que con antelación se realizaron en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, en los cuales se hace mención sobre los problemas que presentaron cada uno de ellos, de tal forma que, es gracias a éstos y a los requerimientos planteados por el cuerpo académico de Óptica de la UTM, que este trabajo ha tenido origen.

Una montura que permite la deformación geométrica de una lente del tipo sólida elástica por medio de compresión, mediante la metodología de diseño total y con base en los requerimientos del cuerpo académico de óptica de la UTM y el INAOE, haciendo uso de las maquinas, herramientas y procesos de manufactura, con lo cual se pudo verificar los resultados de ésta en el laboratorio de física mostrando que no existían las aberraciones que presentaban las demás.

¹Lo anterior se corroboró en el IMPI y en documentos científicos

Índice

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
RESUMEN	I
ÍNDICE	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
Capítulo1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. OBJETIVO GENERAL	4
1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.3.1. APLICACIONES	5
1.4. METAS	5
1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
Capítulo2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. TIPOS DE LENTES Y MONTURAS	10
2.2. MANUFACTURA	12
2.2.1. INGENIERÍA CONCURRENTE	14
2.2.2. CAD /CAM /CAE	15
2.2.2.1. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)	15
2.2.2.2. MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAM)	16
2.2.2.3. INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAE)	17
2.2.3. QFD	17
2.2.4. PLANEACIÓN DE PROCESOS (PP)	23
2.2.5. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS	33
2.3. METODOLOGÍA	33
2.3.1. METODOLOGÍA “DISEÑO TOTAL”	33

2.3.1.1.	MERCADO	35
2.3.1.2.	ESPECIFICACIONES	35
2.3.1.3.	DISEÑO DE CONCEPTO	35
2.3.1.4.	DISEÑO A DETALLE	36
2.3.1.5.	MANUFACTURA	36
2.3.1.6.	VENTA	41
Capítulo3.	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	42
3.1.	ESPECIFICACIONES	42
3.1.1.	DESARROLLO DEL DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD)	44
3.2.	DISEÑO DE CONCEPTO	53
3.2.1.	SELECCIÓN DE LA PROPUESTA	62
3.3.	DISEÑO A DETALLE	63
3.3.1.	ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO	63
3.3.1.1.	Análisis propuesta número 3	64
3.3.1.2.	Rediseño de montura propuesta número 3	71
3.3.1.3.	Análisis propuesta número 4	77
3.3.2.	ANÁLISIS DE LA LENTE PDMS	82
3.4.	SELECCIÓN FINAL	86
3.4.1.	MANUFACTURA	91
3.4.2.	PLANIFICACIÓN DE PROCESOS DE MANUFACTURA	92
3.4.2.1.	MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS	94
3.5.	MANUFACTURA DE UNA MONTURA PARA LENTE PDMS	100
Capítulo4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	104
4.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	108
4.2.	CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFIA		111
Apéndices		115

Índice de figuras

1.1. Lente Sólida Elástica: Descripción de partes.[1].	7
1.2. Elongación de la Lente Sólida Elástica al aplicar las fuerzas en las mordazas,[1].	7
1.3. Diagrama de manchas generadas por la lente adaptiva SEL a medida que aumentan las fuerzas radiales aplicadas [1].	8
1.4. Vista frontal de la SEL. [1].	8
2.1. Lente ajustable con un adaptador piezoeléctrico integrado, imagen obtenida de “A low cost adaptive silicone membrane lens” [2].	11
2.2. QFD matrices para el despliegue de los requerimientos del cliente	22
2.3. Matriz básica del QFD	22
2.4. Planeación de Procesos.	26
2.5. Diagrama particular de la planeación de procesos.	27
2.6. Proceso de diseño de un producto [3].	34
2.7. En el corte ortogonal, el filo de corte es perpendicular a la dirección del movimiento. El ángulo de ataque puede ser a) positivo o b) negativo, c) las velocidades se obtienen si, para una primera aproximación, d) la formación de la viruta se visualiza como cortante simple.	39
3.1. Casa de la calidad	44
3.2. Casa de la Calidad (requerimientos del cliente)	48
3.3. Matriz de despliegue por partes	50
3.4. Matriz de Planeación de Procesos.	51
3.5. Matriz de Planeación de la Producción.	52
3.6. Lente de 30 mm de diámetro de PDMS.	53
3.7. Vista frontal de la propuesta número 1	54
3.8. Vista lateral de la propuesta número 1.	54
3.9. Vista explosionada de la propuesta número 1.	55
3.10. Vista posterior de la propuesta número 2.	55
3.11. Vista lateral de la propuesta número 2.	56

3.12. Vista isométrica de la propuesta número 2.	57
3.13. Vista explosionada de la propuesta número 2.	57
3.14. Vista en perspectiva de la propuesta número 3.	58
3.15. Vista lateral derecha de la propuesta número 3.	58
3.16. Vista frontal de la propuesta número 3.	59
3.17. Vista explosionada de la propuesta número 3.	59
3.18. Vista en perspectiva de la propuesta número 4.	60
3.19. Vista en explosiva de la propuesta número 4.	60
3.20. Vista lateral de la propuesta número 4.	61
3.21. Vista en perspectiva de la propuesta número 4.	61
3.22. Vista corte transversal de la propuesta número 4.	62
3.23. Aplicación de fuerzas de compresión a un elemento de sujeción.	64
3.24. Tensiones.	64
3.25. Desplazamiento.	65
3.26. Deformaciones unitarias.	65
3.27. Análisis de deformación.	67
3.28. Mallado.	68
3.29. Resultados del estudio de Tensiones.	69
3.30. Resultados del estudio de Desplazamientos.	69
3.31. Deformación unitaria.	70
3.32. Piezas principales del prototipo en ABS.	70
3.33. Prototipo de ABS Rapid prototyping.	71
3.34. Puntos de ruptura del prototipo.	71
3.35. Cono modificado de Polietileno (PE).	72
3.36. Mallado.	73
3.37. Gráfica de Fuerza Vs Desplazamientos.	74
3.38. Análisis de Desplazamientos.	74
3.39. Gráfica de Fuerza Vs Deformaciones.	75
3.40. Análisis de Deformaciones.	75
3.41. Gráfica de Fuerza Vs Tensiones.	76
3.42. Análisis de Tensiones.	76
3.43. Soporte cónico para lente PDMS.	77
3.44. Aplicación de fuerzas de compresión a un elemento de sujeción.	77
3.45. Desplazamiento.	78
3.46. Deformaciones unitarias.	78
3.47. Análisis de cargas externas sometidas a compesión.	80

3.48. Análisis del mallado.	81
3.49. Imagen del mallado de la lente.	82
3.50. Lente PDMS- Estudio -Tensiones (60 N).	84
3.51. Lente PDMS- Estudio -Desplazamientos (60 N).	84
3.52. Lente PDMS- Estudio -Deformaciones unitarias (60 N).	85
3.53. Imagen de la lente sometida a compresión (60 N) corte transversal.	85
3.54. Modelo jerarquizado para la selección de la mejor propuesta para montura. . .	86
3.55. Piezas utilizadas para evaluar en software CAM	93
3.56. Diagrama de procesos montura	99
3.57. Diagrama de ensamble de montura para SEL	100
3.58. Montura de aluminio	101
3.59. Manufactura de la tapa de la montura para lente PDSM	102
3.60. Diagrama de ensamble pieza a pieza de la montura para SEL	103
4.1. Piezas de la montura.	104
4.2. Rediseño de la montura.	105
4.3. Rediseño de la montura.	105
4.4. Prueba de longitud focal.	106
4.5. Prueba de deformación de imagen 7-1-n grados.	106
4.6. Prueba de deformación de imagen con letras 18-4-n grados.	106
4.7. Imagen de la deformación del haz de luz producido por la manipulación y deformación de un lente sometido a compresión.	107
4.8. Imagen de la lente sometida a la presión.	107
4.9. Montura final.	108
4.10. Sintonizador para montura SEL.	116
4.11. Eje para montura SEL.	117
4.12. Boquilla para montura SEL.	118
4.13. Tapa para montura SEL.	119

Índice de Tablas

2.1. Tabla de actividades y recursos.	12
2.2. Parámetros y fórmulas empleadas en los procesos de torneado.	40
3.1. Resultados del estudio.	65
3.2. Propiedades del estudio.	66
3.3. Unidades Empleadas.	66
3.4. Fuerzas resultantes.	67
3.5. Información de malla.	67
3.6. Información de malla - detalles.	68
3.7. Fuerzas resultantes	68
3.8. Resultados del estudio de Tensiones.	69
3.9. Propiedades del material.	72
3.10. Información de malla.	73
3.11. Información de malla - detalles.	73
3.12. Fuerzas resultantes.	74
3.13. Resultados del estudio.	78
3.14. Propiedades del estudio.	79
3.15. Unidades.	79
3.16. Fuerzas resultantes.	80
3.17. Información de malla.	80
3.18. Información de malla - detalles.	80
3.19. Fuerzas resultantes.	81
3.20. Resultados del estudio de Tensiones.	81
3.21. Propiedades del material de la lente Polidimethylsiloxano(PDMS).	82
3.22. Información de malla.	83
3.23. Información de malla - detalles.	83
3.24. Fuerzas resultantes.	83
3.25. Escala de pesos asignados a los criterios de selección, de acuerdo a SAATY[43].	87

3.26. Matriz de comparación del nivel 2 (criterios vs criterios).	87
3.27. Matriz de comparación alternativas contra criterio 1 de Reducción de aberraciones.	89
3.28. Matriz de comparación alternativas contra criterio 2 de Desempeño.	89
3.29. Matriz de comparación alternativas contra criterio 3 de Diseño ergonómico.	89
3.30. Matriz de comparación alternativas contra criterio 4 de Vida útil.	89
3.31. Matriz de comparación alternativas contra criterio 5 de Precio.	89
3.32. Matriz de comparación alternativas contra criterio 6 de Facilidad de manufactura.	90
3.33. Matriz de Prioridades globales.	90
3.34. Evaluación de los programas de maquinado para torno.	94
3.35. Recomendaciones generales para las operaciones de torneado.	97
3.36. Recomendaciones generales para operaciones de torneado en aluminio.	98
3.37. Lista de partes.	98
3.38. Tabla de maquinaria y herramienta.	101

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En décadas recientes el uso de Lentes con Longitud Focal Variable (LLFV) se ha incrementado considerablemente. Estas LLFV o lentes adaptivas son de tres tipos principalmente [2]:

1) Aquellas que están hechas de un medio líquido dieléctrico, en este tipo de lentes siempre existe un mecanismo que permite modificar la forma de la lente, es decir, sus parámetros ópticos geométricos, tales como sus radios de curvatura, grosor axial y distancia focal mediante la aplicación de un campo eléctrico o voltaje [4].

2) Lentes adaptivas que están formadas por dos membranas elásticas transparentes ensambladas en un compartimiento cilíndrico (llamado montura de la lente), en el cual se introduce un líquido transparente y mediante el cambio de volumen del líquido los parámetros ópticos geométricos de la lente son cambiados [5].

3) Las lentes sólidas elásticas adaptivas (más recientes) que son elaboradas de un material elástico dentro una montura que permite aplicar fuerzas radiales en su perímetro con lo cual son cambiados los parámetros ópticos de la lente, este tipo de lente es llamada SEL [6], de sus siglas en inglés (Solid Elastic Lens) [7].

Ésta última, fue creada a partir del diseño, construcción y análisis de un modelo optomecánico que imita el funcionamiento real del cristalino del ojo humano mediante el uso de una lente adaptativa del tipo sólida [8]. Ésta lente se basa en el principio de funcionamiento del cristalino del ojo humano, el cual se deforma al aplicarle fuerzas radiales sobre sus bordes por los músculos ciliares, enfocando así los objetos que se encuentran a diferentes distancias.

En el caso del diseño de la SEL, las fuerzas radiales son aplicadas mediante una montura

mecánica que jala un conjunto de mordazas incrustadas en la periferia de un material elástico que forma el cuerpo de una lente del tipo biconvexa, recientemente una versión de este tipo de lente fue propuesta y emplea un actuador electromagnético para sintonizar la longitud focal en la región paraxial [5]. Los resultados obtenidos en la caracterización de esta lente [8] muestran que se debe dar un especial énfasis en la manufactura de la misma, para garantizar que la montura mecánica aplique esfuerzos radiales de manera homogénea al cuerpo de la lente, ya que en caso contrario se introducen defectos en el funcionamiento de la misma [6], y la calidad de las imágenes formadas por estas se deterioran drásticamente [5].

El diseño construido de este tipo de lente [8], presenta el problema de generar aberraciones adicionales a la lente misma, por lo que se debe mejorar o proponer un mecanismo diferente [5], que sea de fácil manipulación y que distribuya de manera uniforme los esfuerzos, para garantizar el buen funcionamiento de la lente [6].

Mediante la aplicación de una metodología de maufactura como lo es la planeación de procesos [9], que nos permita definir correctamente la distribución de las maquinas, herramientas así como la selección de materiales, de tal forma que este grupo de acciones, que se realizarán, permitirán fabricar los componentes y partes de la montura para la lente de tal manera que se cumplan las especificaciones de diseño.

El tema de tesis consiste en el diseño y construcción de una montura mecánica para una lente sólida elástica (SEL) [10], del tipo compresión, en el cual se realice un análisis asistido por computadora que garantice el buen funcionamiento de diseño mecánico propuesto, para proceder a su construcción tomando en cuenta los problemas presentes en los diseños previos. Es por ello que, se realizará un Análisis de Elementos Finitos (FEA), considerando el uso de diferentes materiales para un mejor desempeño y sin necesidad de mantenimiento que provoque un mayor costo. También se contemplará, emplear la metodología de manufactura tal que garantice el buen funcionamiento e interacción de las componentes mecánicas, que garanticen un funcionamiento óptico apropiado de la lente sólida propuesta [11].

1.1. ANTECEDENTES

El proyecto “Óptica Adaptiva de sistemas refractores” (sep-2004-c01-46080/A1) aprobado por CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), llevado a cabo en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, tuvo como objetivo diseñar, construir y caracterizar diferentes tipos de lentes adaptivas refractivas[12], las cuales pueden cambiar sus parámetros ópticos geométricos, ya sea por medio del incremento del líquido introducido en la montura (lente líquida elástica) o mediante la aplicación de fuerzas a una lente sólida elástica (llamada SEL) mediante una montura .

En el proyecto “Óptica Adaptiva de sistemas refractores”, se han concluido cuatro tesis de licenciatura, dos están enfocadas en el área de Ingeniería en Diseño, para el diseño y fabricación de las monturas de las lentes, desarrolladas por García [13] y Arriaga [14]; otra en el área de Ingeniería en Computación, donde se realizó un software para el cálculo de las aberraciones de la lente adaptiva líquida elástica mediante polinomios de Zernike (aberrometrías oculares y sistemas ópticos), desarrollada por Jarquín (2007), la última tesis desarrollada por Moreno [15] en el área de Ingeniería Industrial para conocer los mapas de esfuerzos de las membranas elásticas que forman a la lente líquida, mediante la aplicación de la Ingeniería Asistida por Computadora (CAE).

De lo anterior, se ha definido el tema de tesis. Las ventajas que se pueden encontrar son muy grandes debido a que la aplicación de una distorsión en forma de compresión para las lentes rígidas flexibles permitirá una variación en la distancia focal permitiendo múltiples aplicaciones como las que se dan a los sistemas zoom que se emplean en cámaras fotográficas, video cámaras, y todos los instrumentos que tienen lentes. ya que con una sola lente se puede observar en diferentes distancias a los objetos al modificar la forma de la lente, lo que no se puede hacer con las lentes convencionales. Se hace mención que éste trabajo de tesis surge de un requerimiento planteado por el cuerpo académico de Óptica de la UTM, en el cuál el principal objetivo es la deformación de la lente para tener una lente sólida sintonizable por compresión.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y manufacturar el prototipo de un sistema mecánico que soporte y manipule una lente sólida elástica sintonizable y que funcione por compresión, para cumplir con los requerimientos establecidos, esto con el fin de generar una deformación uniforme.

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar los sistemas mecánicos utilizados en lentes sintonizables del tipo rígido flexible para establecer los requerimientos de diseño.
2. Desarrollar propuestas de diseño de sistemas mecánicos de soporte y manipulación de una lente sintonizable para su fabricación.
3. Desarrollo de la casa de la calidad como herramienta de validación del prototipo.
4. Planeación y selección de los procesos de manufactura para la fabricación del sistema mecánico propuesto.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Después de realizar una revisión del estado actual de las lentes sólidas sintonizables, se ha encontrado que existen dos tipos de monturas mecánicas, y que en ambas se menciona que estas introducen aberraciones extras a las existente en la lente misma y que sólo son eficientes en la región paraxial, con base en lo anterior, se propone un nuevo diseño de montura para lentes solidas elásticas, el cual cuenta con un mecanismo de compresión para producir el cambio en la longitud focal de la lente. Es por ello, que el presente trabajo recae en el diseño y manufactura de una montura para una lente sólida flexible y el sistema mecánico de sujeción, mediante el cual se pretende deformar a la lente por compresión.

El realizar un modelo en 3D y analizarlo mediante un software, tiene como ventaja principal el ahorro considerable de tiempo y costos, ya que dicho sistema se aproxima a las condiciones en las que estará trabajando en la realidad, dando como resultado un mejor análisis de la pieza, para corregir oportunamente errores que podrían ser de gran importancia, ayudando así, y de manera significativa a evaluar sistemas sin la necesidad de construir prototipos, evitando generar gastos innecesarios [16].

Después de evaluar los requerimientos y necesidades del cuerpo académico de Óptica, y bajo el concepto, el cual es el generar un diseño de un prototipo funcional el cual presente

la facilidad de permitir la manipulación de una lente, ésta del tipo solida elástica; con base en las necesidades que con antelación fueron mencionadas y para los fines que el cuerpo académico requiera, se realizará un prototipo funcional dentro de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) con la garantía que dicho prototipo se hará solo con las máquinas y herramientas que se encuentren en ésta, esto con el fin de no generar costos de fabricación y mano de obra de tal forma que el único gasto que se pudiera generar, sea únicamente el del material y herramental utilizado en la construcción del mismo, por otra parte dentro de la UTM estos materiales denominados consumibles se cubren periódicamente, con recursos de la misma, dado que el prototipo no se mandará a fabricar y la mano de obra se puede realizar en las instalaciones por estudiantes de las carreras de las ingenierías en diseño, industrial o mecatrónica, esto en el periodo de servicio social en cada caso.

1.3.1. APLICACIONES

Una de las principales aplicaciones para este tipo de lentes, por hacer mención de algunos: En el desarrollo de un esferómetro óptico adaptivo [17], binoculares con oculares adaptivo [18], telescopio [19], entre otros, dentro del principal uso de las lentes adaptivas se puede mencionar el uso dentro de los binoculares, en particular los descritos en el artículo “Opto-mechanical design of a binocular with turnable lens” [20], en donde el principal uso de estos sistemas sintonizables consistió en dos membranas plásticas (lentes) que se encuentran dentro de una montura metálica, la cual alberga un fluido que separa a las dos lentes, y permite la sintonización de cada uno de los oculares. También, se puede elaborar propuestas sobre el funcionamiento del ojo humano con un lente cristalino.

1.4. METAS

- Crear planos de los mecanismos desarrollados, presentando vistas tales como: isométricos, explosivos y dimensionar los diseños propuestos del sistema mecánico que sirve de soporte y manipulación de la lente sintonizable.
- Aplicar la metodología de diseño total de manera eficiente que permita fabricar el prototipo seleccionado de forma óptima.
- Construcción de un prototipo del sistema mecánico de la lente que cumpla con las tolerancias requeridas.
- Desarrollo de la casa de la calidad, como herramienta para la selección del prototipo.

- Publicación de uno o dos trabajos en congresos y revistas.

1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad se cuenta con diferentes tipos de monturas mecánicas para lentes, en general todas ellas son rígidas, fijas y sólo permiten mantener alineadas las lentes dentro de los sistemas ópticos [5]. Por otra parte, existen monturas mecánicas activas, es decir que permiten mover lentes dentro de los sistemas ópticos a los que pertenecen como las que aparecen en los sistemas zooms.

Estas monturas mecánicas, además deben permitir desplazamientos de las lentes dentro de los sistemas ópticos que pertenecen para producir imágenes en diferentes planos. Además de estas, existen sistemas ópticos que incorporan monturas mecánicas que les permiten intercambiar elementos ópticos como los revolver de los microscopios o telescopios [21]. Todos estos sistemas mecánicos son empleados en sistemas ópticos tradicionales en donde las lentes son fijas o cambian de posición pero no de forma.

En el caso de la óptica sintonizable, se requieren de monturas que cumplan con la función primordial de poder alinear las lentes del sistema óptico al que pertenecen además de modificar la forma de la lente por algún mecanismo mecánico, ya sea manual, electrónico, mecánico, térmico etc. [22]

Dado que el desarrollo de monturas para lentes adaptivas sólidas elásticas por tensión es totalmente nuevo, lo único desarrollado se ha reportado por la Universidad Tecnológica de la Mixteca. En estos trabajos se diseñó y construyó un prototipo de la montura, pero presentaba una serie de problemas que generaban aberraciones adicionales a las formadas por la propia lente como sistema óptico. Por lo que, en el presente trabajo de tesis se propone un nuevo diseño que permitirá la deformación de las lentes sólidas elásticas por medio de compresión, además de proponer un sistema y metodología de manufactura que lo garantice.

Los problemas mecánicos que se presentaron en el sistema completo (SEL-montura mecánica) son los siguientes:

1. La forma que presenta la lente en la periferia, como se puede observar en la figura 1.1, en la cual se incrustan las mordazas, no se optimiza la cantidad de material para sujeción en su borde para reducir la cantidad de material de la lente que se sujeta a la montura [1].
2. La geometría de las mordazas, mostradas en la figura 1.2, provoca que el desplazamiento

- radial no se transmita a toda la periferia de la lente y sea lo más continuo posible [1].
3. La cantidad de puntos sobre los cuales se le aplicó las fuerzas radiales a la SEL no son suficientes, ya que la lente al ser estirada por medio de la montura, no se extiende en forma homogénea sobre toda su periferia, lo que provoca a su vez que la imagen generada por la lente de una fuente al infinito (mostrada en el diagrama de manchas), deformada, tal y como se muestra en la figura 1.3 [1].
 4. El mecanismo del engrane de la montura mostrada en la figura 1.4, al momento de girarlo de forma manual (aplicación de las fuerzas radiales y por consecuencia desplazamiento radial de la SEL), no cuenta con un seguro que le permita al engrane quedarse estático, para que la lente permanezca fija en esa deformación o estiramiento radial [1].

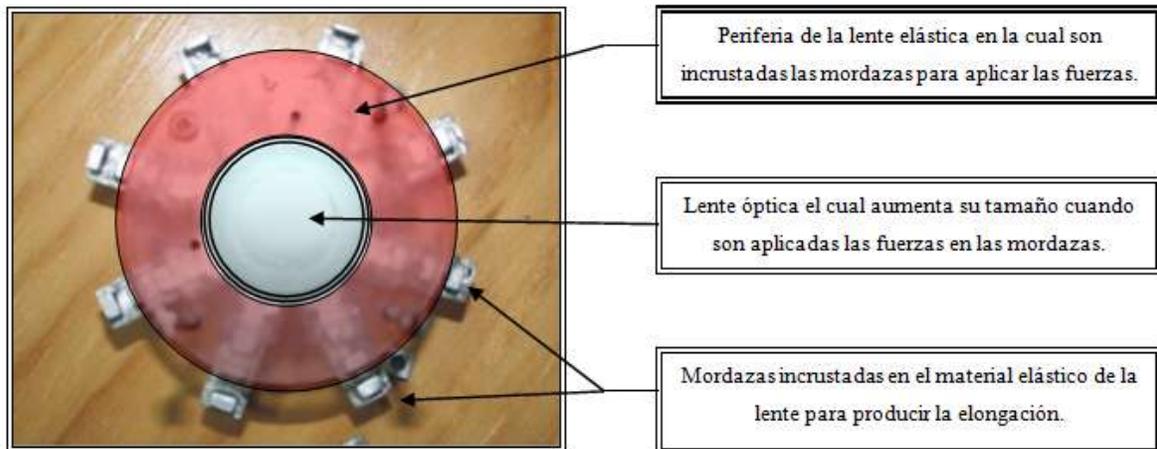


Figura 1.1: Lente Sólida Elástica (Descripción de partes).

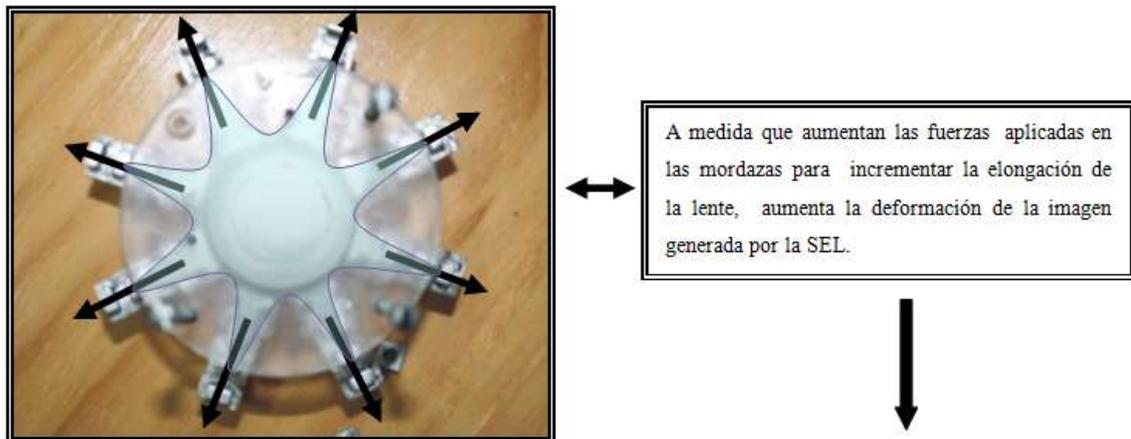


Figura 1.2: Elongación de la SEL al aplicar las fuerzas en las mordazas.

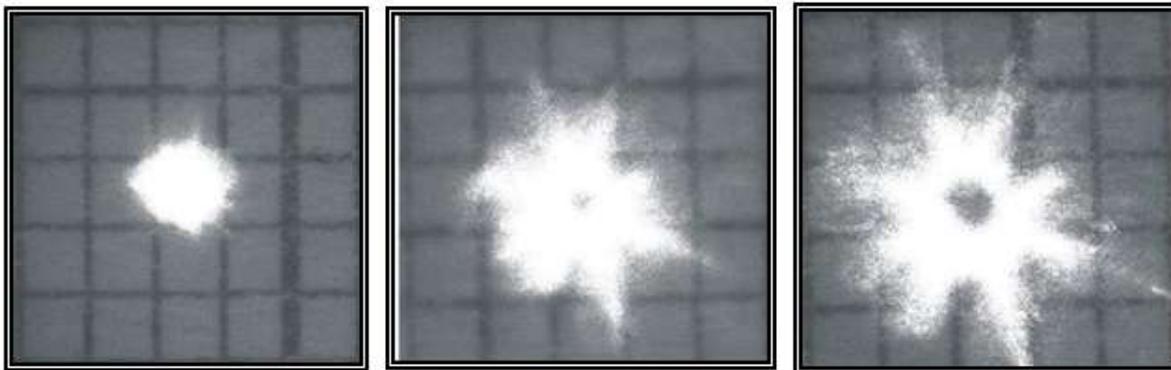


Figura 1.3: Diagrama de manchas generadas por la lente adaptiva SEL a medida que aumentan las fuerzas radiales aplicadas.

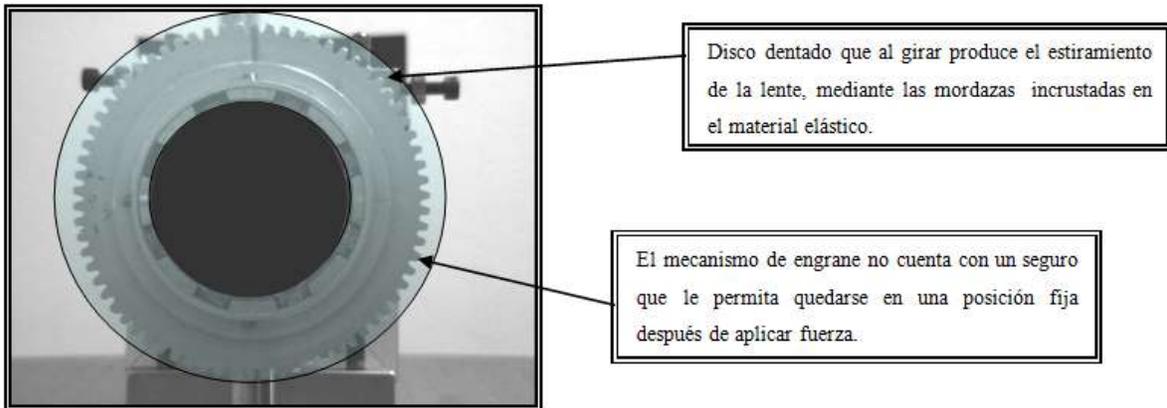


Figura 1.4: Vista frontal de la SEL.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

Antes de empezar a leer esta introducción, se podría tomar algunos minutos para revisar varios objetos alrededor de usted por ejemplo: el reloj, el teléfono celular, la silla, una lata de refresco, los interruptores de luz, una taza de café o bien la computadora. Pronto se puede ver que todos estos objetos y sus componentes individuales tienen diferentes formas; no los encontraría en la naturaleza tal como están en su cuarto. Se han transformado en diferentes formas a partir de materias primas y ensamblado como los productos que ahora ve. Notará fácilmente que algunos objetos están hechos en una sola pieza, como los clavos, tornillos, tenedores, ganchos de plástico para ropa o llantas de automóviles. Sin embargo, la mayoría de los objetos, como los motores de automóviles (inventados en 1876), las lavadoras de ropa (1910), los tostadores (1926), los aparatos de aire acondicionado (1928), los refrigeradores (1931), los bolígrafos (1938), las fotocopiadoras (1949) y miles de otros productos, se construyen mediante el ensamblado de varias partes y componentes fabricados a partir de numerosos materiales. Todos los productos mencionados se fabrican por medio de diversos procesos denominados manufactura [23].

