

**Universidad Tecnológica de la Mixteca.**

**“Diseño y construcción de un modelo opto-mecánico del ojo humano utilizando una lente adaptativa”**

Tesis para obtener el Título de:

**Ingeniero en Diseño.**

Presenta:

**Rubén Arriaga Martínez.**

Directores de Tesis:

**Dr. Agustín Santiago Alvarado.**

**M. C. Víctor Manuel Cruz Martínez.**

Huajuapán de León, Oaxaca, Diciembre del 2008.

*A Salito, al Chispo,  
a la Bibis, a Sandrucha, a la Cuaya y a Nelo.*

## AGRADECIMIENTOS.

A mis padres: Rubén Arriaga González y Salome Martínez Cortazar. A ellos que me dieron la vida, que me cuidaron y que me quieren infinitamente. Gracias por su apoyo incondicional durante toda la vida, gracias por educarme y sobre todo gracias por saber antes que todos que me titularía.

A mis hermanas: Rubí Arriaga Martínez y Sandra Arriaga Martínez. Por su apoyo incondicional para la culminación de este trabajo, por creer en mí y en lo que hago. Les estaré agradecido de por vida.

A mis hermanos: Claudia Arriaga Martínez y Daniel Arriaga Martínez. Que en este momento son mi motor para seguir adelante y mostrarles que todo es posible con empeño y dedicación.

A mi hermanastra Agripina Soriano Galicia, gracias por estar siempre pendiente de nosotros, que nosotros siempre estaremos pendientes de ti.

A mis abuelos: Doña Braulia y Don Martín (q. e. p. d), y a mis tíos: Margarita y Carlos que siempre estuvieron al cuidado mío durante mi estancia en la UTM.

Un agradecimiento sumamente especial al Dr. Agustín Santiago Alvarado, por su confianza, por su apoyo, por la dedicación conmigo. Gracias por las dosis de optimismo para seguir adelante y por estar siempre pendiente del desarrollo de esta tesis. Gracias por su paciencia, gracias profe.

Al Profesor Víctor Manuel Cruz Martínez por su apoyo para la manufactura de las piezas y revisión de la tesis.

Al Dr. Jorge González García por su confianza y apoyo.

A la profesora Marla y al profesor Jasso por leer y corregir este documento.

A Brenda Licona por su ayuda para el vaciado de la lente.

A los técnicos y amigos de los talleres: Xavier, Don Palma, a Migue, a Pedro, a Noe, a Manuel y a Kali. Que sin su apoyo y conocimientos hubiera batallado mucho en el taller.

A mis amigos de la carrera: Eder, Fer, Gregorio (y a su familia), Teodoro, Tencha, Mary, Chole y a Isaac. Y a los que conocí durante el desarrollo de la tesis, en especial a Erika.

A mi tío el Ing. Mecánico Diego Martínez por sus recomendaciones, conocimientos y catálogos.

A Gustavo Rivera Morán por su apoyo y consejos de hermano mayor.

Gracias a todos ellos y a los que me faltaron.

## RESUMEN.

El presente trabajo forma parte del proyecto "Óptica adaptativa de sistemas refractores", aprobado por el CONACYT. La aportación de este trabajo al proyecto es el diseño, construcción y caracterización de una lente adaptativa, una lente capaz de cambiar sus parámetros geométricos (grosor, radios de curvatura, diámetro) con la finalidad de modificar su distancia focal. Esta lente se basa en el principio de funcionamiento del cristalino humano, el cual se deforma al aplicársele fuerzas radiales sobre sus bordes por los músculos ciliares, enfocando así los objetos que se encuentran a diferentes distancias. De las ventajas que se podrían obtener con el uso de este tipo de lentes es su implementación en instrumentos ópticos, ahorrando así la utilización de varias lentes para el enfoque de imágenes y haciendo más compactos los sistemas ópticos, además de su aplicación en el desarrollo de prótesis para solucionar problemas relacionados con la vista. Mediante la utilización de la lente adaptativa se presenta un modelo funcional, el cual consiste en simular el comportamiento del ojo humano haciendo uso de los elementos ópticos indispensables para imitar el procesamiento de imágenes: una lente rígida como córnea, un diafragma como iris, una lente adaptativa como cristalino y una cámara CCD como retina.

Cabe destacar que para el diseño de las monturas necesarias para situar los distintos elementos ópticos y la montura especialmente diseñada para ejercer las fuerzas radiales sobre los bordes de la lente adaptativa, se utilizó una metodología de diseño opto-mecánico. Y para la construcción de cada una de las piezas que integran el modelo se implementó la planeación de procesos que permitió elegir las máquinas-herramienta, las herramientas, las operaciones y secuencias ideales para la eficaz construcción de cada componente. También se realizaron análisis de elemento finito para la lente adaptativa y su montura, encontrando los límites mecánicos para su funcionamiento y verificando que cada pieza cumpliera con los requerimientos establecidos, lo que permitió hacer las modificaciones necesarias antes de haber pasado a la etapa constructiva.