2.1. TIPOS DE LENTES Y MONTURAS

En la actualidad, el estudio sobre lentes sintonizables, presenta una amplia gama de diseños y materiales utilizados en estos, tal es el caso del uso de membranas de silicón presentados por F Schneider para hacer lentes flexibles [22]. Los cuales consisten en mostrar la cualidad óptica de dos tipos de fluidos que se adaptan a la membrana de silicón.

El desarrollo de lentes sintonizables ha presentado un aumento considerable y durante los últimos años. En contraste; los sistemas mecánicos empleados en componentes ópticos convencionales, se han vuelto muy complejos y costosos en comparación con los empleados para

lentes sintonizables. En la actualidad tres tipos de lentes están basados en el funcionamiento de estos principios mecánicos primarios, los cuales están comercialmente disponibles.

El primero es el de la lente del electro-humectada de Varioptics [24]. Es una lente que presenta una abertura de 2.5 mm, de la cual su principal aplicación se desarrolla en la electrónica para artículos de uso cotidiano (los teléfonos celulares, agendas electrónicas de bolsillo, las computadoras portátiles).

La segunda lente es de Opto-tune y tiene una abertura de 6 mm de diámetro y es principalmente conveniente para las cámaras digitales y los microscopios. La lente sintonizable es basada en un polímero electroactivo que permite la deformación de una lente elástica [25].

El tercer producto que se encuentra en el mercado es el Holo-chip y consiste de una lente de un fluido simple basada en una interfaz fija a la membrana del silicón elástica. La distancia focal en la lente es variable y tiene una abertura de 10 mm y es ajustable mediante el movimiento mecánico de un anillo de sujeción [26]. Como una alternativa a las lentes disponibles comercialmente, F Schneider presentó una membrana de silicón ajustable con un piezoeléctrico integrado como se muestra en la figura 2.1, el cual bombea líquido para la actuación [27]. La lente es conveniente para el uso en los sistemas ópticos con una abertura clara de 2.5 mm [2].

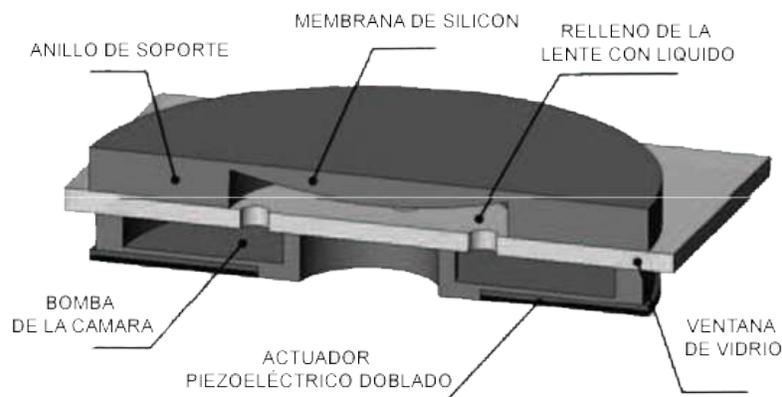


Figura 2.1: Lente ajustable con un adaptador piezoeléctrico integrado, imagen obtenida de “A low cost adaptive silicone membrane lens” [2].

2.2. MANUFACTURA

Manufactura, en un sentido completo, es el proceso de convertir materias primas en productos. También comprende las actividades en que el propio producto fabricado se utiliza para elaborar otros productos. Los ejemplos podrían incluir a las grandes prensas que forman las hojas metálicas usadas en accesorios y carrocerías para automóviles, la maquinaria para fabricar sujetadores, como tornillos, tuercas y las máquinas de coser ropa. El nivel de manufactura de una nación se relaciona directamente con su salud económica, por lo general, cuanto mayor es la actividad manufacturera de un país, mayor será el estándar de vida de su gente [23].

La palabra manufactura, deriva del latín manu factus, que significa “hecho a mano”, y apareció por primera vez en 1567. La palabra manufacturar apareció en 1683, la palabra producto significa “algo que se produce” y apareció junto con la palabra producción en algún momento durante el siglo XV. Los vocablos “manufacturar” y “producción” con frecuencia de utilizan de manera indistinta [11].

La manufactura puede fabricar productos discretos, es decir, partes individuales o productos continuos. Los clavos, engranes, bolas para rodamientos, latas para bebidas y monobloques para motores son ejemplos de partes discretas, aunque se producen en grandes volúmenes y capacidades de producción. En cambio el alambre, las hojas metálicas, los tubos y las tuberías de plástico son productos continuos, que se cortan en piezas individuales y se convierten así en productos discretos [23].

Por lo general, la manufactura es una actividad compleja que comprende de una amplia variedad de recursos y actividades, como se puede ver en la siguiente tabla 2.1

Tabla 2.1: Tabla de actividades y recursos.

Actividades	Recursos
Diseño del producto.	Maquinaria y herramienta.
Planeación del proceso.	Materiales.
Compra.	
Manufactura.	
Control de la producción.	
Servicios de soporte.	
Mercadeo.	
Ventas.	
Embarque.	
Servicios al cliente.	

Es fundamental que las actividades de la manufactura respondan a las diversas demandas y tendencias [23]:

1. Un producto debe satisfacer totalmente los requisitos de diseño, especificaciones y normas.
2. Un producto debe manufacturarse mediante los métodos más económicos y amigables con el medio ambiente. La calidad debe integrarse al producto en cada etapa, desde el diseño hasta el ensamblado, en vez de confiar solamente en las pruebas de calidad después de haberlo manufacturado.
3. En el muy competitivo ambiente actual, los métodos de producción deben de ser lo suficientemente flexibles para responder a las constantes demandas del mercado, a los tipos de productos y a las capacidades de producción, a fin de asegurar una entrega oportuna al cliente.
4. Los continuos desarrollos en los materiales, métodos de producción e integración a las computadoras, tanto de las actividades tecnológicas como de las administrativas en una organización manufacturera, deben evaluarse constantemente con miras a su implantación apropiada, oportuna y económica.
5. Las actividades de manufactura deben verse como un gran sistema, cuyas partes se relacionan entre sí en grados variables. Estos sistemas se pueden modelar para estudiar el efecto de factores como los cambios en las demandas del mercado, el diseño del producto, los materiales y los métodos de producción, tanto en la calidad como en el costo de los productos.
6. El fabricante debe trabajar con el cliente para obtener una retroalimentación oportuna y conseguir así una mejora continua del producto.
7. Una organización manufacturera debe luchar constantemente por obtener mayores niveles de productividad, que se define como el uso óptimo de todos sus recursos: materiales, maquina, energía, capital, mano de obra y tecnología. Debe maximizarse la producción por empleado, por hora en todas las fases [23].

La manufactura se originó entre los años 5000 y 4000 a.C. Es más antigua que la historia registrada, las marcas y los dibujos primitivos en las cuevas o en las rocas dependían de alguna forma del marcador o brocha, y se implementaba una “pintura” o algún medio para grabar en la roca. Era necesario fabricar herramientas apropiadas para esas aplicaciones. La manufactura de productos, que tenían diversos usos específicos comenzó con la producción de artículos de madera, cerámica, piedra y metal. Los materiales y procesos que se utilizaron para dar forma a productos mediante la fundición y el martillado se han desarrollado gradualmente a

lo largo de los siglos, usando nuevos materiales y operaciones más complejas, como crecientes capacidades de producción y mayores niveles de calidad [23].

Hasta antes de la revolución industrial, que comenzó en Inglaterra durante la década de 1750, los bienes se producían en lotes y se requería mucha confianza en la mano de obra en todas sus fases de la producción. A dicha revolución también se le denomina primera revolución industrial, ya que la segunda comenzó a mediados del siglo XX con el desarrollo de los dispositivos electrónicos de estado sólido y las computadoras. La mecanización moderna comenzó en Inglaterra y el resto de Europa con el desarrollo de la maquinaria textil y de las máquinas y herramientas para cortar metales. Esta tecnología, se trasladó de inmediato a los Estados Unidos, donde floreció rápidamente y se introdujo el importante avance del diseño, la fabricación y el uso de partes intercambiables, creadas por Eli Whitney a principios de 1800. Antes de esta aportación, era necesario en gran medida el ajuste a mano, porque no se podían fabricar dos partes exactamente iguales, ahora se da por entendido que podemos cambiar un tornillo roto de cierto tamaño con uno igual comprado años después en una ferretería local. Pronto siguieron nuevos desarrollos, cuyos resultados son incontables productos de uso común y sin los cuales hoy no podíamos imaginar nuestra vida [23].

Al inicio de la década de 1940 se alcanzaron hitos importantes en todos los aspectos de la manufactura. Aunque los romanos tenían factorías para producir en masa artículos de vidrio, al principio los métodos eran muy primitivos y por lo general muy lentos, con mucha mano de obra en el manejo de partes en la operación de la maquinaria. Hoy en día con la ayuda de los sistemas de manufactura integrados por computadora, los métodos de producción han avanzado tanto que, por ejemplo, las latas de aluminio para bebidas se manufacturan a velocidades de 500 por minuto, los agujeros en las hojas metálicas se perforan a razón de 800 por minuto y las bombillas se elaboran en cantidades de más de 2000 por minuto [23].

2.2.1. INGENIERÍA CONCURRENTE

Impulsada por la industria electrónica de consumo, se generó una gran necesidad de proveer productos al mercado lo más rápidamente posible. El razonamiento era que los productos introducidos antes gozaban de un mayor porcentaje del mercado y, en consecuencia por estas razones apareció la ingeniería concurrente, también denominada ingeniería simultánea, que llevó al método de desarrollo de productos.

La ingeniería concurrente integra el diseño y la manufactura de un producto con vistas a optimizar todos los elementos incluidos en su ciclo de vida. Este método reduce (a) los

cambios en el diseño y la ingeniería de un producto, y (b) el tiempo y los costos comprendidos en llevarlo desde su diseño conceptual hasta su producción e introducción en el mercado.

El diseño del producto comprende a menudo la preparación de modelos analíticos y físicos del mismo para estudiar factores como fuerzas, esfuerzos, deflexiones y una forma óptima. La necesidad de dichos modelos depende de la complejidad del producto. Hoy en día, la construcción y el estudio de modelos analíticos se simplifica altamente con el uso de técnicas de modelado y diseño asistido por computadora (CAD), ingeniería asistida por computadora (CAE) y manufactura asistida por computadora (CAM). Los sistemas CAD son capaces de analizar rápida y totalmente desde un simple soporte o un eje hasta estructuras grandes y complejas. Por ejemplo, el avión de pasajeros Boeing 777 de dos motores se diseñó en su totalidad por medio de computadoras (diseño sin documentos), con 2000 estaciones de trabajo conectadas a 8 servidores de diseño. A diferencia de los modelos anteriores, no se elaboraron prototipos o maquetas y el avión se construyó directamente a partir del software CAD/CAM desarrollado [11].

Al utilizar la ingeniería asistida por computadora es posible simular, analizar y probar eficientemente, con precisión y rapidez, el desempeño de las estructuras sujetas, por ejemplo, a cargas estáticas o cambiantes y gradientes de temperatura. La información dentro de la empresa o institución, se pueden optimizar los diseños y realizar modificaciones, directa y fácilmente, en cualquier momento [11].

2.2.2. CAD /CAM /CAE

2.2.2.1. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)

El diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés), comprende el uso de computadoras para crear planos de diseño y modelos de productos, el diseño asistido por computadora se asocia con gráficos interactivos por computadora, conocidos como sistema CAD. Los sistemas de diseño asistido por computadora son herramientas poderosas y se utilizan en el diseño y modelado geométrico de componentes y productos [11].

Los planos se generan en estaciones de trabajo y el diseño se muestra de modo continuo en el monitor con diferentes colores para los distintos componentes. El diseñador puede conceptualizar con facilidad la parte a diseñar en las pantallas de gráficos y considerar propuestas alternativas o modificar con rapidez un diseño específico que satisfaga requisitos particulares.

Con el uso de un software tan competitivo como lo es SolidWorks® , el diseño puede someterse al análisis de ingeniería e identificar problemas potenciales, como exceso de carga, deflexión o interferencia en superficies de contacto durante el ensamble . También se almacena información (lista de ensambles, especificaciones e instrucciones de manufactura) en la base de datos CAD. Utilizando esta información, el diseñador puede analizar el costo de manufactura en los diseños alternativos [11].

2.2.2.2. MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAM)

La manufactura asistida por computadora (CAM por sus siglas en inglés), comprende el uso de computadoras para auxiliar en todas las facetas de manufactura de un producto. Debido a los beneficios conjuntos, a menudo el diseño asistido por computadora y la manufactura asistida por computadora se combinan en sistemas CAD/CAM. Esta combinación permite transferir información de la etapa de diseño a la etapa de planificación de la manufactura sin necesidad de transferir manualmente los datos sobre la geometría de la parte otra vez. La CAM almacena y procesa la base de datos desarrollada durante el CAD con los datos e instrucciones necesarios para operar y controlar maquinaria de producción, equipo de manejo de materiales y ensayos e inspección automatizados para alcanzar la calidad de los productos. Los sistemas CAD/CAM también cuentan con una capacidad de codificar y clasificar partes en grupos que tienen formas similares utilizando codificación alfanumérica [28].

Algunos rasgos importantes del CAD/CAM son las operaciones de maquinado es su capacidad para describir la trayectoria de las herramientas. Las instrucciones se generan en programas para computadora y el programador las puede modificar para optimizar la trayectoria de estas, en caso de posibles colisiones con las prensas de sujeción, soportes fijos u otras interferencias [29].

Al estandarizar el desarrollo de los productos y reducir el esfuerzo del diseño, pruebas y trabajo de los prototipos, CAD/CAM ha hecho posible reducir de modo significativo los costos de manufactura y ha mejorado la productividad. Algunas aplicaciones de CAD/CAM son las siguientes:

- Programación, control numérico y robots industriales.
- Diseño de matrices o dados y moldes para fundición, por ejemplo, en los que se programan anticipadamente las tolerancias por contracción.

- Matrices o datos para operaciones de trabajo mecánico, como matrices complejas para formado de láminas y matrices progresivas para estampado.
- Diseño de herramental y soportes fijos, y electrodos EDM.
- Control de calidad e inspección, como las maquinas de medición por coordenadas programadas en una estación de trabajo de CAD/CAM.
- Planeación de programación de proceso.
- Distribución de planta.

Una parte importante, para el desarrollo de la manufactura es el análisis de elementos o piezas, de ello se encarga la ingeniería asistida por computadora, dado que con ella se determinará si la pieza o piezas, son las adecuadas o bien si el material propuesto es el más adecuado y además cumple con las normas establecidas según sea el caso [29].

2.2.2.3. INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAE)

La ingeniería asistida por computadora (CAE, por sus siglas en inglés) permite que diversas aplicaciones compartan la información en la base de datos. Estas aplicaciones incluyen a) el análisis de elementos finitos de esfuerzos, deformaciones, deflexiones y distribución de temperatura en estructuras y miembros de soporte de carga; b) la generación, el almacenaje y la recuperación de datos de NC (control numérico por sus siglas en inglés), y c) el diseño de circuitos integrados de diversos dispositivos electrónicos [29].

2.2.3. QFD

DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD

El despliegue de la función de la calidad (Quality Function Deployment (QFD), por sus siglas en inglés), es relacionado comúnmente con “la voz de los clientes”, o con “la casa de la calidad”. QFD es un proceso que asegura que los deseos y las necesidades de los clientes sean traducidas en características técnicas. Estas características son manejadas por la compañía mediante la función del diseño, o mejor aún, a través de un equipo multifuncional que incluye ventas, marketing, Ingeniería de diseño, Ingeniería de manufactura y operaciones. El principal objetivo de las funciones realizadas es centrar el producto o servicio en la satisfacción de los

requerimientos del cliente [30].

El QFD es una valiosa herramienta que puede ser utilizada por cualquier compañía, o personas que necesiten comparar un producto nuevo con uno ya existente en el mercado. Su flexibilidad y adaptabilidad permite un buen desempeño en las industrias manufactureras y de servicios. El QFD utiliza un método gráfico en el que se expresan relaciones entre deseos de los clientes y las características del diseño. Es una matriz que enlista las necesidades de los clientes QUE'S o " atributos" comparándolas con las "características de diseño" COMO'S [31].

Este proceso se resuelve por medio de las relaciones de importancia que presenten cada uno de los requerimientos, así como los valores establecidos, el QFD busca maximizar los requerimientos del cliente proporcionándole a estos un valor agregado mediante los requisitos del cliente traducidos en requerimientos técnicos [30].

Las expectativas y necesidades de los clientes son recolectadas mediante técnicas de investigación de mercados: entrevistas, encuestas, exposiciones, etc. Mediante la casa de la calidad se organizan los datos obtenidos. El uso de matrices es la clave para poder construir la casa. En la matriz se muestran las relaciones entre las necesidades de los consumidores y las características de diseño [31].

Beneficios:

- Menor tiempo de desarrollo desde el concepto hasta el arranque de producción.
- Pocos cambios de ingeniería con el producto en producción.
- Diseño congruente con las necesidades y expectativas del cliente, a través de equipos multidisciplinarios.
- Satisfacción de las necesidades del cliente.
- Traduce los requerimientos del cliente desde un lenguaje ambiguo a los requerimientos de diseño específicos para el desarrollo del producto y su manufactura.
- Los requerimientos del cliente son medibles, alcanzables y potencialmente mejorables.
- Identifica las características críticas para la calidad (CTQs) del producto y su desempeño en el mercado.
- En la planeación de productos y procesos operativos, ayuda a disminuir, e incluso a eliminar, las iteraciones de rediseño que se realizan en los métodos tradicionales ya que

incorpora desde el principio los diferentes enfoques que intervienen en la definición de las características de productos y procesos.

- Promueve una mejor comunicación y labor de equipo entre el personal que interviene en todas las etapas, desde el diseño hasta la comercialización del producto [30].

Procedimiento del QFD.

Procedimiento general:

1. Definición del objetivo del análisis: a partir del cual se busca identificar los atributos del producto requeridos por los clientes, así como sus características técnicas, para después relacionar ambos en una matriz.
2. Evaluación competitiva del producto y las características técnicas: Estas dos se correlacionan entre sí para establecer metas (se puede mencionar que los dos primeros puntos sólo son para la casa número uno de la calidad) [30].

El QFD, consiste básicamente en identificar las necesidades del cliente hacia un producto en particular, dentro de una matriz denominada casa de la calidad, en la cual se relacionan los que's, los como's dando origen a los cuato's, donde los que's se traducen como los requerimientos del cliente, los como's en como se resolverán dichos requerimientos y los cuato's en las especificaciones o bien valores objetivos.

Este proceso se resuelve por medio de las relaciones de importancia que presenten cada uno de los requerimientos, así como los valores establecidos, el QFD busca maximizar los requerimientos del cliente proporcionándole a estos un valor agregado a los requisitos del cliente traducidos en requisitos técnicos [30].

El Profesor Yoji Akao es considerado como el precursor de esta técnica que fue llevada a los EEUU. en los años 80 y que comienza a tener muchos adherentes. El Dr. Shigeru Mizuno es también considerado otro de sus precursores, la cual utiliza un juego de matrices para organizar la información recabada del cliente. Esta técnica es considerada como una filosofía orientada en el cliente.

Si se quiere definir, se puede decir que es una herramienta para desarrollar productos o servicios que sistemáticamente se ajusta a los requerimientos del cliente, a los requerimientos de la producción y sirve de guía a las operaciones de producción.

George R. Perry, Vicepresidente de Calidad y Confiabilidad de Allied Signal Inc., define el QFD como: “la forma sistemática de encerrar y desarrollar el futuro producto o servicio, sus

características y sus especificaciones tanto como la adecuada selección de equipos, métodos y controles que conducen a satisfacer la demanda de los clientes en el mercado”.

QFD, es un sistema para trasladar y traducir los requisitos de los clientes en requisitos apropiados al ciclo de desarrollo del producto desde la investigación y desarrollo de la ingeniería, la manufactura, mercado, ventas y distribución.

Aunque no es considerada por los gurúes de la calidad como una herramienta de la calidad es una herramienta efectiva para mejorar la calidad en el buen sentido de la palabra. Es una poderosa herramienta de planificación. El término Quality Function Deployment se deriva de seis caracteres chinos:

HIN SHITSU = calidad, atributo, característica.

KI NO = función.

TEN KAI = desarrollo, despliegue, difusión.

Aquí se aprecia que no fue usado el término para designar calidad sino cualidad, atributo o característica. Con esta herramienta se mejora el desarrollo del producto, los objetivos generales se rompen en objetivos específicos, las acciones se asignan de acuerdo a un esfuerzo comprensivo del equipo de trabajo.

El desarrollo del trabajo se realiza mediante un conjunto de matrices y gráficos que contienen los requerimientos del cliente, sus relativos requerimientos técnicos para la planificación del producto, su diseño, planificación del proceso y de la puesta del producto en la tienda.

Esto trae como consecuencia en términos sencillos una disminución de problemas, pocos cambios de diseño, disminución del ciclo de desarrollo del producto, lo cual trae acompañado una mejora en la ingeniería y una reducción de costos. Esto a su vez trae como consecuencia una mayor satisfacción del cliente, en el mediano plazo un incremento de las utilidades, costos de garantía bajos y un incremento del porcentaje de mercado. Cuando el proceso es correctamente utilizado, se crea un loop, un ciclo cerrado, que consiste de un mejoramiento de los costos, calidad y disminución de los tiempos de línea. Crece la productividad y los márgenes de mercado.

Aunque esta tecnología no es considerada compleja, sino más bien una tecnología de sentido común, trabajando en conjunto, los japoneses han logrado ser altamente competitivos

y eso les ha dado una ventaja. El QFD guía el desarrollo de tecnología hacia responder y satisfacer los requerimientos del cliente.

A continuación se proponen los lineamientos básicos sobre la cual trabaja el QFD. Propósitos básicos de QDF estos son:

1. Considerar la opinión del cliente
2. Capta o evitar la pérdida de información
3. Considerar las diferencias individuales y las funciones de trabajo orientadas a diferentes requerimientos.

Beneficios: se menciona entre otros los siguientes:

1. Incrementar los porcentajes de mercado
2. Obtener mayores utilidades que se obtienen por:
3. Reducción de costos
4. Productos y servicios que satisfacen al cliente
5. Significativos ahorros de tiempo
6. Reducción de las tasas de interés.

QFD utiliza para su despliegue un conjunto de Matrices y que por aspectos históricos se mencionan los cuatro tipos de matrices que inicialmente definió Y. Akao. Cada matriz se llena buscando los requerimientos del cliente, características del proceso, del producto y de control. Esto se apoya de herramientas tales como el diagrama de afinidad, el diagrama de relaciones, Pareto, y fundamentalmente brainstorming. Parte de la mecánica se mencionó anteriormente cuando se describió como el QFD, sigue o se basa en el modelo del Prof. Nonaka Como se puede observar en las figuras 2.2 y 2.3.

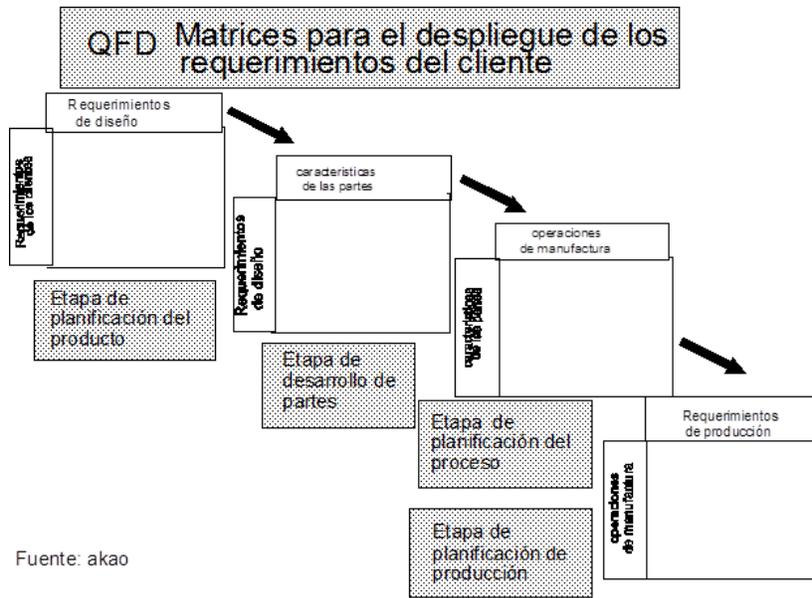


Figura 2.2: QFD matrices para el despliegue de los requerimientos del cliente

MATRIZ BASICA DEL QFD

		Característica de calidad												
		A	N	Plan	P	B	C	D						
Demandas del cliente														
	Total											Total		
	%													
	Empresa ahora													
	Competencia X													
	Competencia Y													
	Plan													

Importancia

Empresa Ahora

Competencia X

Competencia Y

Plan

Indicador de Mejoramiento

Puntos de Venta

Peso Absoluto

Peso Demandado

Correlación fuerte: \triangle^5 Mediana \bigcirc^3

Débil: \square^1

Puntos de venta = 1.5, 1.2 ó 1

$D = A \cdot B \cdot C$

$B = P \cdot \frac{\quad}{N}$

Figura 2.3: Matriz básica del QFD

2.2.4. PLANEACIÓN DE PROCESOS (PP)

Debido a la intensa competencia, y demandas exigidas cada vez más sofisticadas en el mercado, y la diversificación y cambios en la tecnología, ha aumentado la importancia del desarrollo de productos innovadores. Uno de los imperativos para reducir el tiempo de desarrollo de estos, es aminorar al máximo su tiempo de fabricación; además de reducir éste tiempo, se requiere encontrar la mejor solución para satisfacer las necesidades del mercado, y finalmente es necesario reducir el costo de desarrollo del nuevo producto. La planeación de procesos (PP) es de vital importancia para lograr estos objetivos [32].

La manufactura hace posible que las ideas concebidas y especificadas en diseño se conviertan en realidad con la finalidad de obtener un producto o artículo útil, de calidad, y mejor que los productos existentes en el mercado [33]. Para lograr esto, tradicionalmente el desarrollo de nuevos productos se segmenta en distintas fases, iniciando con una idea y gradualmente progresa o evoluciona a un proceso detallado e implementación. De acuerdo con Khurana and Rosenthal.

La primera etapa o fase de preconcepto o evaluación estratégica, es una etapa preliminar que identifica oportunidades, tales como generación de ideas, análisis y planeación estratégica del mercado y tecnologías, y el desarrollo de planes a largo plazo para todas las líneas o familias de productos.

La segunda etapa, concepto, inicia el programa específico del nuevo producto mediante la exploración de los requerimientos o necesidades del mercado y el desarrollo de nuevos conceptos para el nuevo producto.

La tercera fase, factibilidad y planeación, genera un concepto ganador o formal que incluye la definición de los requerimientos, responsabilidades, y el costo de las partes principales del producto. Las especificaciones técnicas, diseño de detalles, ensayos y validación de prototipos, fabricación, comercialización y actividades de logística se realizan en la fase de ejecución. Se debe enfatizar que el resultado final del proceso de diseño de detalles del nuevo producto son documentos y dibujos que describen en detalle cada componente de éste y esto se utilizará para planear la producción y procesos, para la fabricación y ensamble del producto.

Antes de asignar recursos para iniciar la producción del nuevo producto, éste es probado y validado para asegurar o comprobar que cumple con los requerimientos de función y otros atributos tal como se ha planeado. Las pruebas consisten en construir prototipos para productos que ensamblan, operaciones piloto para procesos, o desarrollar alguna simulación para

servicios. Una vez que el nuevo producto ha sido validado, la compañía inicia la planeación de la producción y procesos para el nuevo producto. En esta fase se adquieren y se instalan maquinaria y equipo, instalaciones físicas se arreglan o se construyen, se contratan y se capacitan a operadores y personal en general.

Para lograr un diseño y desarrollo exitoso, es importante mencionar que debe haber una integración total de todas las áreas funcionales, bajo principios de la ingeniería concurrente tales como, la comunicación, la toma de decisiones, la motivación, la integración y el trabajo en equipo [34]. Para fabricar productos de alta calidad, al costo mínimo posible, se requiere comprender las relaciones complejas de varios factores, como las especificaciones y diseño del producto, la selección de materiales, y la selección de los procesos de manufactura, los cuales deberán estar íntimamente interrelacionados.

Los diseños o productos continuamente se están innovando para satisfacer mejor al cliente, y como consecuencia de esto los procesos se optimizan, con la finalidad de reducir tiempos y costos de producción y ensamble, causados principalmente para eliminar o disminuir rechazos, retrabajos y desperdicios que se generan en los procesos.

Es en este aspecto en donde radica la importancia de la PP, que es fundamental para producir un producto con las características declaradas por diseño, resultando en beneficios tanto para el fabricante como para el consumidor [32].

La PP es la creación de un método particular y único de fabricación, que generalmente comprende un cierto número de pasos u operaciones.

“La PP, es la determinación del tipo y orden apropiados para las actividades u operaciones (procesos) necesarios para la fabricación de un producto, un componente o una parte de tal manera que se cumplan las especificaciones de diseño”.

Esto significa que la PP, esencialmente determina cómo un componente se fabricará. Por lo que se puede considerar esta etapa como la mayor determinante del costo de producción y de las posibles ganancias generadas, es decir, tiene como objetivo minimizar el costo de producción, ya que depende en buena medida en esta etapa, pues al eliminar, juntar, o disminuir el tiempo de una operación, se pueden reducir costos, mano de obra, tiempos de producción, desperdicios, entre otros.

La PP también permite determinar las rutas apropiadas del producto a través de las instalaciones físicas. Siempre existirán muchas restricciones o limitaciones en el proceso de

toma de decisiones en la planeación de procesos, como son: la capacidad de la maquinaria, el volumen de producción, hasta a la habilidad de los operarios para maniobrar y fijar las piezas de trabajo o para utilizar adecuadamente las herramientas de sujeción e inspección.

En forma paralela, el departamento de manufactura estima los costos de cada operación, determinada en la planeación de procesos, la cantidad de materia prima necesaria a ordenar, así como también para planear la capacidad de planta y de maquinaria, para determinar los posibles cuellos de botella del sistema, y para realizar otras funciones de control necesarias. Mientras que la ingeniería de proceso o departamento de producción determina la secuencia de las operaciones de los productos o partes en las diferentes máquinas que se tengan o que se hayan seleccionado, así como también la asignación física de la ruta de los productos y vigilar el avance de los productos a través del proceso.

La PP, se considera como un puente entre el diseño y la manufactura, traduciendo todas las especificaciones de diseño en detalles de procesos de manufactura, en otras palabras, la información de diseño (dimensiones, tolerancias, acabados, especificaciones), se traduce en requerimientos de procesos de manufactura (M.P, procesos, maquinaria, herramientas de corte, parámetros de corte). En manufactura, el trabajo es producir todos los componentes que satisfagan las especificaciones propuestas, con la finalidad de que todas las partes sean ensambladas posteriormente para formar un nuevo producto; al realizar todo esto adecuadamente se asegurará la funcionalidad y la calidad del producto [32].

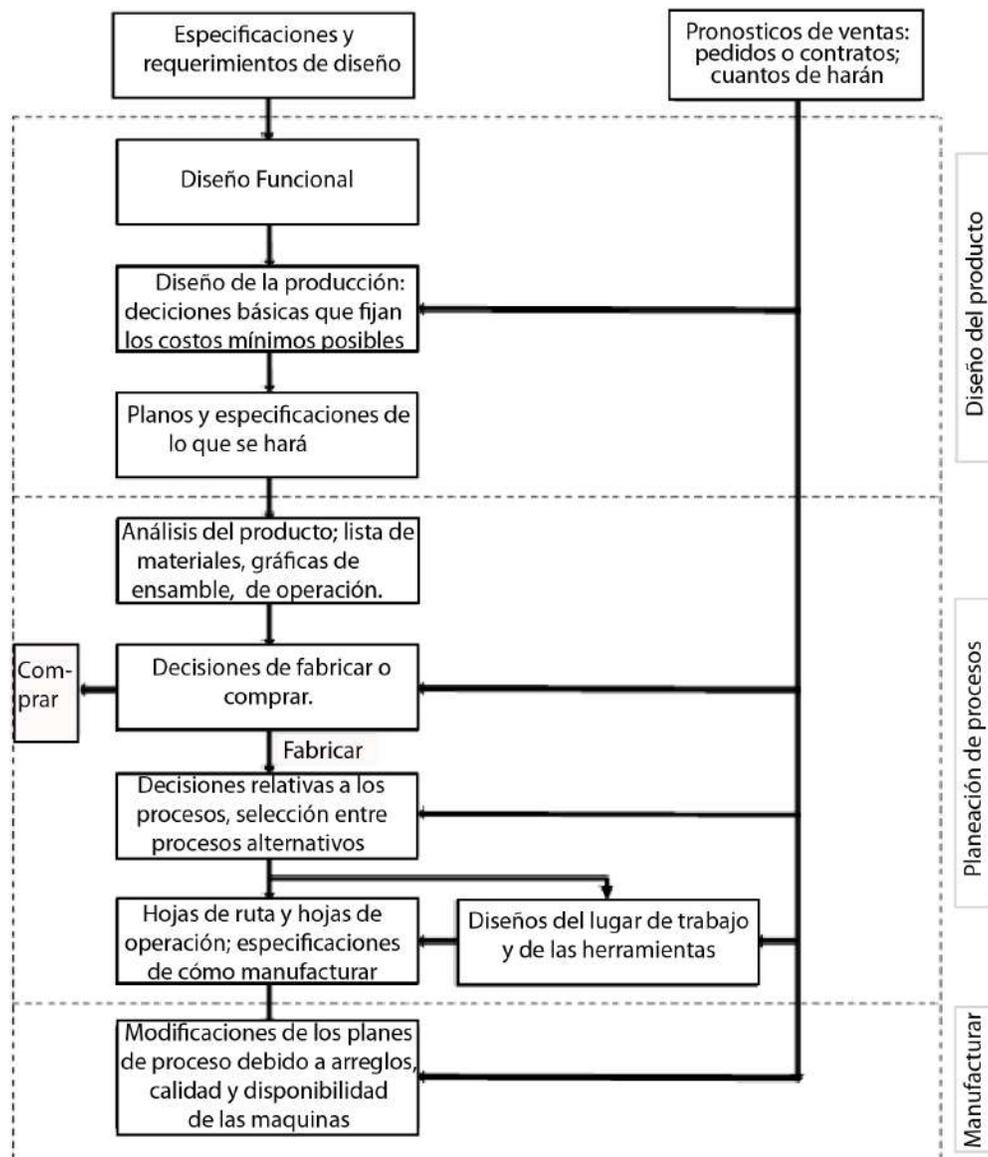


Figura 2.4: Planeación de Procesos.

La Figura 2.4 muestra una metodología para la planeación de procesos, de acuerdo a Bufa (1978). Como se puede observar en esta figura, las funciones de las actividades de diseño, planeación de procesos y manufactura están bien delimitadas. Ésta metodología es un proceso sistemático para realizar una adecuada planeación de procesos, independientemente del tipo de producto o tamaño de la empresa.

Por otro lado, el sistema de control de las actividades de la PP se muestra en la Figura 2.5. Esto significa que el PP tiene entradas y salidas; las entradas, como especificaciones de diseño, dibujos de detalles del nuevo producto, lista de materiales y partes, etc. entran al sis-

tema, en donde se transforman, produciendo salidas como: operaciones, secuencias y tiempos. Como se observa en esta figura, el sistema de control cuenta con una verificación continua de las salidas, mediante la comparación de estos con criterios establecidos o resultados deseados, resultando en una retroalimentación, para corregir las entradas [32].

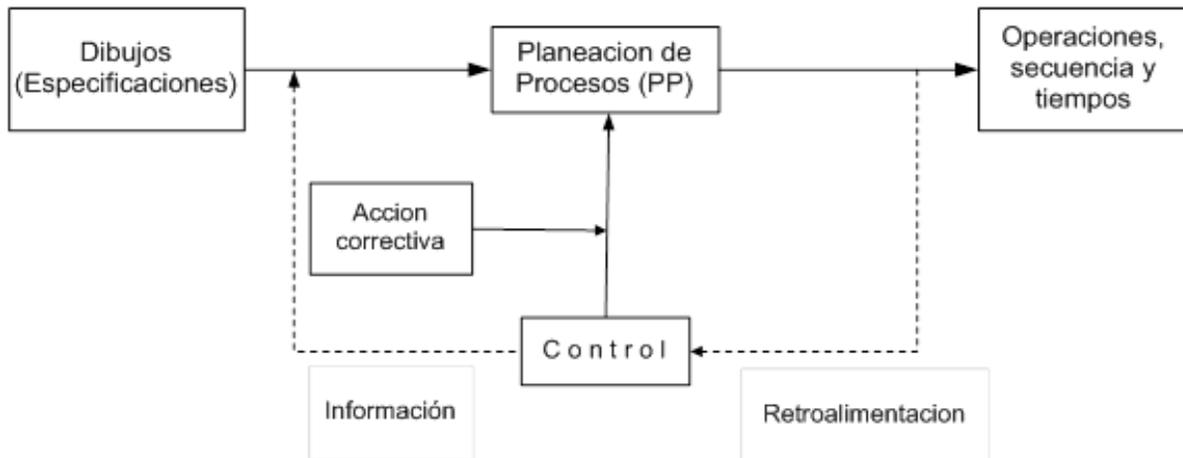


Figura 2.5: Diagrama particular de la planeación de procesos.

Hay muchas orientaciones o acercamientos para la planeación de procesos, otras metodologías para la PP, como la propuesta por Singh [35], que consiste de los siguientes pasos:

1. Análisis de requerimientos de partes.
2. Selección de las piezas de trabajo.
3. Determinar las operaciones de manufactura y su secuencia.
4. Selección de máquinas - herramienta.
5. Selección de herramientas, dispositivos de sujeción e instrumentos de inspección.
6. Determinar las condiciones de maquinado: velocidad de corte, avance y profundidad de corte, tiempo de preparación, tiempo de procesamiento.

1. Análisis de requerimientos de partes

El objetivo de este paso es contestar la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los requerimientos de las partes? En el nivel de ingeniería en diseño, los requerimientos pueden definirse como:

- I. Especificaciones de las características sobresalientes de las partes.
- II. Especificaciones de dimensiones.
- III. Especificaciones de tolerancias.

El análisis del requerimiento de partes terminadas es el primer paso en la PP, aquí se analizan las características distintivas de las partes. Ejemplo de características geométricas, como: superficie plana, cilindro, cono, escalón, borde, fillets, entre otras. Estas características pueden modificarse, agregando ranuras, hoyos, estrías, aberturas, cavidades.

2. Selección de piezas de trabajo

La selección de la pieza de trabajo es un aspecto muy importante en la PP. Involucra los siguientes atributos: forma, tamaño (dimensiones y peso), material. Ejemplo: la forma de una parte bruta o pieza de trabajo podría tener formas diversas: barra, lingote, solera, pieza cuadrada, o una pieza forjada. Desde el punto de vista económico y precisión de la dimensión, se requiere considerar con cuidado el tamaño de la pieza de trabajo. El peso y el material de la pieza de trabajo lo determinan los requerimientos funcionales de la pieza requerida.

3. Determinar Operaciones de manufactura y sus operaciones

El siguiente paso dentro de la PP, es determinar el tipo apropiado de operaciones y su secuencia para transformar las características distintivas, dimensiones y tolerancias de una parte o pieza de trabajo, a un estado terminado.

Siempre habrá diferentes maneras de cómo manufacturar un diseño dado. Muchas veces existirán restricciones o limitaciones en las empresas, tales como factores económicos o técnicos, como lo son la accesibilidad y preparación de la maquinaria que podrían requerir que algunas características geométricas sean maquinadas antes o después de otras; algunas mas como los tipos de máquinas y su flexibilidad, costo de las herramientas de sujeción e inspección, y número de herramientas que podrían cargarse en la máquina; el tamaño del lote; requerimientos de rugosidad o acabado superficial y tolerancia, que podrían influir en la secuencia de las operaciones, entre muchos más [36].

La elección de un proceso de manufactura queda regularmente determinada por diversas consideraciones, algunas de estas son:

- Las características y propiedades del material de la pieza.
- La forma, tamaño y espesor de la parte.
- Los requerimientos en las tolerancias y acabados superficiales.
- Los requerimientos de funcionamiento de la pieza.
- El volumen (cantidad) de producción.
- El nivel de automatización requerido para cumplir con el volumen y la rapidez de producción.
- Los costos de las operaciones de la manufactura.

Muchos materiales se pueden procesar a temperatura ambiente, mientras que otros requieren temperaturas elevadas. Algunos materiales son fáciles de trabajar, por ser suaves y dúctiles; otros, porque son duros, frágiles y abrasivos, requieren técnicas especiales de procesamiento y materiales especiales de herramienta y dados. Es decir, influye el material a utilizar en la selección de las operaciones [37].

Sin embargo los tipos de máquinas y herramientas disponibles, así como el tamaño del lote influyen en la secuencia del proceso.

La fuerza de corte y la rigidez de la pieza de trabajo - herramienta - máquina también influyen la secuencia de las operaciones. Las restricciones de las características geométricas, dimensiones, tolerancias, accesibilidad, preparación son algunos de los muchos factores que dictan los requerimientos de procesamiento y su secuencia. Aunque algunas veces, las operaciones son dependientes entre ellas.

Resumen de restricciones para definir operaciones y secuencia:

I. Accesibilidad y preparación de máquina;

a. Tipo de máquinas (número de ejes, flexibilidad);

b. Herramientas disponibles y número de herramientas que podrían cargarse en la máquina;

c. Tamaño de lote;

d. Acabado superficial (rugosidad);

e. Tolerancias;

f. Operaciones dependientes;

g. Fuerzas de corte, rigidez pieza de trabajo - máquina - herramientas.

Criterios de evaluación:

- a. Calidad del producto a fabricar, y
- b. Eficiencia del maquinado.

Todo proceso de manufactura tiene ventajas y limitaciones; pues la mayoría de las piezas a manufacturar se pueden fabricar con uno, dos o más procesos de fabricación posibles, pero todo dependerá de los requerimientos de calidad, aspectos económicos, flexibilidad del proceso, decisiones administrativas, y demanda principalmente, para la selección adecuada de las operaciones [38].

4. Selección de máquinas herramientas

Los factores o criterios que influyen en la selección de máquinas - herramientas se clasifican de la siguiente manera:

- I. Atributos relacionados con la pieza de trabajo: dimensiones de la pieza de trabajo, tolerancias, forma del material, entre otras.
- II. Atributos relacionados a la máquina - herramienta: capacidad, tamaño, modo de operación (manual, semiautomático, CNC), capacidad de cambio automático de herramienta.
- III. Volumen de producción: Cantidad de producción y frecuencia de pedidos.

Los criterios para evaluar o seleccionar la máquina más adecuada para completar una operación son:

- I. Costo de producción por unidad;
- II. Tiempo de producción; y
- III. Calidad.

5. Selección de herramientas, dispositivos de sujeción e instrumentos de inspección.

Una combinación de máquina - herramienta y herramienta de corte se requiere para generar características geométricas en la pieza de trabajo. Los dispositivos de sujeción se usan para colocar y sostener las piezas de trabajo, para generar las características geométricas.

El equipo de inspección es necesario para asegurar la precisión de las dimensiones, tolerancias y acabado superficial de las características geométricas. Las formas de inspección son: en línea o fuera de línea. La selección de máquinas herramienta, herramientas de

corte, dispositivos de sujeción, equipo de inspección se basa primeramente en las características geométricas requeridas.

Sin embargo las especificaciones para la herramienta de corte incluyen varios ángulos, tales como el filo, claros, ejes de corte, radio de la nariz (punto). El objetivo principal de los dispositivos de sujeción es sostener apropiadamente y con seguridad las piezas de trabajo.

Algunos factores que determinan la selección o diseño de los dispositivos de sujeción son: forma, dimensiones, precisión, razón de producción, y variedad de partes. También existe una gran gama de herramientas de corte, desde: aceros de alta velocidad, carburos, cerámica, y diamante.

Pero de entre miles de herramientas de corte, ¿cómo seleccionaría un planeador de procesos la herramienta apropiada?

Entre los criterios más comunes pueden enlistarse las siguientes:

- I. Consultar a proveedores: lo cual ayudaría a mejorar la productividad a través de la recomendación de la herramienta adecuada; esto además permite conocer la opinión de los expertos en el proceso de decisión.
- II. Considerar el impacto de la herramienta en el costo de las operaciones de maquinado, y no en el costo inicial de las herramientas; normalmente el costo de la herramienta oscila entre el 3% al 4% del costo de producir una parte.
- III. Considerar otros costos como refrigerantes, preparación de la máquina y mano de obra, los cuáles son afectados negativamente o positivamente por las herramientas.

Una buena selección de la herramienta de corte, puede tener un impacto muy importante en el costo de producción. Por ejemplo:

- I. Herramientas con resistencia al desgaste, extienden la vida de la herramienta, por lo que reducen el costo del herramental y reducen el tiempo de cambio de herramienta.
- II. Herramientas que son duras y que trabajan a alta velocidad y avance, mejoran de manera significativa el tiempo de los ciclos (tiempo de producción por pieza) y reducen el costo por pieza.
- III. Las herramientas de precisión que reducen la desviación de tolerancias y que proveen

acabados superficiales consistentes, normalmente reducen o eliminan desperdicio o rechazos.

Definición de Criterios

El proceso de selección de herramientas involucra un número de pasos; todos se relacionan con la aplicación:

1. Definir la operación: identificar si la operación es de desbaste, acabado, una sola operación de corte. Investigar si la operación requiere refrigerante o enfriamiento, mínima calidad de lubricación, o maquinado en seco. Todos estos aspectos tienen un impacto en la selección de la herramienta.
2. Definir la geometría de la parte: es muy importante identificar las características geométricas más complicadas o complejas.
3. Definir el material de la pieza de trabajo: las aplicaciones actuales demandan una variedad de materiales que van más allá de las fundiciones y aceros, tales como: magnesio, aluminio, aceros HSLA, compósitos.
4. Determinar la rigidez de dispositivos de sujeción, los usuarios de las herramientas deben considerar si la partes o componentes tienen o no paredes delgadas o requieren el uso de herramientas con “mango o base”, largo.
5. Definir el tipo de proceso u operación: definir si la operación es: fresado, torneado, dividiendo/estría, ranura, muesca, abertura, cortar, agujero, taladrar, roscado, o algún otro.
6. Cuando las operaciones se han definido, se procede a seleccionar el herramental y por lo tanto el proveedor, el cual provee de información acerca del diseño y geometría del cortador; material y composición; recubrimiento y desempeño; tipo de sujetador de herramienta.
7. Considerar las velocidades y avances óptimos para las operaciones y tipos de herramientas.
8. Determinar condiciones de maquinado y tiempo de producción. Una vez que se ha especificado el material de la pieza de trabajo, “máquina herramienta”, y herramientas de corte, la pregunta ahora es: ¿qué se puede controlar para reducir el costo y mejorar la razón de producción?

Las variables controlables son la velocidad de corte, avance y la profundidad de corte. En conjunto estas variables se les denomina como condiciones de maquinado.

2.2.5. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS

En general, el diagrama de flujo de procesos cuenta con mucho mayor detalle que el diagrama de proceso. Como consecuencia, no se aplica generalmente a todos los ensambles, si no que a cada componente de un ensamble. El diagrama de flujo de procesos es particularmente útil para registrar los costos ocultos no productivos como, por ejemplo las distancias recorridas, los retrasos y los almacenamientos temporales. Una vez que estos periodos no productivos se identifican, los analistas pueden tomar medidas para reducirlos y, por ende, reducir también sus costos.

Además de registrar operaciones e inspecciones, los diagramas muestran todos los retrasos de movimientos y al almacenamiento a los que se expone un artículo a medida que recorre la planta, estos diagramas necesitan varios símbolos además de los de operación en inspección que se utilizan en los diagramas de proceso.

2.3. METODOLOGÍA

Es importante mencionar que para desarrollar y fabricar un producto, dependiendo de los requerimientos existen diversas metodologías, debido a que este trabajo representa la implementación de una de manufactura avanzada se toma como base la metodología de Diseño Total.

2.3.1. METODOLOGÍA “DISEÑO TOTAL”

El proceso de diseño ha sido el punto de investigación durante muchos años, ya que es parte medular del desarrollo de diversos factores, por ello existen diversas metodologías encaminadas a un proceso en el cual se incluyen diversos factores, cabe señalar que cada metodología es viable en ciertos aspectos de acuerdo al alcance de la misma, en este proyecto se ha de utilizar la metodología llamada “DISEÑO TOTAL”, la cual fue propuesta y desarrollada por Stewart Pug en 1990. *“El diseño total es una actividad sistemática indispensable, a partir de las necesidades del mercado y/o usuario para la venta del producto con éxito a fin de satisfacer esa necesidad. Una actividad que abarca productos, procesos personas y organizaciones”* [3]. La metodología se muestra esquemáticamente en la figura 2.6 , con lo cual se puede mostrar el alcance de la misma [3].

Como se puede apreciar en la figura 2.6 la información de los requerimientos fluye a partir del mercado como principal fuente de datos acerca del requerimiento de satisfacer una

necesidad, posteriormente se definen las especificaciones bajo las cuales debe cumplir cierta funcionalidad de acuerdo a la necesidad a cubrir, de lo cual se parte para realizar, para que una vez definido ese punto, es determinado el diseño detallado, fase en la cual se caracterizan formalmente los datos de las fases anteriores para posteriormente avanzar a la manufactura de los componentes (fase en la que se centra este proyecto), con la visión de tener en cuenta que en el desarrollo hasta este punto es de acuerdo a la necesidad original, y finalmente se vuelve a la parte de mercado, puesto que el proceso de diseño implementación del producto parte de una necesidad a cubrir. Es muy importante resaltar que esta metodología funciona en una secuencia iterativa entre fases, ya que si existe la posibilidad de realizar algún ajuste derivado de alguna fase anterior es posible regresar a la misma, y retroalimentar lo realizado a fin de detallar y facilitar el resultado de fases posteriores [3].

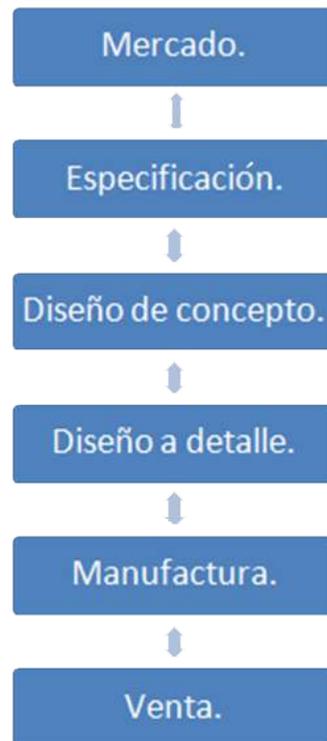


Figura 2.6: Proceso de diseño de un producto [3].

Conociendo en forma general el esquema en el que se desenvuelve la metodología, es preciso definir cada una de las fases como a continuación se mostrará.

2.3.1.1. MERCADO

Esta fase se refiere a la mención de las oportunidades de venta en el mercado o la determinación de una necesidad existente en el mismo, ya que a partir de esto es como se determina la razón de ser del desarrollo de ciertos productos, haciendo un muestreo de mercado, en el cual se delimita la necesidad a cubrir por parte del producto a realizar.

Cabe hacer mención que en esta tesis este estudio no se llevará a cabo debido a que el prototipo que se realizará está sujeto a los requerimientos del cuerpo académico de Óptica que más adelante se mencionarán.

2.3.1.2. ESPECIFICACIONES

En esta etapa están involucrados los datos que definen la funcionalidad requerida por parte del producto, así como también se conocen las expectativas de desempeño del mismo, bajo las condiciones de uso deseadas por el usuario, esta fase es de suma importancia ya que es el punto de partida para los datos formales y supuestos formulados a partir de las condiciones de diseño, puesto que delimita el proceso, por lo cual es importante incluir los factores necesarios que caractericen la parte formal de la necesidad.

Para presentar una mejor relación entre estas características se complementará haciendo un análisis de valor y para encontrar las relaciones pertinentes entre cada uno de los requerimientos se utilizara el QFD [31]. Una vez determinando estos se procede a la presentación de propuestas que resuelvan los requerimientos establecidos por el cuerpo académico de Óptica [39].

Las especificaciones de la lente son:

Un diámetro de 3 cm, El cuerpo de la lente será hecho de PDMS, la montura sera de aluminio o fierro. Deformación uniforme de la lente, al aplicar fuerzas de compresión en su periferia.

2.3.1.3. DISEÑO DE CONCEPTO

Las primeras etapas de diseño donde las decisiones importantes se deben hacer a veces es llamado “diseño conceptual”, la parte del diseño conceptual puede definirse como la morfología

de un producto. De cómo se compone y como podría ser diseñado, en esta fase se puede echar mano de algunas técnicas como la lluvia de ideas, análisis morfológico y árboles de función, se trata de generar un concepto preliminar dirigido a la solución global del problema sin entrar a puntos específicos [39].

Esta es la parte más importante de la metodología, debido a que aquí se tendrá que hacer una selección de las propuestas que se realizarán, éstas, deben ser al menos tres para poder comparar una con otra mediante el proceso de analítico jerárquico (PAJ), que consiste en descomponer de forma jerárquica para dividir estas selecciones en sub-problemas así, serán más fácil de comprender y resolver utilizando una ponderación para determinar cuál de estas es la mejor alternativa y así forma obtener la que mejor resuelva los requerimientos del cliente.

2.3.1.4. DISEÑO A DETALLE

Consiste en la determinación de formas, tamaños, dimensiones, materiales, métodos de manufactura y características específicas de los componentes involucrados en el producto a desarrollar y su proceso de producción. Esta fase es la que toma mayor tiempo del proceso de diseño, puesto que implica planear componentes con su caracterización precisa, desarrollada en base a las fases antes mencionadas y a punto de ser implementadas físicamente. Es por ello que en esta sección se presenta el detalle mecánico de cada una de las piezas que lleva el prototipo, para asegurar que se ha cumplido con los requerimientos del cliente se hará la evaluación de cada uno de los componentes ya ensamblados mediante el análisis de elemento finito (CAE) (del inglés Computer Aided Engineering) para observar si en verdad el prototipo propuesto cumple con los requerimientos establecidos [39].

En esta etapa, con ayuda del software (solid works) se realizará un análisis de elemento finito, para corroborar que las condiciones del material corresponden a las establecida por los requerimientos del cuerpo académico de Óptica de ésta institución.

2.3.1.5. MANUFACTURA

El diseño de cualquier elemento debe ser factible para su fabricación. Los materiales seleccionados deben ser compatibles con las instalaciones de fabricación y las capacidades disponibles y a un costo aceptable para que coincida con los requisitos de comercialización. Más recientemente, el concepto de ingeniería concurrente se ha vuelto muy popular, ya que es un enfoque sistemático que fomenta que el desarrollador del proyecto desde el inicio del

mismo tenga en cuenta todos los elementos del ciclo de vida del producto o proceso, desde la concepción hasta su eliminación, incluyendo el control de calidad, la programación y los requisitos del usuario [23].

En esta sección, se presentará la forma en la cual cada una de las piezas será construida, así como la selección de maquinaria y equipo involucrada [9], para ello se utilizará como herramienta de planificación de procesos la propuesta por Singh [35] que a continuación se muestra:

1. Análisis de requerimientos de partes.
2. Selección de las piezas de trabajo.
3. Determinar las operaciones de manufactura y su secuencia.
4. Selección de máquinas y herramientas.
5. Selección de herramientas, dispositivos de sujeción e instrumentos de inspección.
6. Determinar las condiciones de maquinado. Velocidad de corte, avance y profundidad de corte, tiempo de preparación, tiempo de procesamiento.

Además se generan las hojas de operaciones, las cuales son planificadoras de procesos, en este documento se especifican los detalles del plan de proceso. La hoja de operaciones debe incluir la información de todas las operaciones de manufactura que se van a realizar en la pieza de trabajo[9], enlistadas en el orden conveniente que se van a realizar. Para cada operación, debe enlistarse lo siguiente:

1. Una breve descripción de la operación, indicando el trabajo que se va a hacer, las superficies que se van a procesar ya indicadas en el dibujo de la parte, las dimensiones y las tolerancias requeridas.
2. El equipo en el cual se va a realizar el trabajo.
3. Cualquier habilitación especial de herramientas requeridas.
4. Tiempos de ciclo y tiempos de preparación.
5. Verificar acabados de componentes manufacturados mediante la metrología dimensional.

La última etapa correspondiente a la logística de venta no será abordada ya que el producto no pretende comercializarse.

Para fabricar un producto de alta calidad, al costo mínimo, se necesita conocer la importancia de la relación existente entre algunos factores como: las especificaciones y diseño del producto, la selección de materiales y la selección del proceso de manufactura [40]. Para ésto se requiere de una planificación de procesos, la cual consiste en la determinación del tipo y orden apropiado para las actividades u operaciones necesarias para la fabricación de un producto o componente de tal manera que se cumplan las especificaciones del diseño [41].

El diseño de procesos consiste en determinar la manera en la que se fabricará un producto, permitiendo conocer la ruta que este seguirá en las instalaciones, para esto hay que tomar en cuenta algunas limitantes como: capacidad de la maquinaria, volumen de producción, habilidad de los operadores, etc. En forma paralela el departamento de manufactura estima los costos de cada operación determinada en la planeación de procesos, la materia prima, la capacidad de la planta, y la capacidad de maquinaria, para realizar las funciones de control necesarias. La ingeniería de procesos o departamento de producción determina la secuencia de actividades u operaciones de los productos, así como la ruta y el avance de los productos a través del proceso [42].

Para realizar una planeación de procesos es necesario llevar a cabo una serie de pasos, los cuales son semejantes entre los diversos autores, tomando como referencia la enunciada por Singh [35].

El maquinado es un término amplio para describir la remoción de material de una pieza y abarca varios procesos, que suelen dividirse en las siguientes categorías:

- Corte - que implica en general herramientas de corte de una o varias puntas, cada una con una forma bien definida de la herramienta.
- Procesos abrasivos - como el rectificado.
- Procesos avanzados de maquinados - que usan métodos eléctricos y químicos, térmicos e hidrodinámicos, así como láseres.

El maquinado tiene como objetivo generar la forma de la pieza de trabajo partiendo de un cuerpo sólido, o mejorar las tolerancias y el acabado superficial de una pieza de trabajo previamente formada, al retirar el material en exceso en forma de virutas. El maquinado es capaz de crear configuraciones geométricas, tolerancias y acabados superficiales a menudo no obtenibles por cualquier otra técnica [42].

La variedad de los procesos de corte de metal es muy amplia; sin embargo, es posible idealizar el proceso de la remoción de viruta. En el corte ortogonal el filo de corte de la herramienta es recto y perpendicular a la dirección del movimiento como se muestra en la figura

2.7. En el caso más sencillo, la pieza de trabajo es rectangular y de un ancho w suficientemente grande para que los cambios en él sean despreciables (deformación plana). El corte se realiza con una herramienta inclinada con un ángulo de ataque α , medido desde la normal a la superficie que se va a maquinarse. Para evitar la fricción excesiva en la superficie maquinada, la herramienta se alivia en la parte posterior o flanco mediante el ángulo de alivio θ .

En principio, no hay diferencia si la herramienta o la pieza de trabajo se mueven. Se puede visualizar una pieza de trabajo estacionaria, con la herramienta moviéndose a una velocidad de corte V . La herramienta se fija para mover una capa de espesor h . Para evitar confusión, a ésta no se le llama profundidad de corte, sino espesor de la viruta sin deformar h . En el caso más sencillo, la deformación ocurre con un cortante intenso sobre el plano de corte, inclinado por el ángulo de corte Φ . La viruta formada de esta manera tiene un espesor h_c . El ángulo de corte Φ determina la razón de corte r_c enunciado en la ecuación 2.1.

$$r_c = \frac{h}{h_c} = \frac{l_c}{l} = \frac{l_c}{l} \tag{2.1}$$

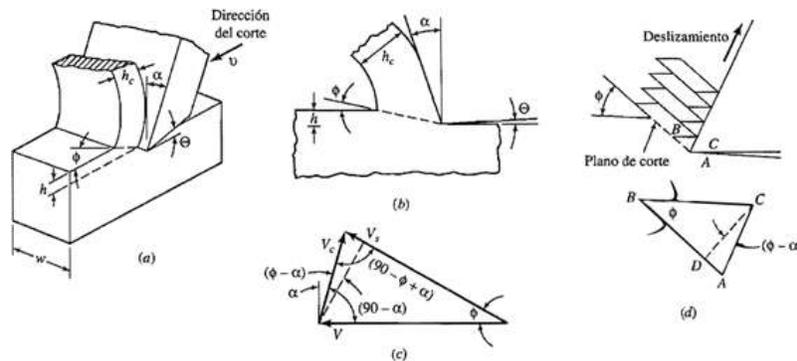


Figura 2.7: En el corte ortogonal, el filo de corte es perpendicular a la dirección del movimiento. El ángulo de ataque puede ser a) positivo o b) negativo, c) las velocidades se obtienen si, para una primera aproximación, d) la formación de la viruta se visualiza como cortante simple.

Una de la maquinas más utilizada en los procesos de manufactura es el torno, que proporciona un movimiento rotatorio primario mientras a la herramienta se le imparten movimientos apropiados de avance, cabe hacer mención que en el laboratorio de manufactura de la UTM se cuenta con dos tipos de torno, uno convencional y otro de control numérico, el primero con la opción de cambiar el chuck de tres a cuatro mordazas y el segundo solo con tres mordazas.

En un torno las piezas de trabajo deben sujetarse firmemente, con frecuencia en un man-

dril. Los mandriles de tres quijadas con ajuste simultáneo de estas son autocentrables. Otros tienen dos, tres o cuatro quijadas independientes ajustables para sujetar piezas de trabajo que no sean redondas. Las barras también se pueden sujetar en boquillas, las cuales consisten en un buje dividido, empujado o jalado contra una superficie cónica. Las piezas de trabajo de forma poco manejable a menudo se sujetan mediante pernos en un plato de torno.

El cabezal contiene el mecanismo de impulso, que normalmente incorpora engranes de cambio y/o mecanismos de velocidad variable. Las piezas de trabajo largas están soportadas en un extremo con un centro sostenido en el contrapunto. La herramienta o herramientas son soportadas por la torreta que permite colocarla en el ángulo horizontal y vertical. Ésta se monta en un carro transversal que proporciona movimiento radial de la herramienta. En los procesos de manufactura son ocupados dos tipos de torno, uno es el mecánico y el otro es el de control numérico, este último utiliza una serie de códigos alfa numéricos para realizar los maquinados.

Las ecuaciones utilizadas para determinar los parámetros de corte en el torneado están presentes en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Parámetros y fórmulas empleadas en los procesos de torneado.

Torneado	
Parámetros	Ecuación
N= Velocidad de rotación de la pieza, rpm	$v = f N$
f= Avance, mm/rev o pulg/rev	
v= Velocidad de avance o velocidad lineal de la herramienta a lo largo de la pieza, mm/min o pulg/min	
V= Velocidad superficial de la pieza, m/min o pies/min	$V = \phi Do N$
Do= Diámetro original de la pieza, mm o pulg	
Dprom= Diámetro promedio	$V = \phi Dprom N$
Df= Diámetro final de la pieza, mm o pulg	$Dprom = (Do + Df)/2$
t= tiempo de corte, s o min $t = l/f N$	
l= longitud de corte, mm o pulg	
RRM= Rápidez de remoción de material mm ³ /min o pulg ³ /min	$RRM = \phi Dprom d f N$
d= Profundidad de corte, mm o pulg	
Par= N*m o lb*pie Par= Fc (Dprom / 2)	
Potencia= kW o hp	Potencia= (par de torsión)(2φN)

2.3.1.6. VENTA

Esta fase es igual de importante que las anteriores, ya que debe cubrir la expectativa de la primera fase en el diseño, además de que también se obtienen datos importantes de la misma, tales como la reacción del cliente ante el producto e información acerca de las posibles fallas que puede tener de acuerdo a materiales o componentes que pudieran desgastarse, daños al producto durante el envasado o transporte, lo cual presupone como se había mencionado un proceso iterativo, el cual podrá definir los aspectos a cuidar en los futuros diseños o bien corregir en el producto actual las fallas o deficiencias recurriendo a las etapas anteriores e identificar la problemática existente y corregirla. Cabe mencionar que en este caso no se llegó esta parte debido a que en este proyecto se ha desarrollado con la intención de resolver los requerimientos solicitados por el cuerpo académico de Óptica únicamente.

La metodología aplicada está diseñada para hacer retroalimentaciones en cada etapa, garantizando obtener el mejor resultado posible con la mejora continua del producto.

Capítulo 3

DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo, se presenta el desarrollo de cada uno de los pasos que conforman la metodología de Diseño Total. Con base en lo mencionado y expuesto en el capítulo anterior, cabe hacer mención, que no se abordará la parte de mercado y ventas como y ase mencionó con antelación.

3.1. ESPECIFICACIONES

En esta sección, se podrá observar como cada una de las especificaciones solicitadas para este proceso se traducen en la voz del ingeniero, mediante el QFD, así mismo se hará la evaluación de cada una de las propuestas desarrolladas en este trabajo.

Dentro de esta metodología, en particular en esta fase, se debe dejar claro como se traducen los requerimientos del cliente, para posteriormente, realizar las propuestas de diseño, tal como se puede observar en las figuras 3.7, 3.10 y 3.14.

En esta etapa se encuentran involucrados los datos que definen la funcionalidad del producto, así como las expectativas de desempeño del mismo, bajo las condiciones de uso requerido. La importancia de esta sección radica en ser el punto de partida para los datos formales y supuestos formulados a partir de las condiciones de diseño previamente establecidas.

Las características específicas sugeridas por el usuario para la montura de la lente son:

- La montura deberá sujetar una lente solida elástica con un diámetro de 30 mm y 2 mm de espesor.
- El cuerpo de la lente estará hecho de PDMS (Polidimethilsiloxano).
- La montura deberá ser de un material resistente tal como aluminio, acero o nylamid.
- Deberá permitir la deformación uniforme de la lente, al aplicar fuerzas de compresión en su periferia y esta será capaz de reducir su radio 20 mm.

Con lo anterior representa la voz del cliente, lo cual da inicio a el QFD, considerando los requerimientos mismos que se muestran en seguida en el orden de importancia establecido por él.

1. DEFORMACIÓN UNIFORME
2. MATERIAL RESISTENTE
3. FACILIDAD DE OPERACIÓN
4. FÁCIL DE MONTAR
5. DIMENSIONES PEQUEÑAS
6. FACILIDAD DE ENSAMBLE
7. LIGERO (menor a 500 gr.)
8. MÍNIMO NÚMERO DE COMPONENTES
9. PRECIO (menos de 1000 para el prototipo)

Con base en lo anterior y las demandas del cliente, se desarrollaron cuatro propuestas, sobre las cuales se realizó la primer etapa del QFD , tal como se puede observar en el figura 3.1, dando paso a esta primera etapa tomando como punto de partida a las especificaciones antes mencionadas, esto con el fin de iniciar la comparación entre cada una de las propuestas y llevar a cabo la elección de la más adecuada entre ellas como se puede observar en la figura 3.1 para la relización de un prototipo escala 1:1 funcional.

Como se mencionó en el capítulo 2 el QFD comprende cuatro etapas, en cada una de éstas se completa secuencialmente una matriz. La primera matriz es la más conocida del método y se denomina la Casa de la Calidad. En ella se correlacionan los requerimientos del cliente, o los QUÉ, con las características técnicas, o los CÓMO. En seguida se obtiene la matriz del Despliegue de Partes, que presenta las características que debe cumplir cada una de las piezas del producto; la matriz de Planeación de Procesos, con las operaciones claves del proceso de producción y finalmente la matriz de Planeación de la Producción, que incluye los requerimientos de producción y su importancia. Los requerimientos básicos solicitados y mencionados en la sección anterior.

Con estos datos se parte para obtener parcialmente la llamada voz de cliente, requerimiento primordial para el desarrollo del QFD. Por medio de entrevistas con el usuario se identifican necesidades adicionales, estableciendo así los QUÉ de la Casa de la Calidad 3.2. Una vez clasificados por su peso los requerimientos del cliente son:

1. Deformación uniforme
2. Material resistente
3. Facilidad de operación
4. Fácil de montar
5. Dimensiones pequeñas
6. Facilidad de ensamble
7. Ligero
8. Mínimo número de componentes
9. Precio

Primera Fase: Casa de la Calidad

La fase primera consiste en definir los requerimientos del cliente y compararlos con las características técnicas o requerimientos de diseño del producto, es decir, se traducen a la voz del ingeniero. Después se relacionan en orden de importancia de acuerdo con una ponderación, se establecen los valores objetivos y se encuentra el peso o importancia de estos requerimientos, que son los que se utilizarán para definir los componentes como se puede observar en la figura 3.3.

En esta casa de la calidad se obtuvieron cuatro propuestas de diseño mostradas en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9. Cada una de éstas fueron desarrolladas en función a dichos requerimientos, de igual forma cada uno de los requerimientos antes mencionados presentan una relación de importancia y ésta se puede observar en cada uno de los cuadros de correlación de la primer casa de la calidad.

En la primer etapa del despliegue de la función de calidad, como se puede observar en la figura 3.2, los requerimientos del usuario, se relacionan en orden de importancia contra la voz del ingeniero, en este caso es la forma en que se va a resolver cada uno de los requisitos del cliente. Con base en lo anterior se establecieron cuatro propuestas de diseño, las cuales fueron desarrolladas en función a dichos requerimientos, las cuales se puede observar se están evaluando en la casa de la calidad como se muestra en la figura 3.2. De igual forma cada uno de los requerimientos antes mencionados presentan una relación de importancia y ésta se puede ver en cada uno de los cuadros de correlación de la primer casa de la calidad, de la misma forma a continuación se enumeran los requisitos traducidos a la voz del ingeniero.

1. Distribución máxima de puntos de carga
2. Resistente a fatiga
3. Resistente al desgaste
4. Movimientos necesarios
5. Tiempos y movimientos de operación
6. Tiempos y movimientos de ensamble
7. Tiempos y movimientos para montar
8. Volumen total del dispositivo
9. Mínima cantidad de movimientos
10. Peso total del dispositivo
11. Cantidad de componentes
12. Costo de fabricación
13. Precio de componentes
14. Precio de materiales

La primer casa ó matriz de la calidad presenta información específica sobre cómo se van a resolver cada una de las características que el cliente espera en el producto final, en esta etapa se han evaluado los requerimientos para 4 diseños propuestos.

Como se puede observar en la primer casa de la calidad, las especificaciones que han generado mayor puntaje son, la deformación uniforme y la resistencia del material a utilizar, es por ello que se debe de poner mayor atención en ellos de tal forma que estos se llevaran a la segunda casa de la calidad (producto proceso) y de esta forma desarrollar la forma de resolver el problema.

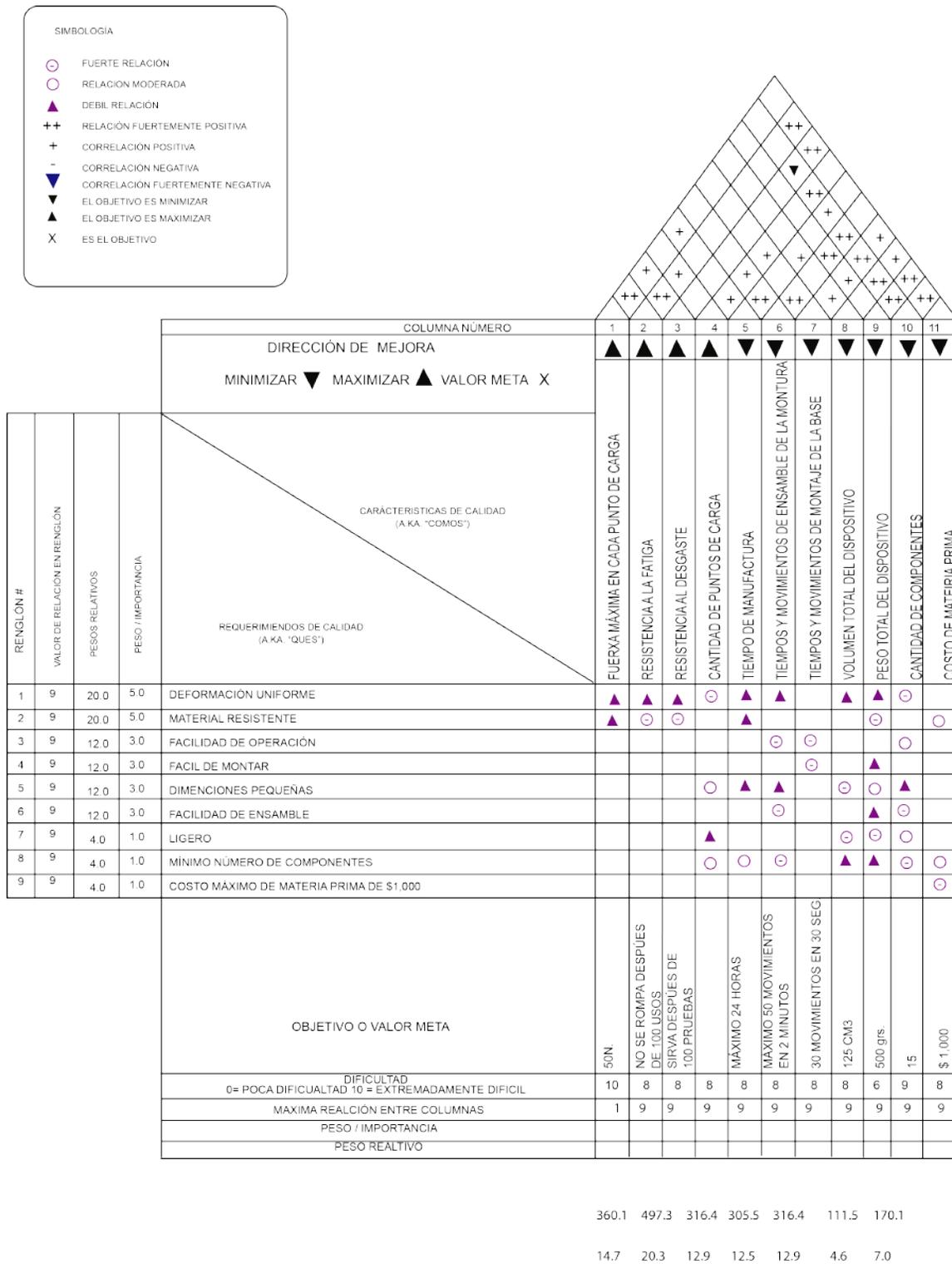


Figura 3.2: Casa de la Calidad (requerimientos del cliente)

Segunda Fase: Matriz de Despliegue de Partes

Para el desarrollo de la segunda etapa se genera una nueva matriz. En ella, los CÓMO de la Casa de la Calidad son ahora los QUÉ del Despliegue de Partes. Se puede observar en la Figura 3.3, que la primera columna de la Figura 3.2, Fuerza Máxima en Cada Punto de Carga, es ahora el primer renglón de la matriz. Analizando cada QUÉ se definen las partes que se relacionan con las características ingenieriles. De esta forma se completan los nuevos COMO:

- Compresor del lente.
- Secciones de compresión.
- Tapa contenedora.
- Tuerca de sujeción.
- Sintonizador.
- Punto de sujeción.
- Tipo de material.

La matriz completa sintetiza la relación entre componentes, la importancia de cada uno de ellos, su interrelación, su nivel de dificultad y los valores objetivo. De aquí se determina la necesidad de destinar recursos a cada componente, ya sea en tiempo de diseño o la inversión monetaria en el componente.

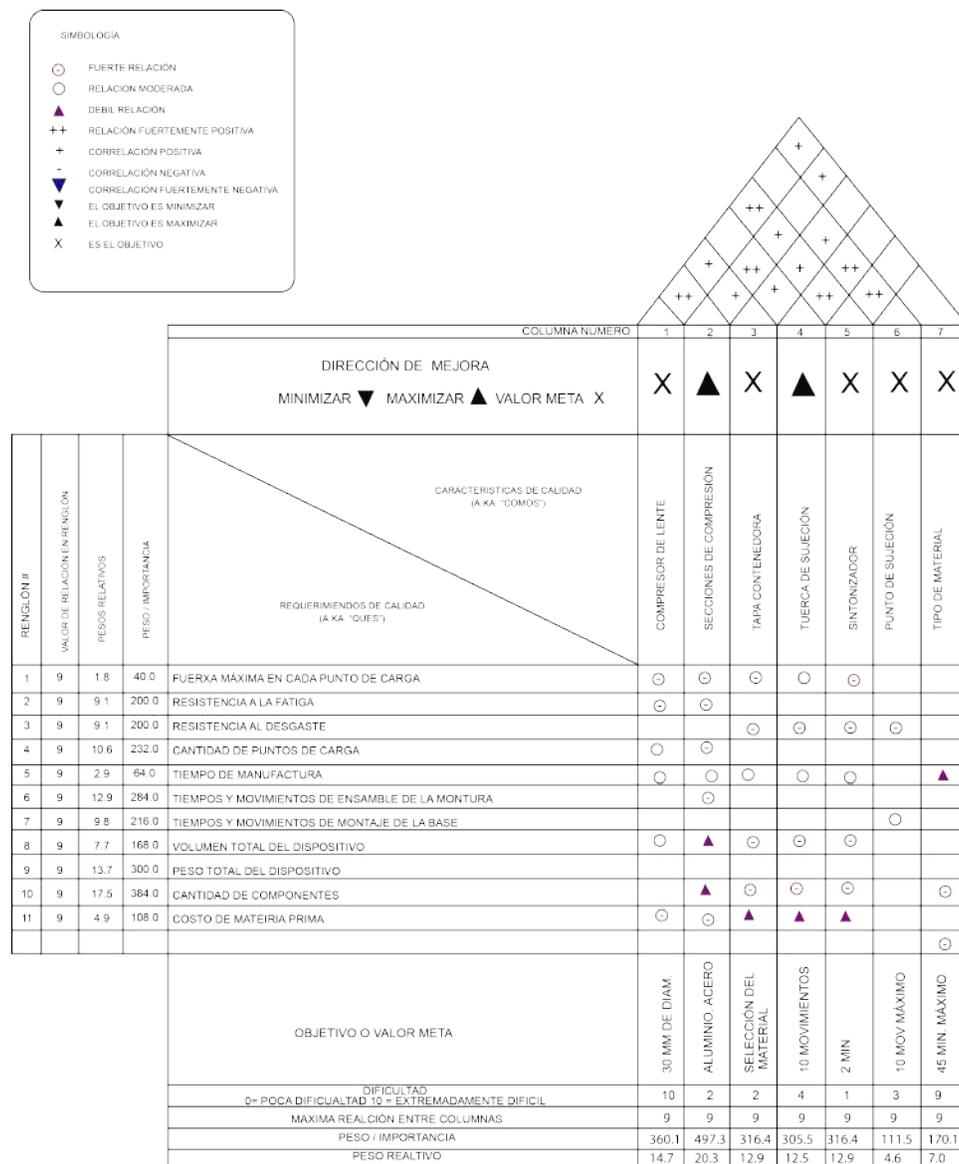


Figura 3.3: Matriz de despliegue por partes

Tercera Fase: Planeación de Procesos.

De manera similar se convierten los CÓMO obtenidos en los QUÉ de la matriz de Planeación de Procesos. Al enfocarse en los componentes se definen los COMO, cada uno indicando los procesos u operaciones a considerar. En esta etapa es necesario definir la manera en la que cada parte crítica va a ser fabricada y los parámetros necesarios para cumplir con la característica de calidad requerida. La correlación entre procesos también se identifica con el fin poder resolver anticipadamente interacciones no deseadas. En este caso la montura no presen-

ta relaciones negativas entre los procesos necesarios para la fabricación de los componentes críticos (3.4).

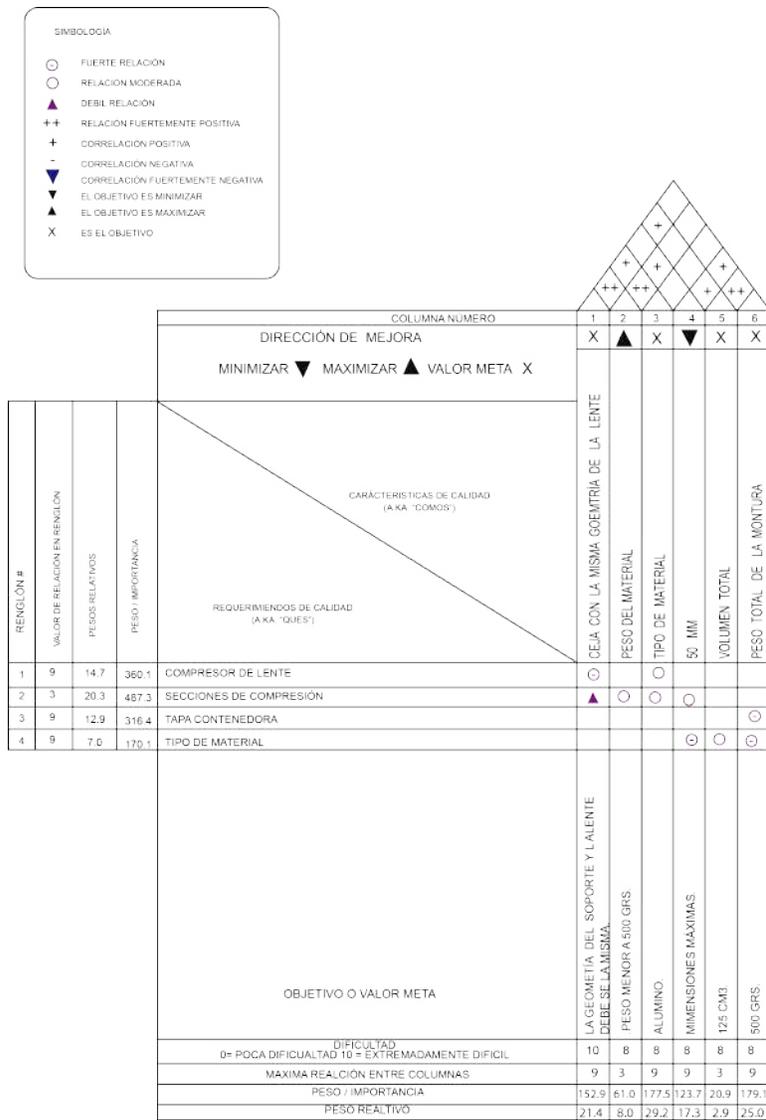


Figura 3.4: Matriz de Planeación de Procesos.

Cuarta Fase: Planeación de la Producción.

Finalmente, la cuarta etapa define en sus CÓMO los requerimientos a controlar para que el proceso de producción se realice de forma apropiada y garantizando la satisfacción del cliente, relación que se mantiene a través de todas las etapas imagen 3.5.

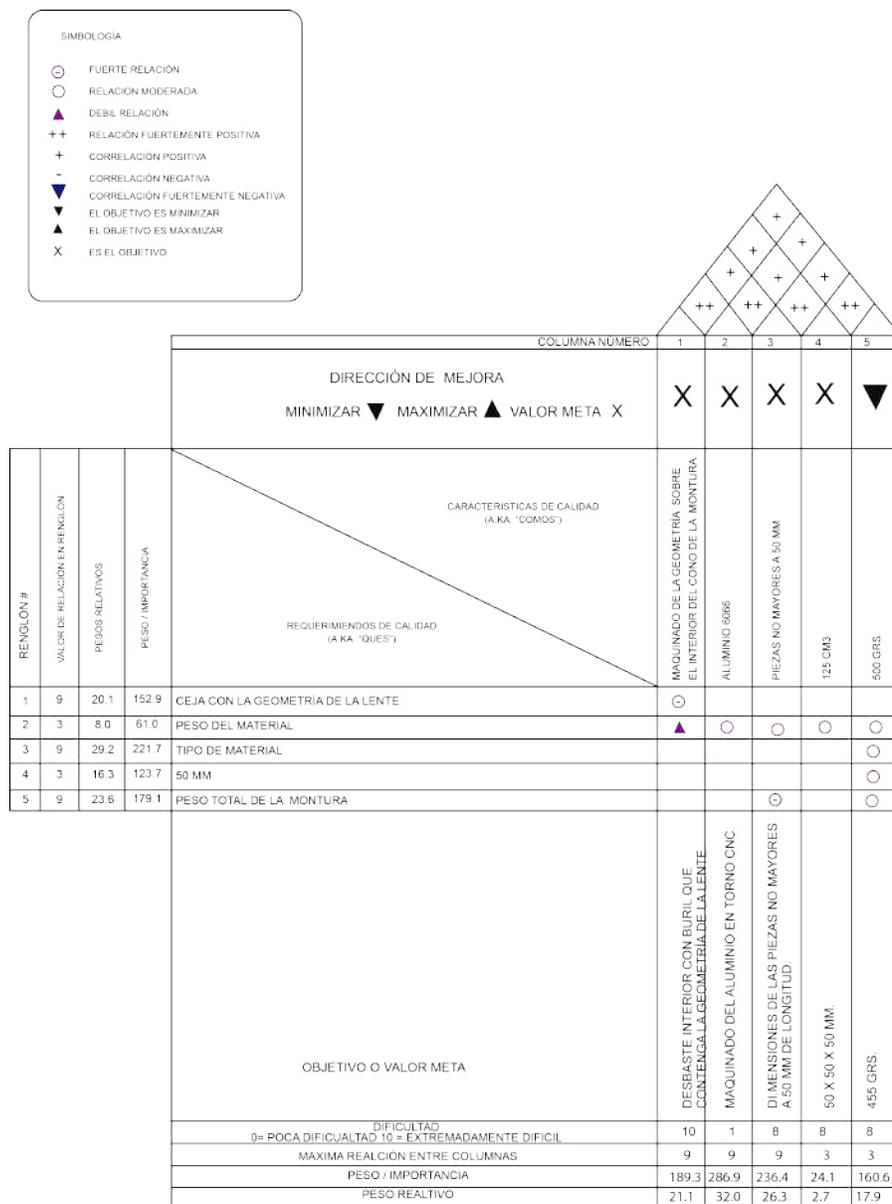


Figura 3.5: Matriz de Planeación de la Producción.

En el caso de que se presentará una característica, que permita definir por cual de los dos tomar la decisión final, se aplicará una selección entre ellos, y se construirá aquel que presente mejor comportamiento en las simulaciones mecánicas y de manufactura de este proyecto.

3.2. DISEÑO DE CONCEPTO

El diseño de concepto se encuentra basado en los requerimientos del usuario final, tal es el caso para esta montura del Cuerpo Académico de Óptica, y estos consisten básicamente en la compresión de un lente de 30 mm de diámetro hecha de un elastómero denominado PDMS(Polidimethylsiloxano), el cual, como se mencionó con anterioridad es el cuerpo del lente biconvexo (figura3.6).

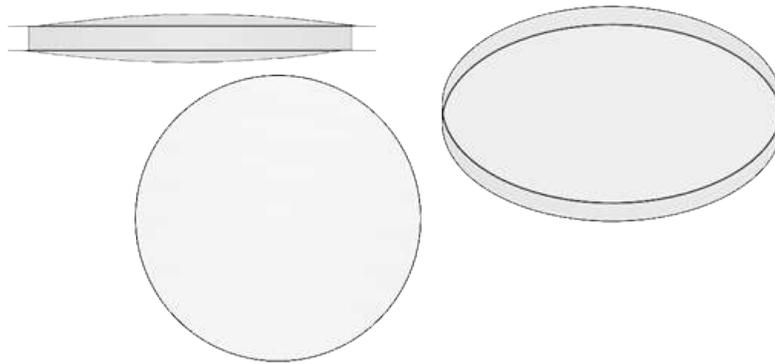


Figura 3.6: Lente de 30 mm de diámetro de PDMS.

Dentro de las metodologías de diseño, no se ha definido el número de propuestas del cual un nuevo producto debe de surgir, para este proyecto se utilizarán cuatro, las cuales se muestran a continuación y se pueden observar en las figuras 3.7, 3.10, 3.14 y3.18. Con base en lo anterior, la primer propuesta de diseño se puede ver en la figura 3.7.

La primera propuesta, como bien se puede observar cumple con el primer requerimiento, el cual ha sido que soporte o bien albergue a una lente de 30 mm de diámetro, lo anterior se puede ver en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9.

Esta propuesta se ha realizado con base en las especificaciones del cliente. Como se muestra en el figura 3.7, consta de un cuerpo cilíndrico, que alberga a la lente y un arreglo de anillos, mediante los cuales se produce la compresión de la misma, de forma gradual y controlada.



Figura 3.7: Vista frontal de la propuesta número 1



Figura 3.8: Vista lateral de la propuesta número 1.

El funcionamiento de esta propuesta está basado en el sistema de presión que ejerce una abrazadera, sincronizando cada uno de los medios círculos por medio de un cinturón, el cual gira por la periferia de la lente permitiendo que se pueda comprimir con facilidad.

Cabe hacer mención de las ventajas y desventajas que éste diseño presenta, las primeras son, la simplicidad de manipulación y la ligereza de la montura, por otro lado, al ejercer presión sobre la periferia de la lente, debido al sistema planteado, se produce una deformación en la lente de manera no uniforme, por lo cual se implica la generación de un mayor número de aberraciones.

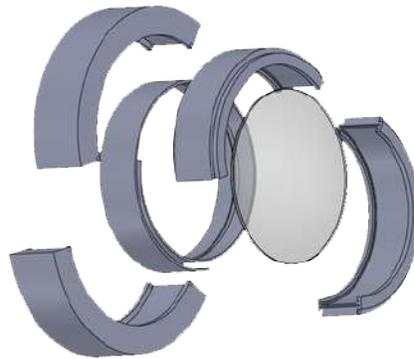


Figura 3.9: Vista explosionada de la propuesta número 1.

La propuesta número 2, además de cumplir con los requerimientos del Cuerpo Académico, en comparación al diseño anterior es más sofisticado debido a que dentro , se encuentra un arreglo de 8 mordazas, que se mueven de mediante un arreglo helicoidal en función de una espiral, para proporcionar la compresión solicitada por el usuario.

La forma en la que opera este prototipo se basa en el famoso chuck autocentrador de tres mordazas, permitiendo el movimiento sincronizado de cada una de las ocho piezas, mediante una espiral cada una de las anteriores se mueven hacia el centro de la montura.

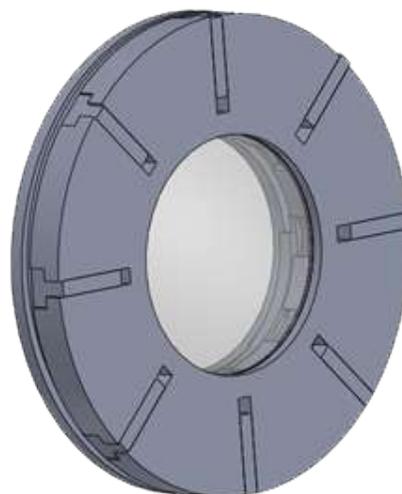


Figura 3.10: Vista posterior de la propuesta número 2.



Figura 3.11: Vista lateral de la propuesta número 2.

Cada una de las mordazas debe moverse al mismo tiempo una de la otra, debe ser sincronizado y ordenado. Esta propuesta se compone de 12 piezas, las cuales, de ser esta la elegida se realizarán de un material resistente como lo puede ser el acero o bien el aluminio, claro sin dejar fuera la posibilidad de generarlo con nylamid.

En la figura 3.11 se puede observar como cada una de las mordazas están alineadas una con respecto a la otra, esto en virtud de generar un movimiento sincronizado, y permitir la compresión y deformación de la lente de manera uniforme, de tal manera que se cumple el principal requerimiento del usuario.

Dentro de este diseño cada una de las mordazas cuenta con un relieve con la geometría de la lente, que permite retenerla evitando que se pueda escapar de la montura, el paso de sincronización es uniforme para generar un cierre continuo sobre la lente, permitiendo que se pueda deformar.

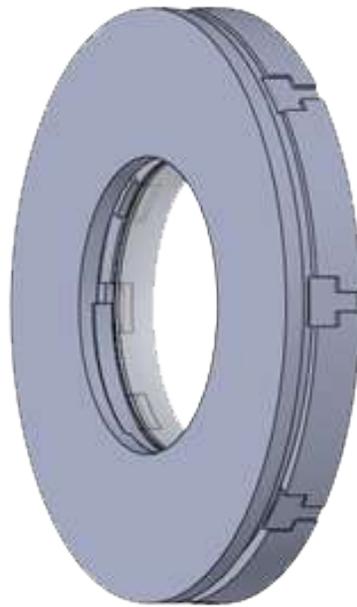


Figura 3.12: Vista isométrica de la propuesta número 2.

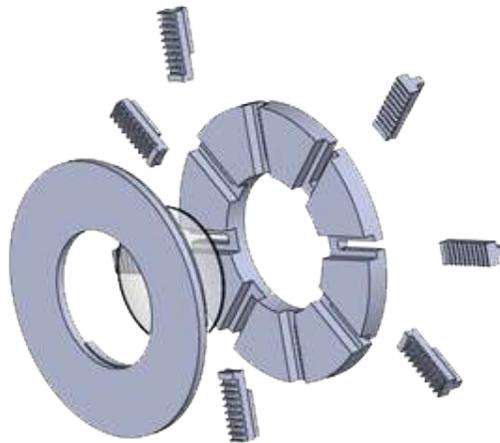


Figura 3.13: Vista explosionada de la propuesta número 2.

La propuesta número 3, es una montura con la geometría de un cono truncado y hueco, el cual comprime a la lente mediante una tuerca cilíndrica, este diseño está formado por cuatro piezas, cada una de ellas unida a la otra, albergando al lente para su deformación.



Figura 3.14: Vista en perspectiva de la propuesta número 3.

Esta propuesta como, se puede ver en las imágenes 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17, funciona por medio de una rosca, que al ir introduciéndose más cada diente en el cono genera presión.

Posteriormente, se generan los cálculos pertinentes y se genera el prototipo para hacer las pruebas finales y determinar si en verdad se cumple con lo esperado en el diseño. Por otro lado, esta propuesta además de ser la que presentó mejoras significativas en el QFD, es sobre la que se harán las validaciones de elemento finito, para corroborar que en verdad realiza la función para la que es destinada.

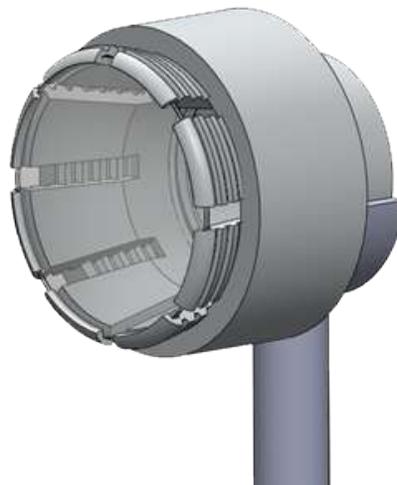


Figura 3.15: Vista lateral derecha de la propuesta número 3.

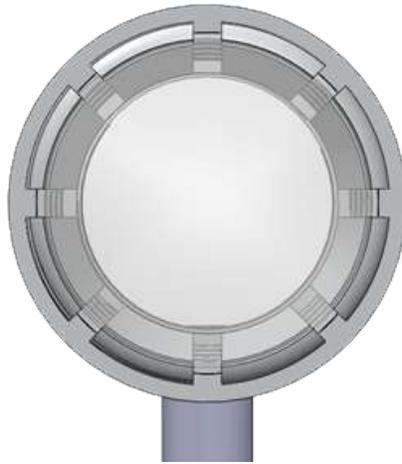


Figura 3.16: Vista frontal de la propuesta número 3.

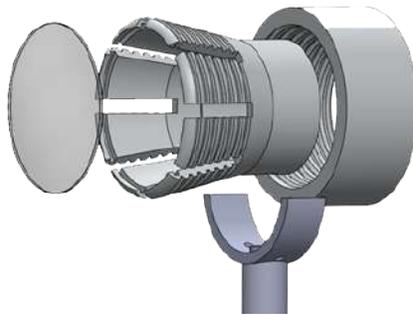


Figura 3.17: Vista explosionada de la propuesta número 3.

La propuesta número 4, como se puede observar en la figura 3.18, es una montura cilíndrica en el exterior y al centro se presenta una pieza denominada soporte cónico, basado en un cono truncado y hueco, algo similar a la propuesta número 3, dentro de la cual se puede observar como el soporte cónico se comprime dentro de la carcasa cilíndrica, este a su vez, aplica el principio de transmisibilidad, hace lo mismo con la lente mediante el avance de una tuerca cilíndrica, haciendo que esta se deslice por toda la montura generando una deformación adecuada, el diseño está formado por cuatro piezas, (figura 3.19), el ensamble de cada una permite que dentro de esta se albergue a la lente para ejercer la deformación de la misma.



Figura 3.18: Vista en perspectiva de la propuesta número 4.

En la figura 3.19, se puede observar el orden de cada una de las piezas, que conforman el mecanismo. Así el funcionamiento, es mediante la relación de paso y rosca para que se pueda deslizar el eje de la montura sobre la tapa y permita la compresión del cono que sujeta a la lente mediante una muesca que conserva la geometría del perfil de esta.

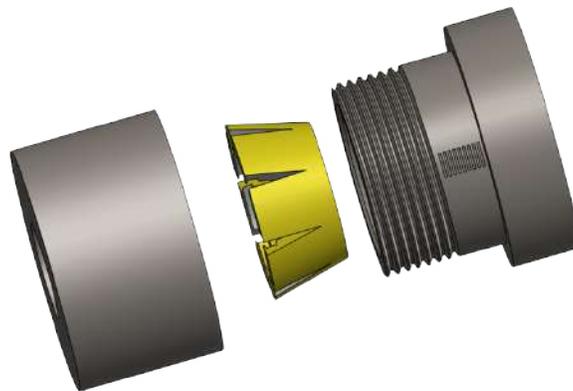


Figura 3.19: Vista en explosiva de la propuesta número 4.

Los materiales empleados para esta propuesta, son aluminio 1060, para el eje y la tapa, un poste de acero rolado en frío para el soporte, que irá a la mesa de trabajo y un cono, que es de un polímero elástico, que permita la deformación de la lente mientras se hace uso de la montura.

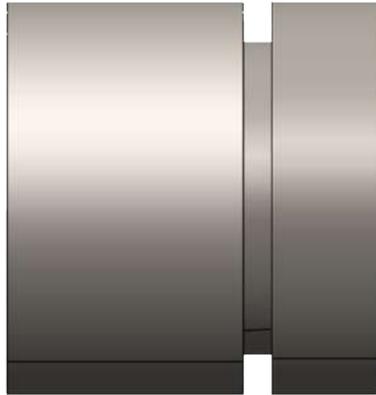


Figura 3.20: Vista lateral de la propuesta número 4.

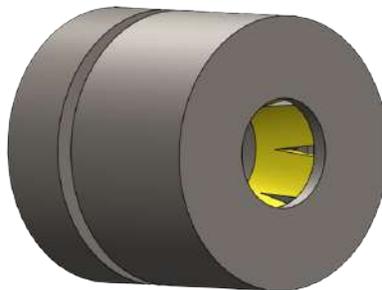


Figura 3.21: Vista en perspectiva de la propuesta número 4.

En la figura 3.22, se puede apreciar un corte transversal, que permite ver cada una de las piezas que conforma la montura, y el orden que llevan, cabe hacer mención, que la suma de los elementos no deberá sobrepasar los 500 grs. de peso, debido a que es uno de los requerimientos principales del usuario.

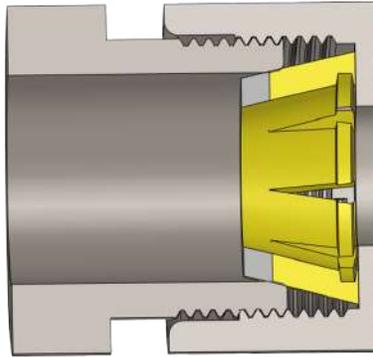


Figura 3.22: Vista corte transversal de la propuesta número 4.

En particular, cada uno de los diseños ha sido propuesto con base en los requerimientos del cliente, cualquiera de las propuestas anteriores cumple con las especificaciones, posteriormente en esta metodología se seleccionará cual de estas tres es la más indicada, mediante el análisis de elemento finito y las metodologías de manufactura avanzada.

3.2.1. SELECCIÓN DE LA PROPUESTA

Una vez analizadas las 4 propuestas de diseño y evaluadas dentro del despliegue de la función de calidad, existen dos (3 y 4) que cumplen con los requerimientos solicitados por el cliente, por ello son seleccionadas, debido a la funcionalidad que presentan y las ventajas que tienen sobre las dos primeras, las cuales son: la facilidad de maquinado, el número de piezas que es mínimo y la facilidad de operación.

La primera casa de la calidad, ha permitido evaluar y comparar cada una de las propuestas como se puede observar en la figura 3.2, gracias a ello se realizaran pruebas de compresión sobre la montura y sobre la lente, para determinar con base al análisis de elemento finito la cantidad de fuerza que será requerida y la que soporte la montura antes de llegar la ruptura, así como la distancia que permitirá comprimir la lente.

Dentro de los estudios a realizar está el desplazamiento, el cual permitirá observar qué tanto se mueven las mordazas de la montura en relación a la fuerza aplicada sobre la periferia de la lente, antes de exceder el límite elástico del material, por otro lado las deformaciones unitarias que el material sufre al estar sometido a este proceso y por último las tensiones.

Cabe mencionar que lo anterior es de vital importancia debido a que el prototipo estará

sometido a un desgaste por fatiga, motivo por el cual en el diseño debe de existir un alto grado de confiabilidad del sistema que se encuentre por arriba de lo esperado, de tal forma que el desgaste en cada uno de los dientes del roscado no se vea afectado por el uso, esto para alargar el tiempo de vida.

3.3. DISEÑO A DETALLE

La cuarta fase de la metodología consiste en la determinación de formas, tamaños, dimensiones, materiales, métodos de manufactura y características específicas de los componentes involucrados en el producto a desarrollar y el proceso de producción de cada una de las piezas.

Esta fase es la que toma mayor tiempo en el proceso de diseño, puesto que implica planear componentes con su caracterización precisa, y esta será desarrollada con base a las fases antes mencionadas a tal punto de ser implementadas físicamente.

Es por ello que en esta sección, se presenta el detalle de los mecanismos y la resistencia de cada uno de los componentes involucrados para cada uno de los dos prototipos, a fin de asegurar que se ha cumplido con los requerimientos del cliente, posteriormente se hará la evaluación de cada uno de los componentes así como su comportamiento al momento de encontrarse ensambladas; esto se podrá realizar mediante la ayuda del módulo CAE; principalmente para observar si en verdad cada uno de los prototipos propuestos cumplen con los requerimientos en las condiciones establecidas. Y a partir de ello definir cual de los dos es el más apropiado.

3.3.1. ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO

Durante esta etapa con ayuda del software SolidWorks 2014 © en su versión para la educación y el módulo SolidWorks simulation, se realizará un análisis de Elemento Finito, para corroborar que las condiciones del material corresponde a los requerimientos antes mencionados y estos son tan eficaces como los que se proponen en cada uno de los diseños.

Con los datos obtenidos después de realizar cada uno de estos estudios, se pretende obtener la mejor información sobre cada elemento, como son: los esfuerzos, desplazamientos y deformaciones que sufre cada una de las piezas en cada diseño, debido a ello a continuación en la tabla 3.2 se muestra el análisis de cada uno de los esfuerzos y en la tabla 3.3 las unidades con las cuales se maneja este análisis.

3.3.1.1. Análisis propuesta número 3

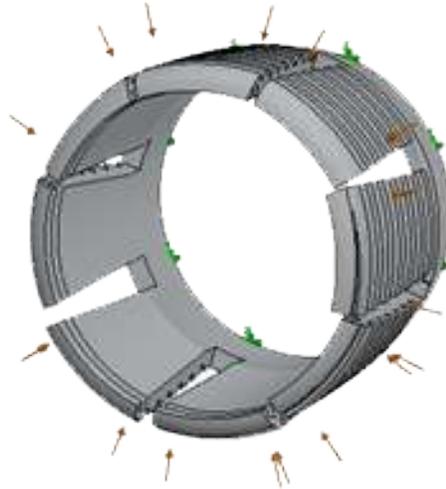


Figura 3.23: Aplicación de fuerzas de compresión a un elemento de sujeción.

En la figura 3.24, se puede observar que en los puntos que se representan en azul, existe un estrés debido a que se ha sobrepasado en ese punto el límite elástico del material, sobrepasando los 27 Giga Newtons, de tal forma se puede observar que se iluminan en color rojo los vértices del cono, esto indicando al diseñador que es en esos puntos en los cuales existiría una ruptura del material.

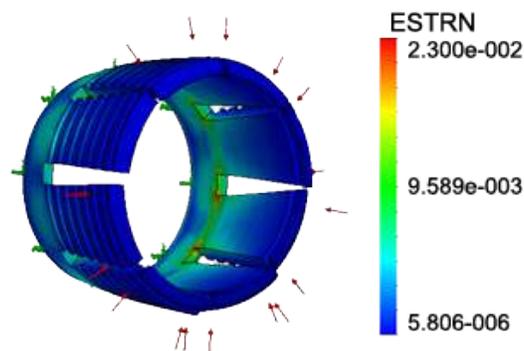


Figura 3.24: Tensiones.

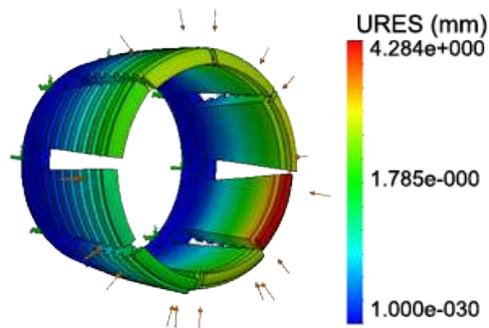


Figura 3.25: Desplazamiento.

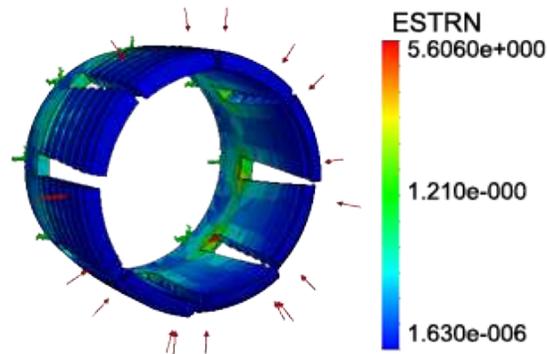


Figura 3.26: Deformaciones unitarias.

Tabla 3.1: Resultados del estudio.

PROPIEDADES	COMPONENTES
Nombre: Aleación 1060	Sólido 1(Cortar-Barrer2)(cono)
Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal	
Criterio de error predeterminado: Desconocido	
Límite elástico: $2.75742 \text{ e}^{+007} \text{ N/m}^2$	
Límite de tracción: $6.89356 \text{ e}^{+007} \text{ N/m}^2$	
Módulo elástico: $6.9 \text{ e}^{+010} \text{ N/m}^2$	
Coefficiente de Poisson: 0.33	
Densidad: 2700 kg/m^3	
Módulo cortante: $2.7 \text{ e}^{+010} \text{ N/m}^2$	
Coefficiente de dilatación térmica: $2.4 \text{ e}^{-005} / \text{Kelvin}$	

Tabla 3.2: Propiedades del estudio.

NOMBRE DEL ESTUDIO	ESTUDIO DEFORMACIÓN
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Tipo de solver	FFEPlus
Efecto de rigidización por tensión (Inplane)	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automática
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Activar
Utilizar método adaptativo	Desactivar

Tabla 3.3: Unidades Empleadas.

SISTEMA DE UNIDADES	MÉTRICO (MKS)
Longitud / Desplazamiento	mm
hline Temperatura	Kelvin
hline Velocidad angular	Rad-seg
hline Presión / Tensión	N/ m ²

En la figura 3.27, se puede observar cada una de las fuerzas que han sido aplicadas, sobre la montura, para simular la acción de la tuerca que al deslizarse sobre la periferia de esta, inicia el proceso de compresión de la lente, permitiendo medir la cantidad de presión en Newtons que se puede aplicar en esta.

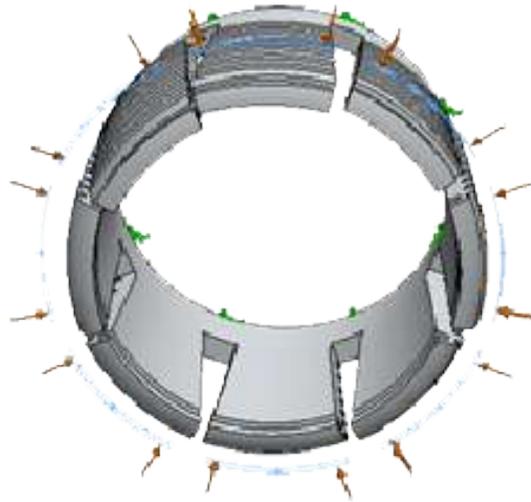


Figura 3.27: Análisis de deformación.

Tabla 3.4: Fuerzas resultantes.

COMPONENTES	X	Y	Z	RESULTANTE
Fuerza de reacción(N)	$-9.55195 e^{-006}$	$3.93829 e^{-005}$	$3.89574 e^{-005}$	$5.62132 e^{-005}$
Momento de reacción(N*m)	0	0	0	0

Tabla 3.5: Información de malla.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	0 mm
Tamaño mínimo del elemento	0 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 3.6: Información de malla - detalles.

Número total de nodos	15267
Número total de elementos	7578
Cociente máximo de aspecto	38.857
% de elementos cuyo cociente de aspecto es <3	69.3
% de elementos cuyo cociente de aspecto es >10	0.845
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:19



Figura 3.28: Mallado.

Tabla 3.7: Fuerzas resultantes

FUERZAS DE REACCIÓN					
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	$-9.55195 \text{ e}^{-006}$	3.93829 e^{-005}	3.89574 e^{-005}	5.62132 e^{-005}
MOMENTOS DE REACCIÓN					
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N*m	0	0	0	0

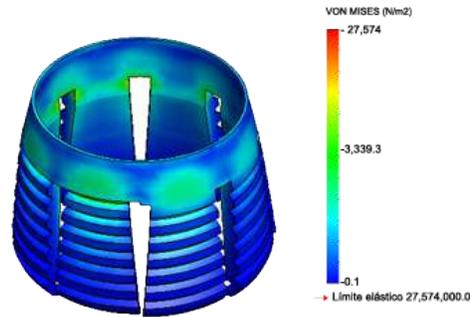


Figura 3.29: Resultados del estudio de Tensiones.

Tabla 3.8: Resultados del estudio de Tensiones.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.0941933 N/m ² Nodo: 9626	666.492 N/m ² Nodo: 6644
Tensiones1	URES: Desplazamiento resultante	0.0 mm Nodo: 9	7.6288e-007 mm Nodo: 1046

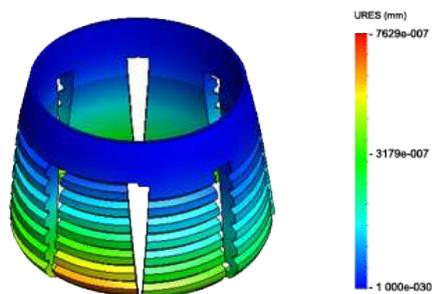


Figura 3.30: Resultados del estudio de Desplazamientos.

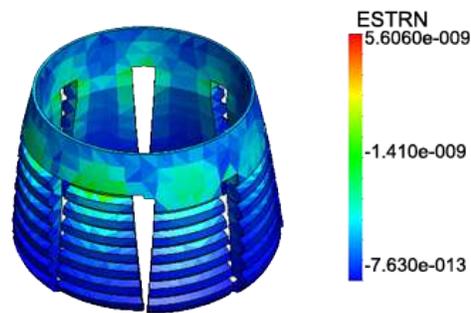


Figura 3.31: Deformación unitaria.

Con base en los análisis estáticos presentados en las imágenes antes mostradas, se observa el comportamiento de la montura, con ello se realiza un prototipo en 3D del mecanismo principal de las dos monturas.

Una de las herramientas a las que se recurre en la actualidad para observar el comportamiento de las propuestas de diseño, previas a el prototipo final, es la impresión en 3D, es por lo anterior que una vez realizados los análisis de los que con anterioridad se ha hecho mención, se tomó la decisión de realizar un prototipo en una impresora de 3D, este proceso es denominado rapid prototyping, y consiste en generar un prototipo por medio de la impresión de un polímero un objeto dibujado en un programa 3D, se puede observar dicho modelo en las figuras 3.32, 3.33 y 3.34. Este prototipo se realizó con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos por el software, y observar si estos eran reales, lo cual dio como resultado, que los datos presentados en los análisis, son confiables, y se asemejan mucho al comportamiento real.

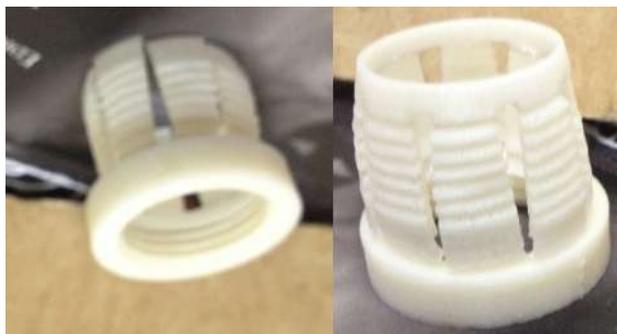


Figura 3.32: Piezas principales del prototipo en ABS.



Figura 3.33: Prototipo de ABS Rapid prototyping.



Figura 3.34: Puntos de ruptura del prototipo.

3.3.1.2. Rediseño de montura propuesta número 3

Después de haber analizado la pieza principal de la montura, se encontraron problemas de no uniformidad en el sistema de compresión de la lente, estos problemas en particular fueron generados por el comportamiento de la lente, y las dimensiones propuestas en el prototipo, y gracias a esto se puede observar el comportamiento real de la lente ante la deformación que se lleva a cabo dentro de la montura, es por ello que, se realizaron modificaciones específicas en el diseño, que permitirán la deformación uniforme de la lente, como se puede ver en la figura 3.35, el nuevo diseño de la montura con las correcciones, que consisten en incrementar el espesor a 3 mm y el cambio de material por un polímero más elástico, como el PE (polietileno de alta densidad).

En la figura 3.35 se puede observar que se ha definido el tipo de material a utilizar, anteriormente las pruebas de realizaron en aluminio 1060, ABS y como se mencionó con anterioridad, se realizó un prototipo en rapid prototyping, gracias a ello, en este nuevo análisis el material del cono es PE (Polietileno), debido a sus propiedades físicas y mecánicas, como

se observa en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: Propiedades del material.

PROPIEDADES	COMPONENTES
Nombre: ABS Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite de tracción: $3.000 \text{ e}^{+007} \text{ N/m}^2$ Módulo elástico: $2.000 \text{ e}^{+009} \text{ N/m}^2$ Coeficiente de Poisson: 0.394 Densidad: 1020 kg/m^3 Módulo cortante: $3.189 \text{ e}^{+008} \text{ N/m}^2$	Sólido 1(Cortar-Barrer2)(conop)

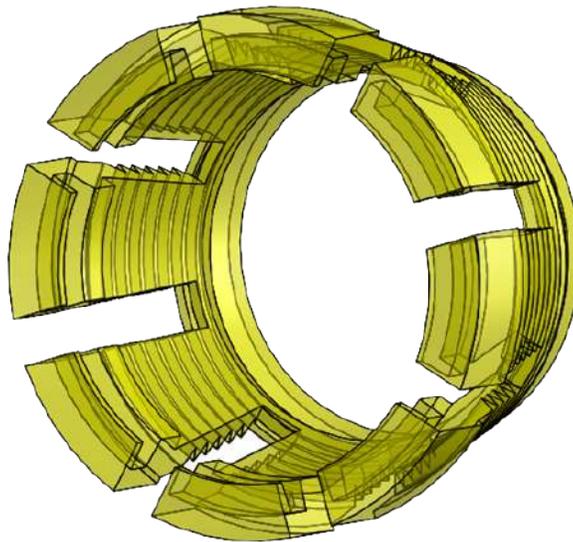


Figura 3.35: Cono modificado de Polietileno (PE).

Realizando las pruebas de deformación, desplazamiento y tensiones se obtuvieron los siguientes resultados, como se puede ver en las figuras 3.36, 3.42, 3.38, 3.40, 3.37, 3.39 y 3.41.

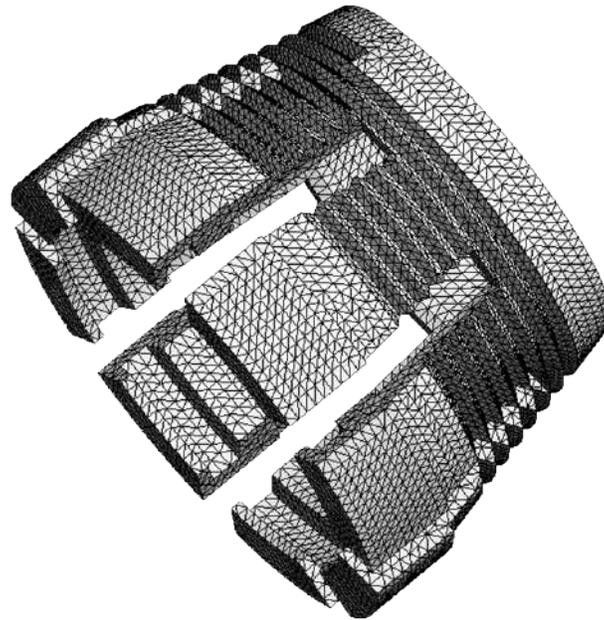


Figura 3.36: Mallado.

Tabla 3.10: Información de malla.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	0 mm
Tamaño mínimo del elemento	0 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 3.11: Información de malla - detalles.

Número total de nodos	15267
Número total de elementos	7578
Cociente máximo de aspecto	16.235
% de elementos cuyo cociente de aspecto es <3	67.9
% de elementos cuyo cociente de aspecto es >10	0.295
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:29

Tabla 3.12: Fuerzas resultantes.

FUERZAS DE REACCIÓN					
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	4.41074 e ⁻⁰⁰⁶	0.000149488	0.0001122474	0.000187127
MOMENTOS DE REACCIÓN					
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N*m	0	0	0	0

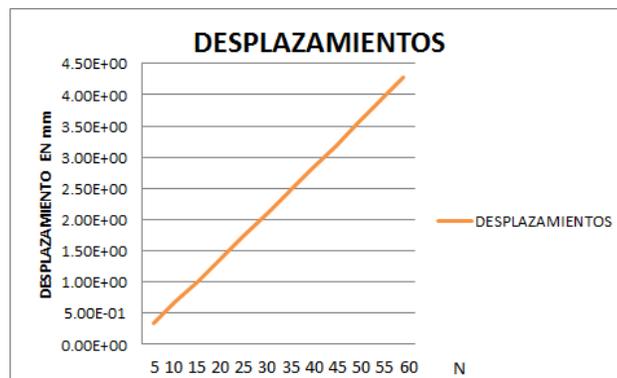


Figura 3.37: Gráfica de Fuerza Vs Desplazamientos.

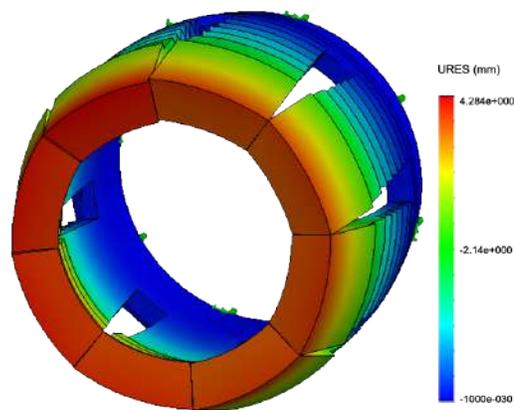


Figura 3.38: Análisis de Desplazamientos.

En la figura 3.37 se observa, que la gráfica se comporta de forma lineal y no como se pudiera esperar, representada por una curva como es la de esfuerzo-deformación, presentado el límite de plasticidad y elasticidad del material, debido a que esta se encuentra dentro de este límite, y no sobre pasa la fuerza aplicada en el desplazamiento.

Esta gráfica se obtuvo mediante la aplicación de diferentes fuerzas, partiendo de 5 Newtons, hasta llegar a los 60N, esto con el afán de mostrar el efecto que sufriría la montura al ser expuesta a las fuerzas antes mencionadas, mostrando un desplazamiento uniforme, como se esperaba.



Figura 3.39: Gráfica de Fuerza Vs Deformaciones.

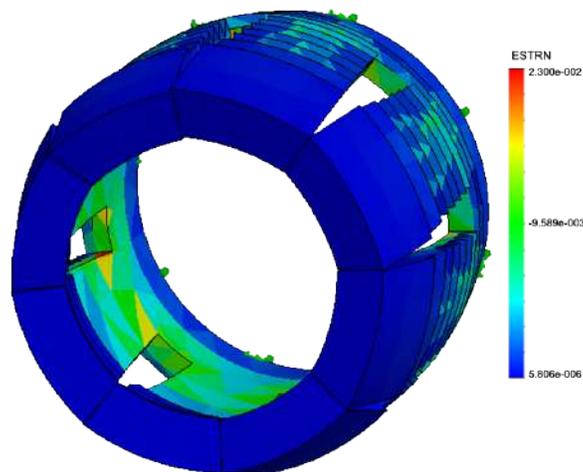


Figura 3.40: Análisis de Deformaciones.

En la figura 3.39, se observa la gráfica de deformaciones sufridas por el material desde

5 hasta 60 Newtons, esto basado en el estudio y dando como resultado, que no presenta una transformación muy notable del material, debido a ello, se presenta en forma lineal en el esquema de deformaciones, mostrando que la montura está diseñada para soportar la fuerza aplicada, esto sin presentar cambios significativos en el material.

Dentro de la imagen 3.41 se pueden observar las fuerzas de tensión a las que se encuentra expuesta, dichas fuerzas externas oscilan desde los 5 a los 60 Newtons, esto para que se pueda observar con mejor detalle, cada una de las tensiones aplicadas a este prototipo por cada una de las fuerzas externas existentes.

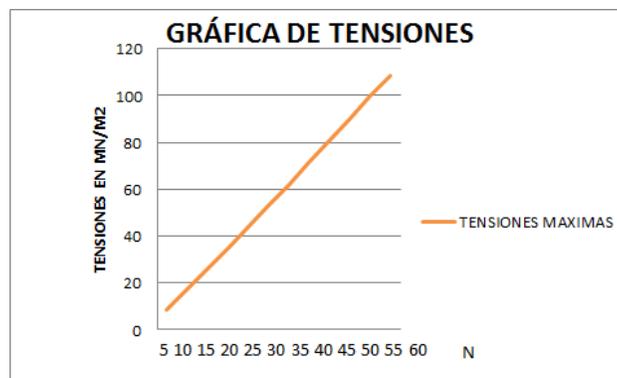


Figura 3.41: Gráfica de Fuerza Vs Tensiones.

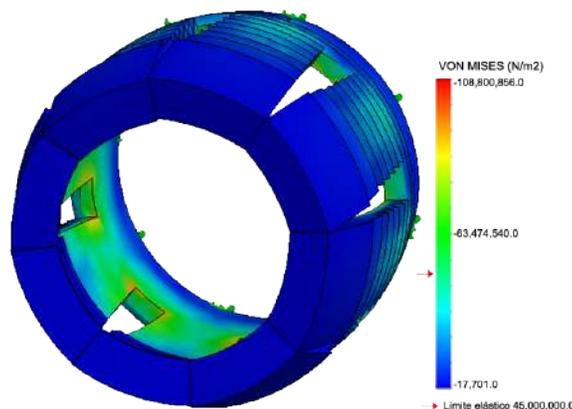


Figura 3.42: Análisis de Tensiones.

3.3.1.3. Análisis propuesta número 4

En la figura 3.43, se observa la pieza que se denomina soporte cónico para lente PDMS, cuyo objetivo es soportar una de este tipo dentro de una montura, para permitir la compresión de la misma de forma uniforme, evitando aberraciones ópticas, el material de esta es Poliestireno de alta densidad, elegido así por sus propiedades elásticas.

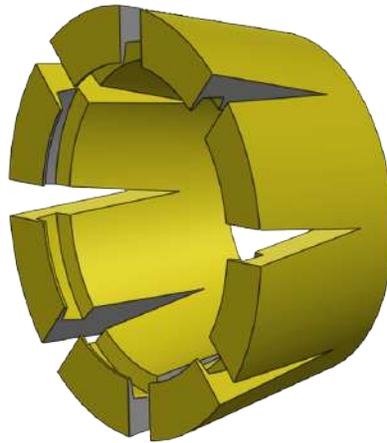


Figura 3.43: Soporte cónico para lente PDMS.

En la figura 3.44, se observa que los puntos que se representan en azul, indican el punto a partir del cual se empiezan a presentar tensiones sobre el material, se puede ver que se ilumina de varios colores la periferia del soporte cónico para lente PDMS, sugiriendo al diseñador que se ha sobrepasado en ese punto el límite elástico del material, el cual se encuentra sobre los 5 Giga Newtons, pero por el contrario, solo indica el esfuerzo encontrado en el punto de sujeción, debido a que es sobre ese punto en el cual se propuso una del tipo fija para que el análisis se pudiera llevar a cabo.

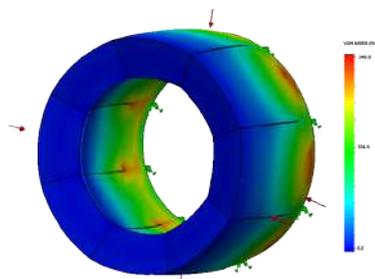


Figura 3.44: Aplicación de fuerzas de compresión a un elemento de sujeción.

Dentro de los análisis a los que se somete el soporte cónico para lente PDMS, cabe hacer mención del esfuerzo por compresión, este se lleva a cabo por toda la periferia de soporte, de tal forma que garantiza la una deformación uniforme de la lente a la cual soporta.

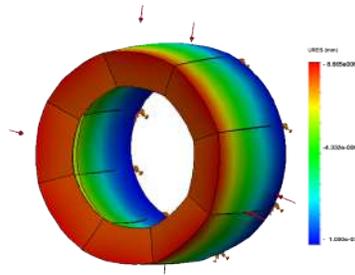


Figura 3.45: Desplazamiento.

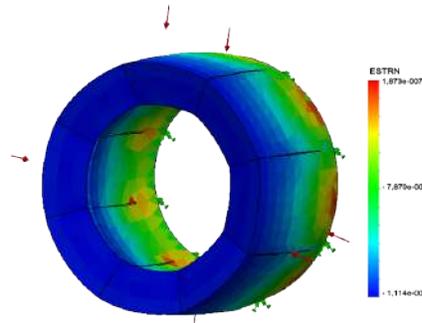


Figura 3.46: Deformaciones unitarias.

Tabla 3.13: Resultados del estudio.

PROPIEDADES	COMPONENTES
Nombre: Aleación 1060	Sólido 1(cara 1)(conoan)
Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal	
Criterio de error predeterminado: Desconocido	
Límite elástico: $2.75742 \text{ e}^{+007} \text{ N/m}^2$	
Límite de tracción: $6.89356 \text{ e}^{+007} \text{ N/m}^2$	
Módulo elástico: $6.9 \text{ e}^{+010} \text{ N/m}^2$	
Coefficiente de Poisson: 0.33	
Densidad: 2700 kg/m^3	
Módulo cortante: $2.7 \text{ e}^{+010} \text{ N/m}^2$	
Coefficiente de dilatación térmica: $2.4 \text{ e}^{-005} / \text{Kelvin}$	

Tabla 3.14: Propiedades del estudio.

NOMBRE DEL ESTUDIO	ESTUDIO DEFORMACIÓN
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Tipo de solver	FFEPlus
Efecto de rigidización por tensión (Inplane)	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automática
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Activar
Utilizar método adaptativo	Desactivar

Tabla 3.15: Unidades.

SISTEMA DE UNIDADES	MÉTRICO (MKS)
Longitud / Desplazamiento	mm
hline Temperatura	Kelvin
hline Velocidad angular	Rad-seg
hline Presión / Tensión	N/ m ²

En la figura 3.47 se observa cada una de las fuerzas aplicadas, sobre la montura, esto para simular la acción cilindro y cono que al deslizarse sobre la periferia de este, se inicia el proceso de compresión de la lente, permitiendo medir la cantidad de presión en Newtons (5N) que se puede aplicar en esta.

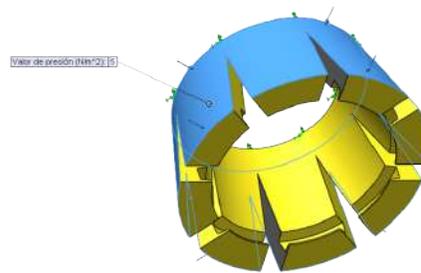


Figura 3.47: Análisis de cargas externas sometidas a compesión.

Tabla 3.16: Fuerzas resultantes.

COMPONENTES	X	Y	Z	RESULTANTE
Fuerza de reacción(N)	$-9.55195 e^{-006}$	$3.93829 e^{-005}$	$3.89574 e^{-005}$	$5.62132 e^{-005}$
Momento de reacción(N*m)	0	0	0	0

Tabla 3.17: Información de malla.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	0 mm
Tamaño mínimo del elemento	0 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 3.18: Información de malla - detalles.

Número total de nodos	15267
Número total de elementos	7578
Cociente máximo de aspecto	38.857
% de elementos cuyo cociente de aspecto es <3	69.3
% de elementos cuyo cociente de aspecto es >10	0.845
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:19

En la figura 3.48, se puede observar el mallado, que se realiza para identificar cada uno de los nodos de la pieza, y de esta forma generar el análisis de esfuerzo deformación así como

el de tensiones y desplazamientos. Es de gran importancia el mallado, ya que éste define que tan cerca de la realidad se encuentren los resultados arrojados por el análisis.

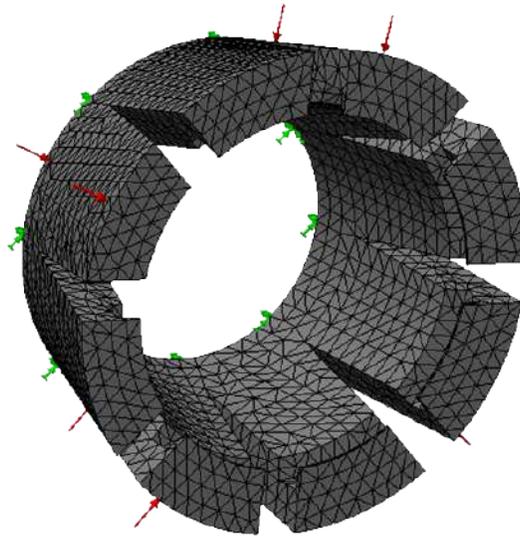


Figura 3.48: Análisis del mallado.

Tabla 3.19: Fuerzas resultantes.

FUERZAS DE REACCIÓN					
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	$-9.55195 \text{ e}^{-006}$	3.93829 e^{-005}	3.89574 e^{-005}	5.62132 e^{-005}
MOMENTOS DE REACCIÓN					
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N*m	0	0	0	0

Tabla 3.20: Resultados del estudio de Tensiones.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.0941933 N/m ² Nodo: 9626	666.492 N/m ² Nodo: 6644
Tensiones1	URES: Desplazamiento resultante	0.0 mm Nodo: 9	7.6288e-007 mm Nodo: 1046

3.3.2. ANÁLISIS DE LA LENTE PDMS

Una vez, introducidos los datos del polímero PDMS en el software SolidWorks, se realizan los análisis de esfuerzos, deformaciones, tensiones y estiramientos, que pueda sufrir la lente dentro de la montura, para que auxiliados del software, se observa el comportamiento de esta, y proceder a la fabricación del prototipo.

Tabla 3.21: Propiedades del material de la lente Polidimethylsiloxano(PDMS).

PROPIEDADES	COMPONENTES
Nombre: Polidimethylsiloxano(PDMS) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises Límite elástico: $7.00 \text{ e}^{+005} \text{ N/m}^2$ Límite de tracción: $2.50 \text{ e}^{+006} \text{ N/m}^2$ Módulo elástico: $1.20 \text{ e}^{+006} \text{ N/m}^2$ Coeficiente de Poisson: 0.46 Densidad: 982 kg/m^3 Módulo cortante: $41 \text{ e}^{+004} \text{ N/m}^2$	Sólido 1(Cortar-Extruir1)(lentepdms113)
Coeficiente de dilatación térmica: 310 /Kelvin	

En la tabla 3.21, se pueden observar las características de la lente, entre ellas el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, entre otros, estos datos se introducen en el software SolidWorks, permitiendo así elaborar el análisis de deformación de esta, y poder aproximar la fuerza necesaria para llevar a cabo la deformación que se pretende realizar sobre ella con la montura.

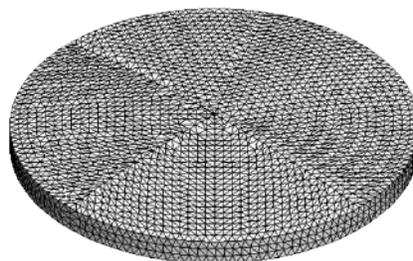


Figura 3.49: Imagen del mallado de la lente.

La imagen 3.49, muestra que se realizó un mallado, este se lleva a cabo con el programa y sirve para que el mismo reconozca los límites del modelo, así como la evaluación de las

fuerzas a las que es sometido, dicho mallado representa el volumen del objeto o diseño de tal forma que al someter este al análisis se puede determinar de forma adecuada cada una de las deformaciones a las que será sometida, estos detalles sobre la malla se pueden observar en las tablas ?? y ??.

Tabla 3.22: Información de malla.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	0.642747 mm
Tamaño mínimo del elemento	0.0321373 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 3.23: Información de malla - detalles.

Número total de nodos	72786
Número total de elementos	48719
Cociente máximo de aspecto	31.05
% de elementos cuyo cociente de aspecto es <3	98
% de elementos cuyo cociente de aspecto es >10	0.0349
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:29

En la tabla 3.23, se observa el estudio estático realizado a la lente, en esta se presentan el análisis de las fuerzas resultantes, así como la suma de fuerzas en los ejes “ X ”, “ Y ” y “ Z ”, además de los momentos de reacción.

Tabla 3.24: Fuerzas resultantes.

FUERZAS DE REACCIÓN					
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	-2.8871 e ⁻⁰⁰⁸	-5.95872 e ⁻⁰⁰⁶	-5.63884 e ⁻⁰⁰⁶	8.20388 e ⁻⁰⁰⁶
MOMENTOS DE REACCIÓN					
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N*m	0	0	0	0

Las tensiones a las que es sometida esta lente se puede observar en la figura 3.50, y cada uno de las fuerzas a las que se fue sometida, están representadas en la figura 3.51 y 3.52, cada una de ellas representa las deformaciones que sufre esta al ser sometida de 5 - 60 Newtons.

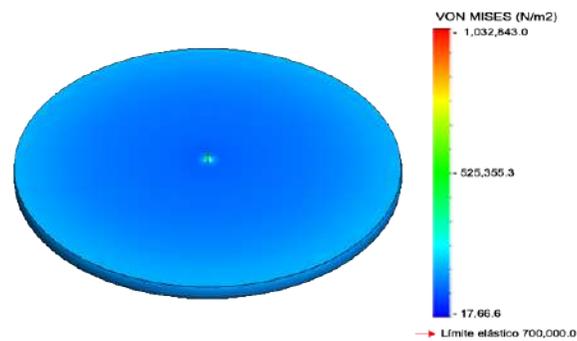


Figura 3.50: Lente PDMS- Estudio -Tensiones (60 N).

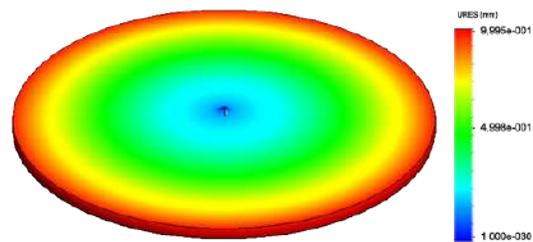


Figura 3.51: Lente PDMS- Estudio -Desplazamientos (60 N).

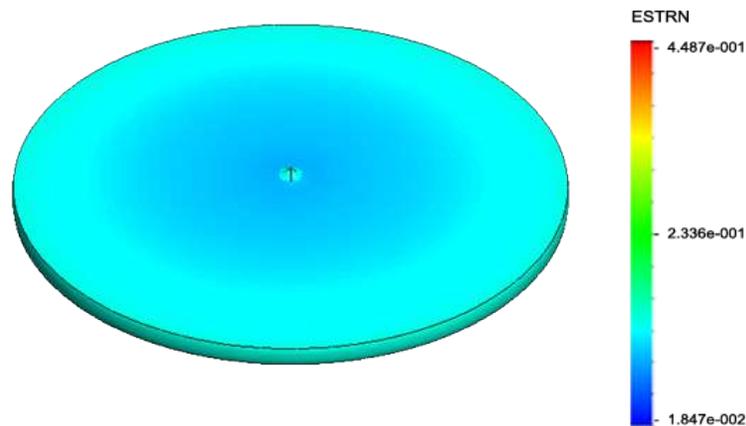


Figura 3.52: Lente PDMS- Estudio -Deformaciones unitarias (60 N).

De lo anterior en la figura 3.53, se presenta un corte transversal de la lente, apreciando el comportamiento que esta tiene al ser sometida a una presión de 60 Newtons, la imagen representa una deformación en la periferia de la lente debida a la las fuerzas externas, la cual se trasfiere al centro de esta, provocando una deformación uniforme y controlada en ella, cabe hacer mención que para poder llevar a cabo este análisis se puso un eje en la parte central de la lente como sistema de sujeción, lo anterior genera un hundimiento en el centro de la lente, como se puede observar en las figuras 3.52, 3.51 y 3.50, lo cual no es real, dado que en realidad se genera una cúpula en ambos lados del centro de la lente.

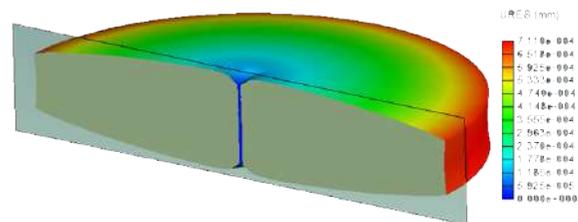


Figura 3.53: Imagen de la lente sometida a compresión (60 N) corte transversal.

3.4. SELECCIÓN FINAL

Debido a la similitud de beneficios presentados por las propuestas 3 y 4, se recurre al PAJ, de tal forma que con ayuda de este proceso de selección se pueda elegir la que mejor convenga para el desarrollo de este proyecto. El PAJ en este proyecto se desarrolla en tres etapas para seleccionar el sistema óptimo para la montura de la lente PDMS.

- Etapa 1 Establecer la jerarquía. La jerarquía se compone del objetivo, los criterios con los cuales se evalúa a las alternativas y las alternativas propias, figura 3.54.

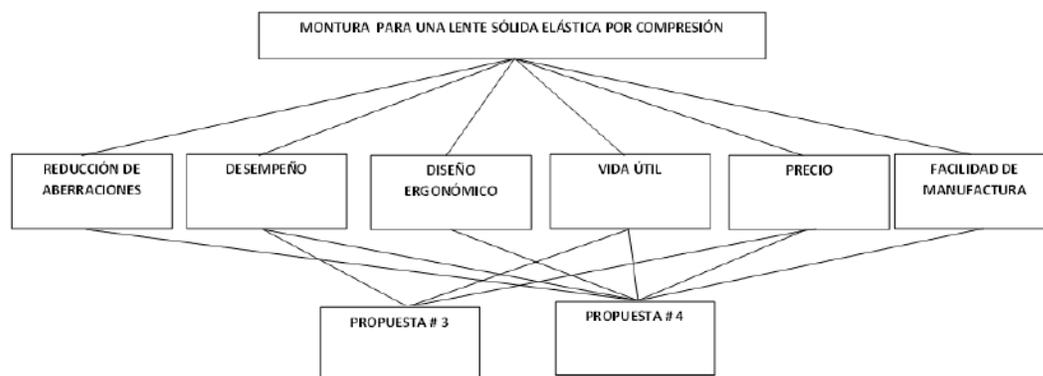


Figura 3.54: Modelo jerarquizado para la selección de la mejor propuesta para montura.

- Reducción de aberraciones, es una característica , con la cual el equipo debe de contar dado que, la deformación de la lente debe ser uniforme.
- Desempeño. La capacidad que el sistema para transmitir carga sobre el soporte cónico y permitir la compresión de la lente PDMS, además permitiendo la facilidad de manejo.
- Diseño ergónomico. La forma del sistema seleccionado deberá facilita una aplicación cómoda y sin fatiga al usuario.
- Vida útil: capacidad de hacer el número de pruebas necesarias, sin que en este existan pruebas del desgaste por tiempo o aplicación.
- Precio. Consideraciones de costo de manufactura del sistema.
- Facilidad de manufactura. Consiste principalmente en la simplicidad de las piezas para su trasformación, de materia prima a pieza mecánica.

Las alternativas de solución son las propuestas 3 y 4. Debido a que las dos primeras quedaron descartadas, en el QFD, dado que sus características fueron las que menos cumplieron con los requerimientos solicitados previamente.

- Etapa 2 Efectuar las comparaciones entre los objetivos de la decisión y los criterios de decisión. Se llevan a cabo comparaciones entre los criterios respecto del objetivo de la decisión y entre las alternativas respecto de cada uno de los criterios.

Los pesos asignados en la comparación de criterios se muestran en la tabla 3.25.

Tabla 3.25: Escala de pesos asignados a los criterios de selección, de acuerdo a SAATY[43].

PESOS ASIGNADOS A LOS CRITERIOS		
	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	Igualdad de importancia entre el mismo criterio	por ejemplo: reducir el número de aberraciones vs reducir el número de las aberraciones (criterio 1 vs criterio 1)
3	Moderadamente importante	Por ejemplo el criterio Diseño ergonómico, influye moderadamente sobre el criterio desempeño (criterio 3 vs criterio 2)
5	Importante (esencial)	Por ejemplo el criterio Vida útil, influye de manera importante sobre el criterio desempeño (criterio 4 vs criterio 2)
7	Muy importante	Por ejemplo el criterio Precio, influye de manera muy importante sobre el criterio Facilidad de manufactura (criterio 5 vs criterio 6)

Tabla 3.26: Matriz de comparación del nivel 2 (criterios vs criterios).

Criterios de decisión	1	2	3	4	5	6	Eigenvector Principal	vector de prioridades
1	1	1/3	5	3	7	7	2.001	0.264
2	3	1	5	7	5	3	2.943	0.388
3	1/5	1/5	1	3	5	3	0.967	0.127
4	1/3	1/7	1/3	1	5	3	0.712	0.094
5	1/7	1/5	1/5	1/5	1	7	0.615	0.081
6	1/7	1/3	1/3	1/3	1/7	1	7.637	0.046
λ máx= 7.590		CI=0.318	CR=0.256				$\Sigma=14.875$	$\Sigma=1.000$

El cuadro 3.26, muestra el resultado de las evaluaciones de los criterios respecto del objetivo; los renglones y columnas numerados del 1 al 6, representando los 6 criterios de decisión establecidos.

Cada uno de los criterios, se comparó con los cinco restantes y contra el mismo, contestando la pregunta: ¿ El criterio (X), es más o menos importante que el criterio (Y), al escoger el sistema óptimo para el soporte cónico de una lente PDMS (el objetivo)?, si el criterio (X), se compara con el criterio (Y) como de importancia esencial o fuerte, se le asignará un valor de 6, por lo que al comparar Y) con (X) la comparación será el recíproco es decir 1/6, si el factor (X) es comparado consigo mismo, el valor será 1 según el cuadro 3.25.

Esta comparación entre factores genera una matriz cuadrada, de la cual se obtiene su eigenvector y el valor máximo eigenvalor λ_{max} , a partir del eigenvector, se determina el vector de prioridad que indica la prioridad relativa de cada criterio de decisión; en el cuadro 3.26, el criterio 2 (Desempeño) tiene el 40% como la mayor importancia o prioridad, seguido del criterio 1 .

Con el fin de asegurar la consistencia y la validez del proceso, se calcula la razón de consistencia CR a partir del índice de consistencia CI, que a su vez involucra el valor λ_{max} , de donde $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$, con n = número de criterios de decisión de la matriz, $CR = \frac{CI}{RI}$, $RI < 0.1$, es el valor del índice de consistencia aleatorio, indicando claramente que debe ser menos del 10%.

El valor de CR, debe ser menor o igual a 0.1 [44], se ha argumentado que éste es un valor asignado arbitrariamente, como una medida tentativa [45] y algunos de los autores aceptan que en la práctica valores mayores sean aceptables [44] [45], el mismo autor Saaty, reporta valores hasta de 0.21. El valor de RI, es una función del tamaño de la matriz considerada; los valores más comunes se pueden consultar en [44].

El valor de λ_{max} para el cuadro 3.28, es de 7.590 con n=6, el valor CI es de 0.318. Para la matriz cuadrada de orden 6, $RI = 1.24$, por lo tanto CR es 0.256 ó 25.6%. La matriz es consistente y el vector de prioridad válido.

Los cuadros 3.28 a 3.32 muestran la comparación de las alternativas respecto de cada uno de los criterios, esta vez en renglones y columnas contienen las alternativas que podrían satisfacer el objetivo; la pregunta que ahora se plantea es ¿ Cómo la alternativa (X) es más o menos importante que la alternativa (Y) para el criterio (Z)? El cálculo del eigenvector, el máximo eigenvalor λ_{max} y CR, se calcularán como antes, considerando que son matrices de orden 2.

Como los cuadros 3.28 a 3.32 muestran valores de CR cercanos al 10%, los vectores de prioridad se consideran válidos.

Tabla 3.27: Matriz de comparación alternativas contra criterio 1 de Reducción de aberraciones.

Criterio 1	propuesta 4	propuesta 3	Eigenvector	vector de prioridad
propuesta 4	1	7	5.612	0.875
propuesta 3	0.1428	1	0.801	0.124
λ máx= 6.414	CI= 4.414	CR=0.00	Σ =6.414	Σ =1

Tabla 3.28: Matriz de comparación alternativas contra criterio 2 de Desempeño.

Criterio 2	propuesta 4	propuesta 3	Eigenvector	vector de prioridad
propuesta 4	1	5	3.977	0.833
propuesta 3	0.2	1	0.795	0.166
λ máx= 4.7724	CI=2.772	CR=0.00	Σ =4.772	Σ =1

Tabla 3.29: Matriz de comparación alternativas contra criterio 3 de Diseño ergonómico.

Criterio 3	propuesta 4	propuesta 3	Eigenvector	vector de prioridad
propuesta 4	1	5	3.977	0.833
propuesta 3	0.2	1	0.795	0.167
λ máx= 4.772	CI=2.772	CR=0.00	Σ =4.772	Σ =1

Tabla 3.30: Matriz de comparación alternativas contra criterio 4 de Vida útil.

Criterio 4	propuesta 4	propuesta 3	Eigenvector	vector de prioridad
propuesta 4	1	5	3.977	0.833
propuesta 3	0.2	1	0.795	0.167
λ máx= 4.772	CI=2.772	CR=0.00	Σ =4.772	Σ =1

Tabla 3.31: Matriz de comparación alternativas contra criterio 5 de Precio.

Criterio 5	propuesta 4	propuesta 3	Eigenvector	vector de prioridad
propuesta 4	1	3	0.713	0.751
propuesta 3	0.33	1	0.236	0.249
λ máx=0.949	CI=-1.051	CR=0.00	Σ =0.949	Σ =1

Tabla 3.32: Matriz de comparación alternativas contra criterio 6 de Facilidad de manufactura.

Criterio 6	propuesta 4	propuesta 3	Eigenvector	vector de prioridad
propuesta 4	1	5	3.579	0.25
propuesta 3	0.2	1	1.193	0.75
λ máx= 4.772	CI= 2.772	CR=0.00	$\Sigma=4.772$	$\Sigma=1$

- Etapa 3 calcular las prioridades globales de las alternativas. En este paso, se lleva a cabo la elección del sistema óptimo para la montura, utilizando las propiedades globales jerarquizadas como resultado de la evaluación de cada uno de los criterios y de la medida en que cada alternativa satisface el requerimiento específico.

El cuadro 3.33 muestra las prioridades globales, que indican cuál de las alternativas cumple en mayor medida con los criterios de decisión del objeto trazado.

Tabla 3.33: Matriz de Prioridades globales.

Vector de prioridad de criterio (cuadro 2)		Reducción de aberraciones	Desempeño	Ergonomía	vida útil	Precio	Facilidad de manufactura	Prioridades globales
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
		0.264	0.388	0.127	0.094	0.081	0.046	
Vector de prioridad de cada alternativa para cada criterio (tablas 3.27 - 3.32)	P4	0.875	0.833	0.833	0.833	0.751	0.750	0.834
	p3	0.125	0.167	0.167	0.167	0.2496	0.250	0.166

El PAJ es un método que podría ayudar a resolver un problema, cuando un grupo de personas influyen en decisiones importantes y están influenciadas por un conjunto de criterios objetivos y subjetivos, con ello se logra una decisión robusta, fundamentada en el análisis estricto, del cálculo en la experiencia y en la opinión de los involucrados en la decisión. El sistema para para realizar una montura para una lente PDMS debe ser cuidadosamente seleccionada, ya que el proceso de realizarla incluye factores como: ergonomía, desempeño . El prototipo seleccionado, a través del PAJ representa garantía de una buena elección . La importancia de esta evaluación, es que en el están considerando criterios cuantitativos y cualitativos sin embargo sabemos que existen tantos factores indeterminados en los dos sistemas, que es imposible llegar a soluciones exactas.

Para concluir la parte de la selección final, el cuadro 3.33, en la columna de prioridades globales, contundentemente nos muestra que la propuesta 4 es la mejor para el proyecto, con

un porcentaje de 83.4 %, dejando marcada la diferencia entre esta y la propuesta 3. Para contestar la pregunta planteada ¿Cómo elegir de la mejor propuesta?, la respuesta es aplicando un proceso analítico jerarquizado, que incluya criterios cuantitativos y cualitativos. El PAJ también, se puede utilizar para resolver otros problemas en ingeniería y en otras áreas, por ejemplo, cuando las decisiones importantes las tomen personas con criterios cuantitativos y cualitativos.

3.4.1. MANUFACTURA

La elección de un proceso de manufactura queda determinada por diversas consideraciones. Algunas de estas son: las características y propiedades del material de la pieza; la forma, tamaño y espesor; los requerimientos de funcionamiento de la pieza; el volumen (cantidad) de producción, el nivel de automatización requerido para cumplir con el volumen y la rapidez de producción.

Cada proceso de manufactura posee ventajas y limitaciones. Por ejemplo, el moldeo por inyección y la fundición, pueden producir formas mucho más complejas que el forjado y la metalurgia de polvos, por que el metal y el plástico fundidos pueden llenar múltiples cavidades de matrices o moldes. Por otro lado, las piezas forjadas de pueden fabricar con formas complejas, en general con operaciones posteriores de maquinado (desbaste y acabado), estas para remover el material excedente, presentando una tenacidad que suele ser mejor que la de las piezas fundidas o las de pulvimetalurgia.

La manufactura en su sentido más amplio, es el proceso de convenir la materia prima en productos, incluye el diseño del producto, la selección de la materia prima y la secuencia de pasos y procesos a través de los cuales será manufacturado el producto.

La manufactura puede desarrollar productos discretos y productos continuos, mediante máquinas de producción que se clasifican como operadas manualmente, semiautomatizadas y totalmente automatizadas. Por otro lado, la aplicación de de los sistemas de cómputo para el diseño y la manufactura han tenido un amplio desarrollo y se han extendido a diversos sectores productivos. Estos sistemas que han revolucionado la industria y los procesos de producción, simplifican las operaciones de dibujo y el cálculo de ecuaciones matemáticas para hallar tangencias, intersecciones, posiciones de centro o complicadas superficies, permitiendo a su vez el cambio de herramientas.

3.4.2. PLANIFICACIÓN DE PROCESOS DE MANUFACTURA

Para la fabricación óptima y eficiente de componentes, es necesario desarrollar el proceso de manufactura, por lo que se debe considerar; la maquinaria, los tiempos de fabricación requeridos, el material y las tolerancias de diseño, así como las diferentes operaciones requeridas hasta obtener el producto final. Las fases del proceso de manufactura están íntimamente relacionadas unas de las otras, a fin de presentar una pieza terminada conforme a los parámetros establecidos y a las especificaciones de diseño. Por lo que en la sección de detalles se ha desarrollado numéricamente este y la forma de como se llevara a cabo el ensamble.

Actualmente existen una gran diversidad de maquinas y herramientas para la manufactura, entre ellas podemos mencionar a las fresadoras de control numérico, los tornos, tornos fresadores, entre otros. De ahí la complejidad de elegir adecuadamente el proceso idóneo. Es de vital importancia conocer cuales son los alcances de cada una de las maquinas, o bien hacer una combinación entre ellas generando un sistema de manufactura.

En esta sección se abordará la construcción de todos los elementos del sistema mecánico, primeramente se simula su manufactura mediante software ingenieril enfocado a al maquinado de partes para determinar que estrategias de corte y herramientas son necesarias para la fabricación de cada una de las piezas.

En el mercado existen diferentes softwares de CAM (manufactura asistida por computadora), los cuales presentan similitudes entre sí, en algunos casos alguno dentro de estos se puede destacar sobre los demás. Esto debido a diversos factores como:

- La máquina CNC con la que se cuenta.
- El posprocesador utilizado para esa máquina.
- El número de líneas de código generadas para una operación.
- La librería de herramientas del software.
- Los parámetros modificables de las herramientas.
- El tiempo estimado de maquinado.
- La interfaz del software.

Estos parámetros son fundamentales al momento de seleccionar el software de CAM que mejor se adapte a nuestras características de producción. Para este trabajo, se utilizará una

maquina Fancu CNC seires oi- model C/0i Mate- MODEL C B-64120En/02, empleada en ocasiones anteriores por sus usuarios con los siguientes softwares de CAM:

- HSMWorks.
- Delcam.
- Visicad (extención cam).

Dichos softwares están disponibles en las instalaciones de la UTM por lo que nos enfocaremos a la evaluación de sólo estos. Dicha evaluación será llevada a cabo mediante la simulación de la manufactura de una pieza, para seleccionar cuál de estos es óptimo para el maquinado de las partes del prototipo.

La pieza seleccionada para evaluar los softwares de CAM se muestra en la figura 3.55, donde se pueden apreciar sus diferentes vistas.

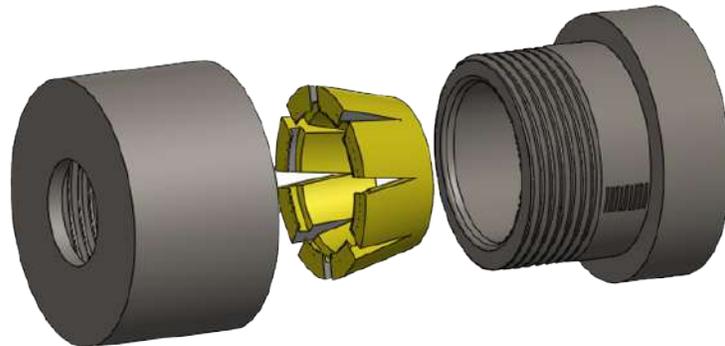


Figura 3.55: Piezas utilizadas para evaluar en software CAM

Los resultados obtenidos por las simulaciones de maquinado están plasmados en la tabla 3.34. El que cumple con la mayor parte de los requerimientos es el software HSMWorks; debido, a que los otros softwares no presentan un toolbox (librería de herramientas) con herramientas tales como cortadores Woodruff necesarios para generar la geometría de la ranura presente en esta pieza. Así mismo, el posprocesador utilizado para la CNC FANUC es adecuado y no arroja errores al momento de ser puesto en marcha, como es el caso de Delcam que cuenta con un posprocesador con una versión piloto.

Tabla 3.34: Evaluación de los programas de maquinado para torno.

CRITERIO	software		
	HSMWorks 2012	Delcam 2012	Visicad 11.3
Cuenta con la marca de CNC.	1	1	1
Posprocesador compatible con el torno.	1	0	0
Menor número de líneas de código.	0	1	1
Librería de herramientas con herramental necesario.	1	0	0
Parámetros modificables de las herramientas.	1	1	0
Menor tiempo estimado de maquinado.	0	0	1
Interfaz amigable.	1	1	1
TOTAL	5	4	4

El software HSMWorks, presenta algunas limitantes como contar con todos los parámetros necesarios en el caso de los maquinados internos, debido a ello es que se recurre a hacer manualmente algunos detalles de geometría al final del maquinado, otra de las desventajas de este software es el tiempo estimado de maquinado, el cual puede variar hasta duplicarse, pero para fines de la construcción de un prototipo no será tomado en cuenta, sólo si fuera para una producción en serie, este se tomaría como un factor muy importante a mejorar, aunado a esto con la reducción de tiempos presenten en la reducción de piezas a maquinar después del DFMexpress se pueden equilibrar los tiempos. En las geometrías presentes en las otras piezas del sistema el software HSMWorks trabaja correctamente.

3.4.2.1. MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS

El afán de automatizar una planta industrial es cada vez más fuerte. El número de máquinas de control numérico (CN) y centros de maquinado está aumentando drásticamente. El proceso de otras tecnologías como los programas de diseño, también basados en computadoras, han tomado un papel muy importante en la manufactura, debido a que dichos programas pueden trabajar en conjunto con las máquinas y herramientas por control numérico, haciendo mucho más eficientes los procesos de producción en el área metal mecánica.

En esta sección es en la que a través de la segunda parte del QFD, se determinará cómo se realizará el prototipo funcional de la montura, que ha sido seleccionada, con ayuda del QFD determinará de forma adecuada cuales serán las máquinas y herramientas que se verán involucradas para la manufactura de este.

Dentro de la UTM, en el laboratorio de tecnología avanzada de manufactura, se cuenta con máquinas de control numérico, cuentan con la capacidad de resolver la geometría propues-

ta. Una de las máquinas que se pretende utilizar es un torno CNC FANUC serie oi mate-tc.

Para la producción de las partes que conformarán al sistema mecánico de la montura es importante tomar en cuenta la maquinaria y herramienta con la que se cuenta en el laboratorio de tecnología avanzada de manufactura y el taller de metales de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, siendo ocupados sólo las siguientes máquinas:

- Taladro fresador.
- Cabezal divisor.
- Torno CNC.
- Sierra cinta.
- Fresadora vertical semiautomática.

Dichas máquinas fueron seleccionadas de acuerdo a la geometría de las piezas a manufacturar, y será utilizada en su mayoría maquinaria de control numérico, debido a su mayor precisión, 0.001 mm cuando se tiene un buen mantenimiento del equipo, en este caso, se tiene una precisión de ± 0.13 mm reales, mientras que las máquinas manuales o semiautomáticas alcanzan resoluciones de (0.01 mm bajo condiciones de mantenimiento de la maquinaria). En el caso de la utilización de la fresadora horizontal es importante recalcar que sólo es ocupada para cortar las secciones utilizando un cabezal divisor, al no contar con otra máquina dentro de las instalaciones del taller de manufactura avanzada capaz de realizar dicha actividad.

Dentro del herramienta involucrado para la construcción de las piezas se encuentran los buriles para el torno y cortadores para la fresadora vertical. Siendo la fresadora la que provee mayor número de operaciones de maquinado. El herramienta ocupado para los procesos de desbaste, han sido seleccionados de acuerdo con las dimensiones de las piezas a maquinar y geometrías específicas a las que se quiere llegar, como es el caso de las ranuras presentes en la pieza denominada soporte cónico con código SCPM01.

Selección de herramientas y dispositivos de sujeción e instrumentos de inspección.

Los elementos de sujeción necesarios para el maquinado de las piezas del prototipo son una parte importante dentro de la planeación de la producción, debido a que si no son fijadas correctamente las piezas pueden crearse errores en estas.

Dentro del taller de manufactura avanzada se cuenta con dos tipos de sujeciones utilizadas para el maquinado en las fresadoras manuales y CNC, las prensas, dentro de las cuales se tienen dos tipos, la de taladro y la de precisión giratoria. Por otro lado se tienen los clamps de escalón, los cuales presentan la misma función de sujetar una pieza para maquinar. En este trabajo, las prensas no son factibles de emplear, debido a las características del material ya que puede deformarse, al ser aluminio y puede llegarse a deformar a espesores pequeños (2mm), por la fuerza de compresión, teniendo como consecuencia piezas con diferentes geometrías y longitudes a las especificadas.

Aunado a esto, el cortador y el buril estarían expuestos a fracturas por los cambios de geometría del material y por la prensa misma, ya que si la estrategia de corte no fue bien definida, o está bien planificada puede generarse una ruta de movimiento rápido donde se encuentre la prensa. Además el material a trabajar será redondo de aluminio por lo tanto se sujetará con las mordazas del chuck por cuatro puntos de apoyo, en el caso del cabezal divisor será por medio de tres.

Determinar las condiciones de maquinado: Velocidad de corte, avance y profundidad de corte, tiempos de preparación y de procesamiento

Las velocidades de corte, avance y profundidades de corte fueron establecidas mediante la ayuda de dos fuentes. La primera presente en la tabla 3.35 (operaciones de fresado) y la tabla 3.36 (operaciones de torneado), ahí se muestran las condiciones de corte recomendadas basadas en datos de Kennametal Inc [23].

En segundo lugar, se calcularon las condiciones de corte utilizando la librería de materiales del software Delcam. Se puede observar que existe una gran diferencia en la velocidad de corte de 610 en el caso de los datos recomendados por el libro a 310 máxima velocidad propuesta por el software.

Tabla 3.35: Recomendaciones generales para las operaciones de torneado.

		Condiciones iniciales de propósito general.		Intervalo de condiciones.	
		Avance mm/diente (pulg/diente)	Velocidad m/min (pie/min)	Avance mm/diente (pulg/diente)	Velocidad m/min (pie/min)
Acero de bajo carbono y libre maquinado.	Carburo no recubierto.	0.13-0.20	120-180	0.085-0.38	90-425
	Carburo recubierto, cermets.	(0.005-0.008)	(400-600)	(0.003-0.015)	(300-1400)
Aceros aleados: Suaves Duros	No recubierta, recubierta cermets.	0.10-0.18	0.10-0.15	90-170	180-210
	Cermets, BN policristalino.	(0.004-0.007)	(0.004-0.006)	(300-550)	(600-700)
		(0.003-0.012)	0.08-0.25 (0.003-0.010)	60-370 (200-1200)	75-460 (250-1500)
Acero inoxidable, austenítico.	No recubierta,	0.13-0.18	(0.005-0.007)	120-370	(400-1200)
	recubierta, cermets.	0.08-0.38	(0.003-0.015)	90-500	(300-1800)
Aleaciones para alta temperatura a base de níquel.	No recubierta,	0.10-0.18	30-370	0.08-0.38	30-550
	recubierta, Cermets, SiN, BN policristalino.	(0.004-0.007)	(100-1200)	(0.003-0.015)	(90-1800)
Aleaciones de titanio.	No recubierta,	0.13-0.15	(0.005-0.006)	50-60 (175-200)	
	recubierta, cermets.	0.08-0.38	(0.003-0.015)	40-140	(125-450)
Aleaciones de aluminio: Libre maquinado	No recubierta,	0.13-0.23	610-900	0.08-0.46	300-3000
	recubierta, diamante policristalino.	(0.005-0.009)	(2000-3000)	(0.003-0.018)	(1000-10000)
Alto silicio	Diamante policristalino.	0.13	610	0.08-0.38	370-910
		(0.005)	(2000)	(0.003-0.015)	(1200-3000)
Aleaciones de cobre.	No recubierta,	0.13-0.23	300-760	0.08-0.46	90-1070
	recubierta, diamante policristalino.	(0.005-0.009)	(1000-2500)	(0.003-0.018)	(300-3500)
Termoplásticos y termófilos.	Recubierta,	0.13-0.23	270-460	0.08-0.46	90-1370
	no recubierta, diamante policristalino.	(0.005-0.009)	(900-1500)	(0.003-0.018)	(300-4500)

Nota: las profundidades de corte suelen ser de 1 a 8 mm (0.04 a 0.3 pulg). PCBN: nitruro de boro policristalino;
PCD: diamante policristalino.

Tabla 3.36: Recomendaciones generales para operaciones de torneado en aluminio.

Material de la pieza.	Herramienta de corte.	Profundidad de corte mm (pulg)	Avance mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte (m/min) (pie/min)	Profundidad de corte mm (pulg)	Avance mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte m/min (pie/min)
Aleaciones de aluminio, libre maquinado.	Carburo no recubierto.	1.5-5.0 (0.06-0.20)	0.45 (0.018)	490	0.25-8.8 (0.01-0.35)	0.08-0.62 (0.003-0.025)	200-670
	Carburo recubierto con TiN.			550			(650-2000)
	Cermet.			(1800)			60-915
	Diamante policristalino.			490			(200-3000)
Aleación al alto silicio.	Diamante policristalino.			(1600)			215-795
	Diamante policristalino.			760			(700-2600)
	Diamante policristalino.			(2500)			305-3050
				530			(1000-10000)
				(1700)			365-915
							(1200-3000)

Nota: las velocidades de corte para herramientas de acero rápido son más o menos la mitad de las de carburos no recubiertos.

Diagrama de procesos

Dentro de la manufactura, existen pasos y secuencias para llevar a cabo cada una de las piezas que el componente requiere, es por ello que en la figura 3.56 se observa a detalle cada uno de los pasos necesarios para cada una de las piezas de esta montura, tal es el caso de la tabla 3.37, en la cual se puede observar la lista de partes, así como el nombre de cada una de ellas, las dimensiones, la cantidad de piezas y la forma de adquisición (refiriendo si se compra o se hace).

Tabla 3.37: Lista de partes.

Lista de partes.					
COMPANÍA: CAO.			PREPARADO POR HEEY		
PRODUCTO: MONTURA PARALENTE TIPO SEL			FECHA: 02/07/14		
NOMBRE DE PARTE	MATERIAL	DIMENSIONES	PESO	MAQUINAS UTILIZADAS	TIEMPO DE MANUFACTURA APROX.
BOQUILLA CÓNICA	TEFLÓN	44X44X17	4.15 grs.	torno CNC y cabezal divisor	40 min.
SINTONIZADOR	ALUMINIO 6066	50X50X18	14.52 grs	torno paralelo	25 min.
EJE	ALUMINIO 6066	50X50X25	68.85 grs.	torno paralelo	35min.
TAPA DEL EJE	ALUMINIO 6066	50X50X15	26.45 grs.	torno paralelo	35min.

Diagrama de flujo de procesos
 Tipo de fabricación 2014ABC Montura para SEL
 Parte 2014 ABC Diagrama no SK00001

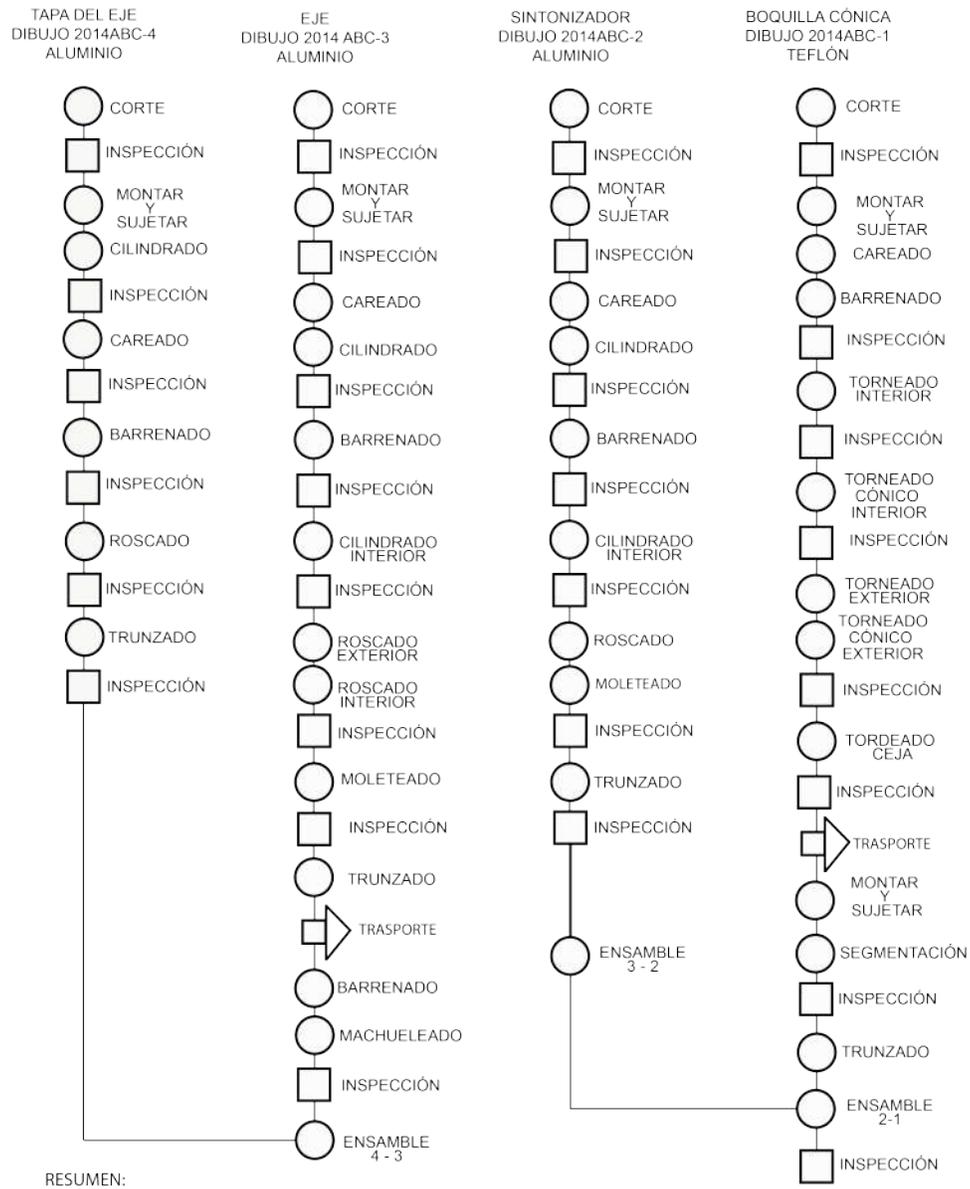


Figura 3.56: Diagrama de procesos montura

Diagrama de ensamble de una Montura para SEL Parte 2014 ABC

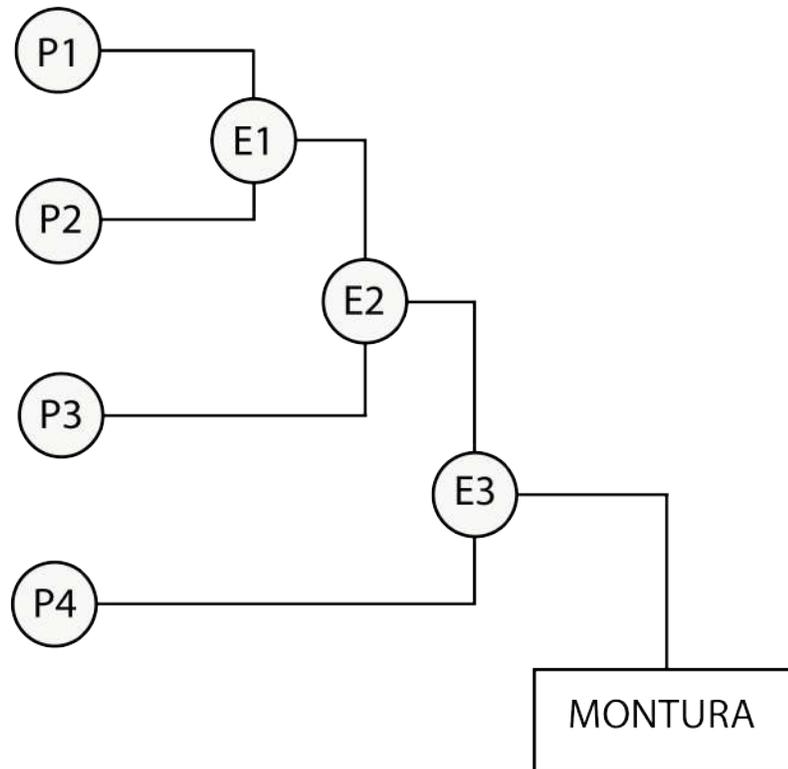


Figura 3.57: Diagrama de ensamble de montura para SEL

3.5. MANUFACTURA DE UNA MONTURA PARA LENTE PDMS

La manufactura de la montura figura 3.58 para la lente PDMS, con base en la propuesta numero 4, que es la que se va a construir, según lo arrojado por los análisis de esfuerzos realizados en la sección Diseño a detalle, fue configurada en función a la capacidad de las maquinas instaladas en el laboratorio de manufactura y taller de metales de esta universidad, en la cual se manufacturará dicho prototipo, también se consideraron las especificaciones de diseño obtenidas para satisfacer las condiciones de uso, de la misma forma que los dispositivos de sujeción y herramientas de corte disponibles en el mercado local; considerando además instrumentos de medición y calibres dimensionales de fácil empleo que garanticen la calidad del producto.

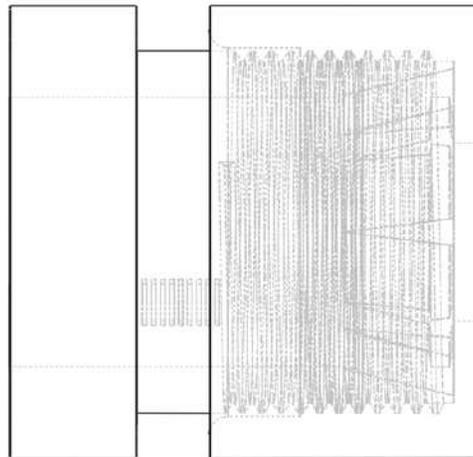


Figura 3.58: Montura de aluminio

Una vez determinadas las máquinas y herramientas con las cuales se realizará el proceso de manufactura, se encontraron problemas dentro de las estrategias de maquinado en el HSM-works, por lo que se realizó una propuesta que estuviera basada en el anterior y cumpliera con los requisitos, antes propuestos.

A partir de todo lo anterior el proceso de manufactura de la montura se realiza de la siguiente forma, presentando como un auxiliar para la selección de éste, dado que un proceso de fabricación es la operación mediante la cual un material o producto se convierte en un artículo nuevo y diferente.

De lo anterior la selección de la maquinaria y herramienta queda como se puede observar en la tabla 3.38.

Tabla 3.38: Tabla de maquinaria y herramienta.

Maquinas	Herramientas
Cierra cinta.	Buriles.
Torno paralelo.	Plaquetas de tungsteno.
Torno CNC.	Brocas con punta cónica.
Cabezal divisor.	Machuelo.
Fresadora vertical semiautomática.	Lijas.
Tronzadora.	Aceite refrigerante

Dentro del proceso de manufactura y con base en la hoja de ruta, los procesos se describen a continuación, para cada una de las piezas; la materia prima principal es el un redondo de

aluminio de 2" de diámetro, que se corta con la cierra cinta, para hacer la primer pieza, esta es la tapa de la montura, dentro del torno, se realiza un barreno pasante con una broca de punta cónica de 3/4", para posteriormente atravesar a este con una de 1", posteriormente se rosca interiormente, se carea y se hace un chaflan en cada uno de los extremos, se moletea y por último se corta la pieza con una trunzadora, algunos de los pasos mencionados anteriormente se puede observar en la figura 3.59.



Figura 3.59: Manufactura de la tapa de la montura para lente PDMS

Diagrama de ensamble de una Montura para SEL
Parte 2014 ABC PIEZA A PIEZA

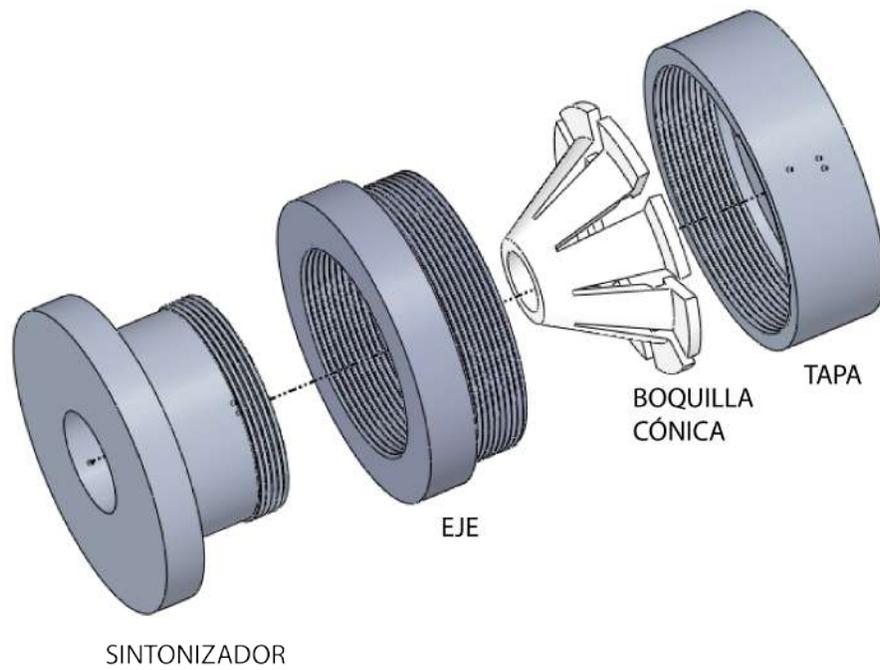


Figura 3.60: Diagrama de ensamble pieza a pieza de la montura para SEL

Capítulo 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una vez terminadas las piezas y ensambladas, se realizaron pruebas de funcionamiento mecánico, óptico y de interacción con el usuario, estas servirán para evaluar el correcto funcionamiento de la montura. Por otro lado, dentro de la parte mecánica, se corroboró, que este dispositivo funciona como se había esperado en un principio, sin embargo, el diseño precisa de una modificación más, a fin de que sea más fácil de manipular por el usuario, con base en lo anterior, la montura queda como se observa en la figura 4.1, agregando una pieza más, sin alterar el peso de la montura.



Figura 4.1: Piezas de la montura.

En las figuras 4.1 y 4.2 se puede observar, la montura final así como las piezas que la conforman, el material utilizado es aluminio 6066, electo debido a sus propiedades mecánicas las cuales con antelación se consultaron en[11].



Figura 4.2: Rediseño de la montura.

La modificación expresada tuvo origen dentro de la implementación en el laboratorio de física, al ser manipulada, se pudo observar que funciona a la perfección, tal como se había solicitado por el Cuerpo Académico de Óptica, ellos solo requerían de la compresión de la lente por medio de la montura, al ver la deformación que esta presenta, solicitaron se hiciera una nueva adecuación la cual consiste en regresar a la lente a su relación geométrica original (es decir que nuevamente quede sin deformación).

Por lo anterior, se realizó la siguiente modificación (una ceja extra al cono y una tapa para la retención del cono) a la montura final, como se puede observar en la figura 4.3, esta nueva montura permite regresar a la lente a su punto inicial, permitiendo una perfecta manipulación de ésta.

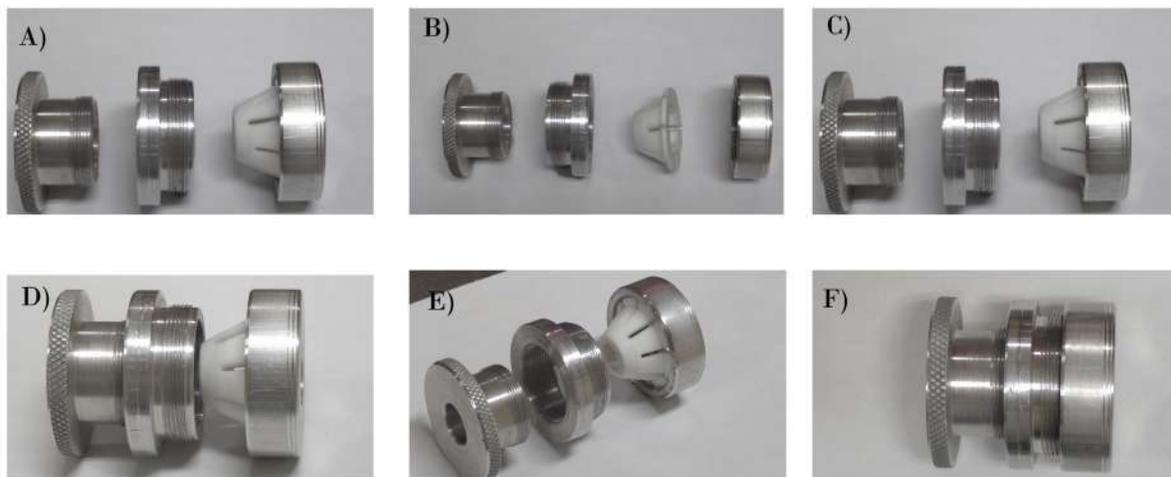


Figura 4.3: Rediseño de la montura.

Prueba de longitud focal

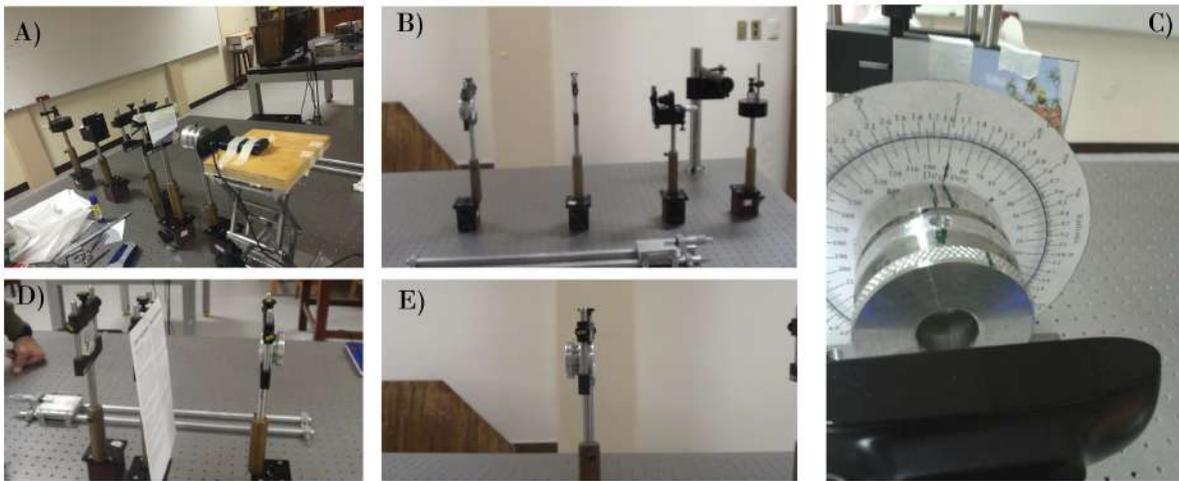


Figura 4.4: Prueba de longitud focal.



Figura 4.5: Prueba de deformación de imagen 7-1-n grados.

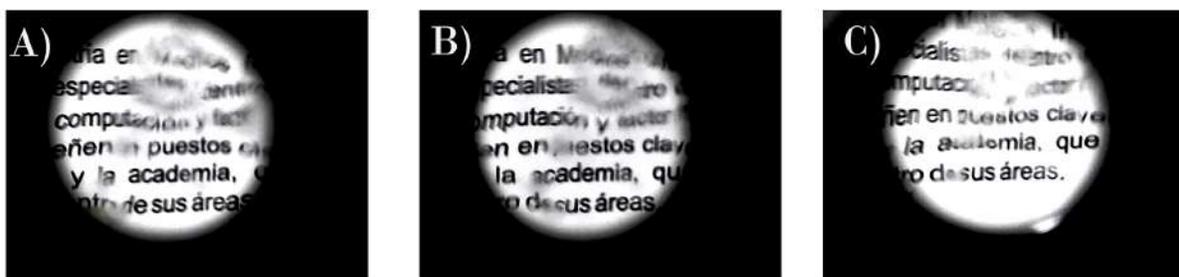


Figura 4.6: Prueba de deformación de imagen con letras 18-4-n grados.

Cambio de foco con la presión.

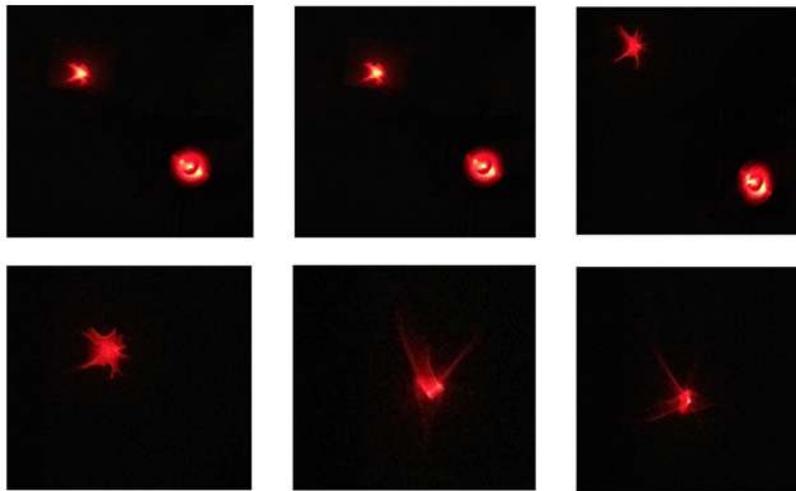


Figura 4.7: Imagen de la deformación del haz de luz producido por la manipulación y deformación de un lente sometido a compresión.

Cambio de imagen con la presión.

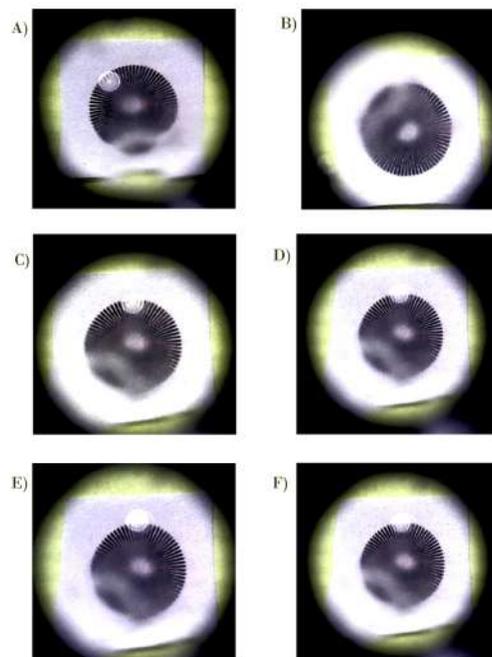


Figura 4.8: Imagen de la lente sometida a la presión.

Dado que la deformación de la lente se pretende caracterizar, el comportamiento óptico que esta tiene al manipular la montura, se realizaron en el laboratorio dos pruebas, una que nos permita ver como cambia la longitud focal y la otra de como cambia la imagen cuando la lente se comprime, para que por medio del análisis y el diagrama de manchas, se puedan observar bien el comportamiento de la lente dentro de la montura y de esta forma saber como funciona la montura y la lente.

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas dentro del laboratorio de física se hicieron con la ayuda del sistema opto-mecánico que existe e implementando un arreglo experimental para colimar un haz de luz láser. Primeramente se colocó la lente dentro de la montura y esta sobre un soporte, para poder realizar algunas pruebas para medir los cambios en su longitud focal de la lente debido a los cambios de presión, mediante el uso de un haz luminoso que es utilizado para pruebas de interferencia o difracción.

Lo anterior se llevó a cabo con ayuda de un sistema dual el cual permite hacer dos tipos de pruebas ópticas denominadas de Ronchi y Fizeau.

En la figura 4.9 se pueden observar dos vistas de la montura terminada, en esta se puede ver que el tamaño es reducido, bajo los lineamientos establecidos por el cliente, además presenta todas las adecuaciones que durante el proceso se realizaron llegando, a la conclusión de este, generando una montura que deforma un lente sólido elástico por compresión, permitiendo la manipulación a placer del usuario.



Figura 4.9: Montura final.

Al terminar el prototipo, no se contaba con las lentes para hacer pruebas ópticas en el laboratorio de física, debido a lo anterior y para que este trabajo se concluyera, se realizó un molde para generar la lente, el desarrollo se llevo a cabo gracias a la valiosa ayuda de la M.C. Brenda Lincona profesora adscrita al instituto de hidrlogía .

4.2. CONCLUSIONES

Con base en los requerimientos del cuerpo Académico de Óptica de la universidad Tecnológica de la Mixteca, a los objetivos plasmados en este documento, se ha llegado a lo que a continuación se en lista:

- Se realizó el diseño de para una montura que permitiera modificar la forma geométrica de una lente sólida elástica, por medio de compresión en sus bordes, de lo cual se hizo constar, no existe antecedente alguno, generando y concluyendo con el diseño de una montura única en su tipo.
- Se desarrolló y aplicó una metodología para la manufactura de la montura mecánica propuesta, así como el proceso que se requiere para la producción de ésta, empleando las máquinas y herramientas con las que se cuenta en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, en particular dentro del laboratorio de manufactura avanzada y el taller de metalmecánica (metales),obteniendo al final una montura fabricada, con base en los requerimientos establecidos al inicio de este documento.
- El análisis del sistemas mecánico realizado para el tipo de lentes flexibles y los requerimientos del Cuerpo académico de Óptica, tal como se presentó en el capítulo 2, sirvieron como antecedentes a los requerimientos de diseño, los cuales en este proyecto se han cumplido de la forma planteada y esperada, generando un producto de bajo costo y resistente.
- Se desarrollaron 4 propuestas de diseño y cada una de ellas se evaluó en función de las posibilidades del software CAE, del cual la licencia se cuenta en esta institución, de lo anterior fue por ello que se hizo uso del software de diseño Solid Works 2013 (licencia para la educación) y los módulos de análisis de elemento finito. Considerando para su construcción el diseño que arrojó la mejor evaluación a los requisitos del diseño.
- Para la planificación y selección de los procesos, se consideraron las herramientas de ingeniería concurrente, así como de planeación de procesos, dentro de los cuales se destaca el QFD el cual garantizó la elaboración de la montura de manera eficiente.

- Las pruebas funcionales de esta montura se llevaron a cabo dentro del laboratorio de física, mostrando que la montura cumple con las prestaciones mecánicas para lo cual fue diseñada, lo cual se puede ver mediante los diagramas de manchas y los textos mostrados en las figuras en la etapa de resultados.

Es importante hacer mención del fenómeno de estudio aplicado en este documento, para determinar las variables que el cliente no expresa de manera explícita. De esta forma es importante verificar los mecanismos que existen al rededor y apoyarse de ellos, y verificar que en realidad no se ha trabajado con nada parecido en el mercado y otros departamentos de investigación óptica, esto para no generar duplicidad y tener problemas de plagio de ideas, es por ello que a solicitud bien fundamentada de los revisores en particular del Dr. Mario Márquez Miranda , se realizó y corroboró que no existiera o si existía una montura no fuese igual.

Es de gran importancia plasmar en este documento la forma en la cual se cubrieron las necesidades del cliente, por ejemplo:

El cliente hacia la solicitud de una deformación uniforme, a este problema se le dio solución con la implementación de una boquilla, la cual permite que el lente se mantenga alineado a la montura y permite su deformación uniforme por medio de la compresión generada por el sintonizador de la montura.

Otro requerimiento fue el tipo de material y el peso, el mínimo número de componentes, para esto se hizo la elección de aluminio para tres de las piezas y teflón para la boquilla, el peso de la montura en conjunto no pasa de los 500 grs., la cantidad de elementos es de 4 y la facilidad de ensamble y uso, se vio resuelto como se pudo ver en este documento, por otro lado el costo de este prototipo no presento un excedente a los 1000 pesos, cantidad que no es ni la mitad del costo de los modelos comerciales que permiten la manipulación de este tipo de lentes.

La ayuda que se obtuvo de las herramientas basadas en la planificación de procesos e ingeniería concurrente, se justifica correctamente en este trabajo de tesis, así como la correcta selección del mejor diseño, aunado a esto el análisis de elemento finito y el DFMexpres, para corroborar que cada una de las partes estaba correctamente diseñada y tenían el funcionamiento deseado.

Con todo lo anterior se ha llegado a la reflexión, de que el trabajo multidisciplinario, es el que mejor funciona, dado que para llegar a la conclusión de este proyecto, existió asesoría de diferentes especialistas, que apoyaron con su conocimiento a encontrar una mejor solución a la justificación de cada uno de procesos y toma de decisiones plasmadas en este documento.

Bibliografía

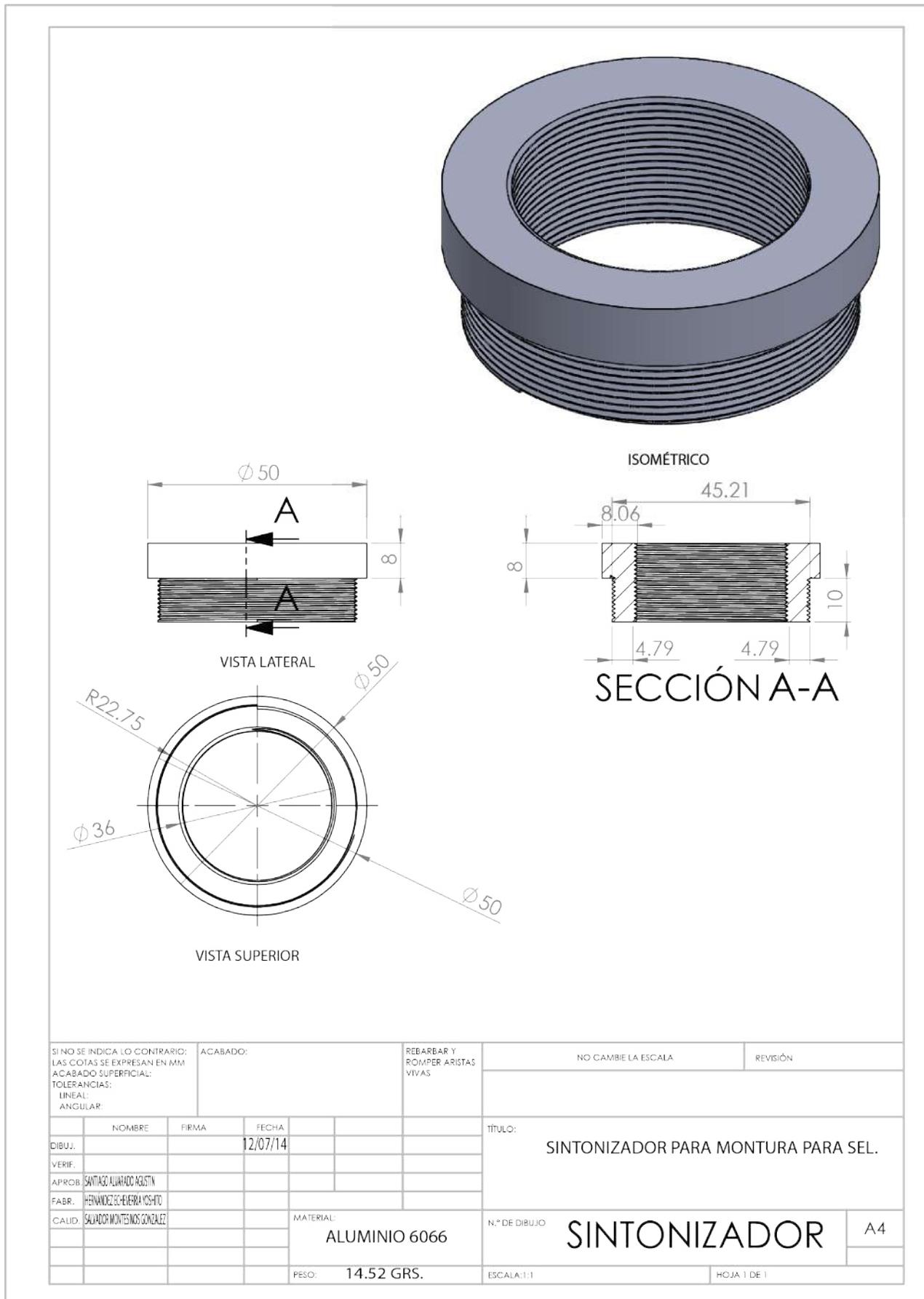
- [1] V. H. Castillejos Reyes. Análisis de ingeniería del sistema de sujeción de una lente sólida elástica a una montura mecánica. 2012.
- [2] F Schneider, C Müller, and U Wallrabe. A low cost adaptive silicone membrane lens. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 10(4):044002, 2008.
- [3] Stuart Pugh. *Total design: integrated methods for successful product engineering*. Addison-Wesley Publishing Company Workingham,, UK, 1991.
- [4] JF Algorri, V. Urruchi Del Pozo, J.M. Sánchez Pena, N. Bennis, and M. Geday. Array de microlentes de cristal líquido con control gradual de índice de refracción. *Optica pura y aplicada*, 45(2):71–78, 2012.
- [5] A. Santiago-Alvarado, S. Vázquez-Montiel, J. González-García, BIG Licona-Morán, JA Rayas-Álvarez, and G. Castro-González. Fabricación y caracterización de membranas elásticas de pdms para lentes líquidas con longitud focal variable (llfv). *membranes*, 16: 653–658, 2005.
- [6] P.M. Moran, S. Dharmatilleke, A.H. Khaw, K.W. Tan, M.L. Chan, and I. Rodriguez. Fluidic lenses with variable focal length. *Applied physics letters*, 88(4):041120–041120, 2006.
- [7] N. Chronis, G. Liu, K.H. Jeong, and L. Lee. Tunable liquid-filled microlens array integrated with microfluidic network. *Optics Express*, 11(19):2370–2378, 2003.
- [8] G.H. Feng and Y.C. Chou. Flexible meniscus/biconvex lens system with fluidic-controlled tunable-focus applications. *Applied optics*, 48(18):3284–3290, 2009.
- [9] Mark A Curtis. *Planeación de procesos*. Limusa, 1996.
- [10] A. Santiago-Alvarado. Lentes sintonizables y sus aplicaciones.
- [11] M.P. Groover. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Prentice hall, 1997.

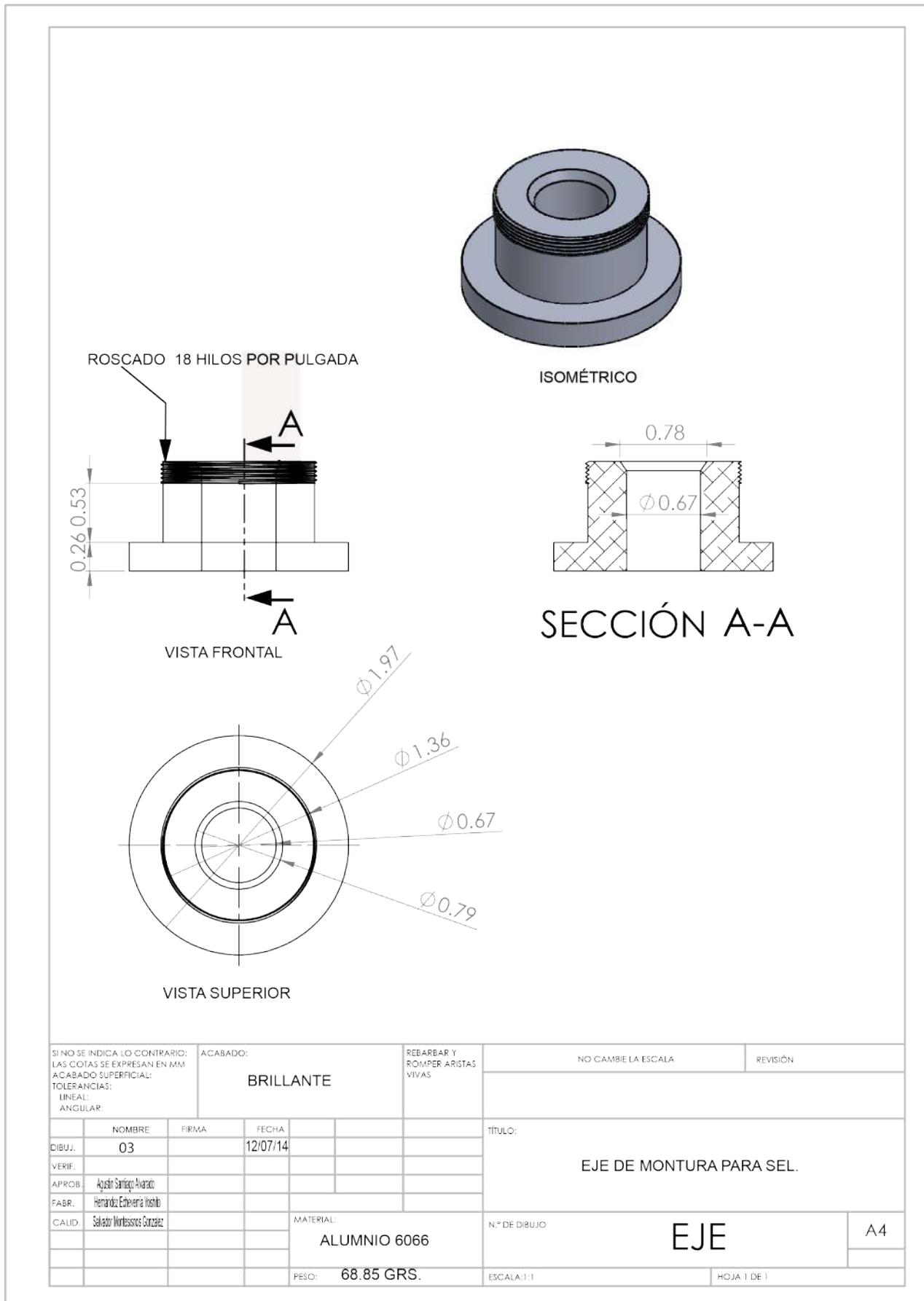
- [12] C. Pérez-Vives, L.B. Salmerón, S.G. Lázaro, D. Madrid-Costa, and T. Ferrer-Blasco. Nuevas tecnologías de óptica.
- [13] F. Murillo, G. Sierra, B. García, B. Martínez, JM Murillo, J. Valdez, and A. Córdova. Sistema de control de posición para la nueva montura del secundario del telescopio de 84cm. 2006.
- [14] A. Santiago-Alvarado, S. Vázquez-Montiel, F.S. Granados-Agustín, J. González-García, E. Rueda-Soriano, and M. Campos-García. Measurement of aberrations of a solid elastic lens using a point-diffraction interferometer. *Optical Engineering*, 49(12):123401–123401, 2010.
- [15] A. L. Moreno Rios. Obtención de mapas de esfuerzos de membranas elásticas mediante ingeniería asistida por computadora (cae). 2008.
- [16] Sergio Gómez González. El gran libro de solidworks. *Barcelona: Marcombo*, 2008.
- [17] A. Santiago-Alvarado, S. Vázquez-Montiel, J. Muñoz-Lopez, J. González-García, and G. Castro-González. Analysis and design of an optical spherometer with an adaptive lens. In *Optical Engineering+ Applications*, pages 666510–666510. International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [18] M. de la L. Palacios-Villavicencio V. M. Cruz-Martínez A. Santiago-Alvarado, F. Iturbide-Jiménez and J. Muñoz-Lopez. Opto-mechanical design of a binocular with tunable lens. 2008.
- [19] Eli Atad-Ettedgui and Dietrich Lemke. Advanced optical and mechanical technologies in telescopes and instrumentation. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 7018, 2008.
- [20] Paul R Yoder Jr. *Opto-mechanical systems design*. CRC press, 2005.
- [21] José Luis Álvarez García. El telescopio y el microscopio en la conformación experimental. *Ingenierías*, 9(31):7, 2006.
- [22] B. Berge and J. Peseux. Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting. *The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics*, 3(2):159–163, 2000.
- [23] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, et al. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, 2002.
- [24] F. Schneider, J. Draheim, J. Brunne, P. Waibel, and U. Wallrabe. Characterisation of adaptive fluidic silicone membrane lenses. 2009.

- [25] F. Schneider, J. Draheim, R. Kamberger, P. Waibel, and U. Wallrabe. Optical characterization of adaptive fluidic silicone-membrane lenses. *Optics express*, 17(14):11813–11821, 2009.
- [26] H. Ren, D. Fox, P.A. Anderson, B. Wu, and S.T. Wu. Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor. *Opt. Express*, 14(18):8031–8036, 2006.
- [27] F. Schneider, J. Draheim, C. Müller, and U. Wallrabe. Optimization of an adaptive pdms-membrane lens with an integrated actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 154(2):316–321, 2009.
- [28] Kunwoo Lee. *Principles of CAD/Cam/CAE Systems*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1999.
- [29] Jami J Shah. *Parametric and feature-based CAD/CAM: concepts, techniques, and applications*. Wiley. com, 1995.
- [30] A.E. para la Calidad. *QFD, Despliegue de la función calidad*. Aec.
- [31] Enrique Yacuzzi and Fernando Martín. *QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos*. CEMA, 2003.
- [32] MM Márquez, IR Ferreyro, and JAJ Mendoza. Selección de un sistema para vertebroplastia aplicando un proceso analítico jerarquizado. *Rev Mex Ing Biomed*, 26(1):44–51, 2005.
- [33] Dileep R Sule, Enrique Palos, and Virgilio González Pozo. *Instalaciones de manufactura: ubicación, planeación y diseño*. Thomson, 2001.
- [34] Salvador Capuz Rizo. *Introducción al proyecto de producción. Ingeniería concurrente para el diseño de producto*. Ed. Univ. Politéc. Valencia, 1999.
- [35] N. Singh. *Systems approach to computer-integrated design and manufacturing*. John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [36] James Riggs. Sistemas de producción. *Planeación Análisis y Control*. Limusa–Noriega Editores. México, 2001.
- [37] K Hodson William. Maynard, manual del ingeniero industrial. *Tomo II. Cuarta edición*. Edit. Mac Graw Hill, México, 2001.
- [38] Lawrence E Doyle, Carl A Keyser, J Leach, et al. *Procesos y materiales de manufactura para ingenieros*. Prentice-Hall Hispanoamericana, 1988.

-
- [39] John Terninko. *Step-by-step QFD: customer-driven product design*. CRC, 1997.
- [40] Jean-Pierre Kruth. Material inccress manufacturing by rapid prototyping techniques. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 40(2):603–614, 1991.
- [41] David M Miller, Joseph William Schmidt, RJ Craig, TJ Greene, and DL Kimbler. *Ingeniería industrial e investigación de operaciones*. Limusa, 1992.
- [42] Edward V Krick and Francisco Paniagua. *Introducción a la Ingeniería y al Diseño en la Ingeniería*. Limusa, 1978.
- [43] Thomas L Saaty. Decision making for leaders. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, (3):450–452, 1985.
- [44] Thomas L Saaty. *What is the analytic hierarchy process?* Springer, 1988.
- [45] FJ Dodd, HA Donegan, and TBM McMaster. A statistical approach to consistency in ahp. *Mathematical and computer modelling*, 18(6):19–22, 1993.

Apéndices





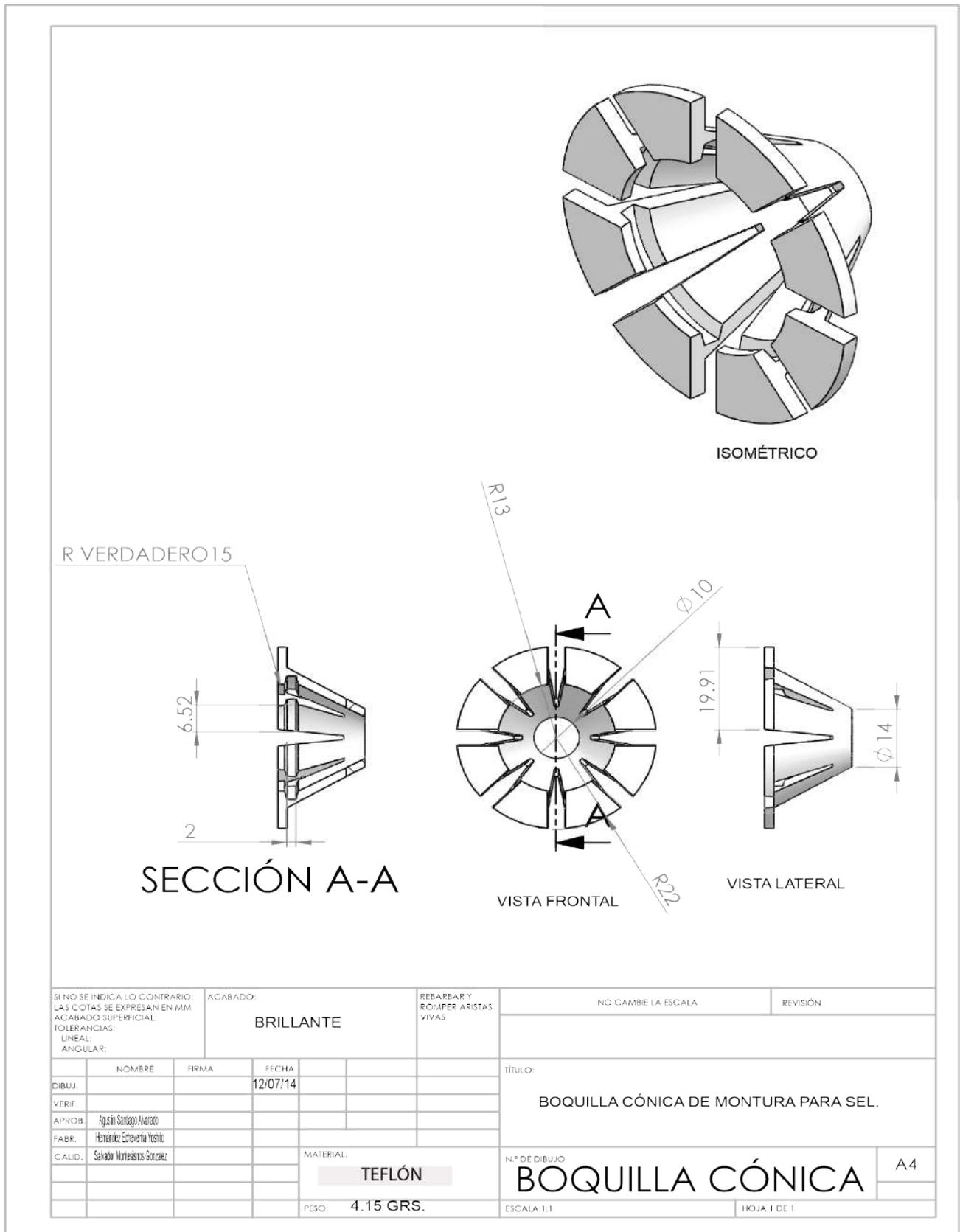


Figura 4.12: Boquilla para montura SEL.