# INDICE GENERAL.

<b>DEDICATORIA</b>	ii
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	lii
<b>RESUMEN</b>	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	vii
<b>LISTA DE TABLAS</b>	x
<b>LISTA DE ECUACIONES</b>	xi

## **PRELIMINARES.**

I INTRODUCCION.	1
II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	2
III JUSTIFICACION.	3
IV OBJETIVOS.	5
V METODOLOGIA.	5

## **CAPITULO 1 DEFINICION Y ELEMENTOS DEL PROBLEMA.**

1. 1 OPTICA GEOMETRICA.	9
1. 1. 1 NATURALEZA DE LA LUZ.	9
1. 1. 2 LEYES DE LA REFLEXION Y LA REFRACCION.	11
1. 1. 3 SISTEMA OPTICO.	12
1. 2 FUNCIONAMIENTO DEL OJO HUMANO.	16
1. 2. 1 LAS PARTES QUE LO INTEGRAN.	16
1. 2. 2 EL CRISTALINO Y EL PROCESO DE ACOMODACION.	20
1. 3 EL OJO HUMANO COMO UN SISTEMA OPTICO.	21
1. 3. 1 MODELO MATEMATICO.	21
1. 3. 2 ELEMENTOS DEL MODELO FUNCIONAL.	23

## **CAPITULO 2 RECOPIACION DE DATOS.**

2. 1 DISEÑO Y ENSAMBLE PARA SISTEMAS OPTICOS.	26
2. 1. 1 MONTURAS INDIVIDUALES.	26
2. 1. 2 MONTURAS PARA VARIAS LENTES.	29
2. 2 ANALISIS DE MECANISMOS.	34

2. 2. 1 ELEMENTOS DE MAQUINARIA.	35
2. 2. 2 MECANISMOS DE APLICACION DE FUERZAS RADIALES.	39
2. 3 MATERIALES.	44
2. 3. 1 METALES.	44
2. 3. 2 ELASTOMEROS.	46
2. 4 PROCESOS.	47
2. 4. 1 MAQUINAS-HERRAMIENTA.	48
2. 4. 2 CONFORMADO DE RESINAS.	54

### **CAPITULO 3 DISEÑO OPTO-MECANICO.**

3. 1 INTRODUCCION.	57
3. 2 MONTURA.	58
3. 2. 1 ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE LA MONTURA.	58
3. 2. 2 DISEÑOS PRELIMINARES DE LA MONTURA.	60
3. 2. 3 ANALISIS DE DISEÑO Y MODELOS VIRTUALES DE LAS PROPUESTAS.	63
3. 2. 4 MODELO EXPERIMENTAL DE LA MONTURA.	70
3. 3 LENTE ADAPTATIVA.	71
3. 3. 1 ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE LA LENTE FLEXIBLE.	72
3. 3. 2 DISEÑO PRELIMINAR DE LA LENTE FLEXIBLE.	72
3. 3. 3 ANALISIS DE DISEÑO Y MODELO VIRTUAL DE LA LENTE FLEXIBLE.	73
3. 3. 4 MODELO EXPERIMENTAL DE LA LENTE FLEXIBLE.	75
3. 4 CARCASA.	76
3. 4. 1 ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE LA CARCASA.	76
3. 4. 2 DISEÑO FINAL DEL MODELO.	78

### **CAPITULO 4 PLANEACION DE PROCESOS.**

4. 1 ANALISIS GEOMETRICO.	83
4. 2 PIEZA DE TRABAJO.	85
4. 3 OPERACIONES Y SECUENCIAS.	87
4. 4 SELECCION DE LA MAQUINA.	89
4. 5 SELECCION DE HERRAMIENTAS.	90
4. 6 DETERMINAR CONDICIONES DE MAQUINADO.	93

## **CAPITULO 5 CONSTRUCCION.**

5. 1 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL.	95
5. 2 CONSIDERACIONES INICIALES.	96
5. 3 MANUFACTURA DE LA MONTURA.	98
5. 4 VACIADO DE LA LENTE FLEXIBLE.	100
5. 5 MANUFACTURA DE LA CARCASA.	101
5. 5. 1 MAQUINADO MONTURAS PARA LENTE CORNEA Y DIAFRAGMA.	102
5. 5. 2 MAQUINADO COJINETE Y TORNILLO SINFIN.	103
5. 5. 3 MAQUINADO TAPAS Y ADAPTADOR CCD.	103
5. 6 ENSAMBLE.	105
5. 6. 1 SUB-ENSAMBLES.	105
3. 4. 2 ENSAMBLE FINAL.	106
5. 7 MODELO A PRESENTAR.	107

## **CAPITULO 6 ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO.**

6. 1 CARACTERIZACION DE LA LENTE.	109
6. 1. 1 ANALISIS DE LA CURVATURA INICIAL DE LA LENTE FLEXIBLE.	109
6. 6. 2 APLICACIÓN DE FUERZAS RADIALES A LOS BORDES DE LA LENTE.	112
6. 2 PRUEBAS DEL MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO.	114
6. 2. 1 CALCULO DE LOS RANGOS DE FUNCIONAMIENTO.	114
6. 2. 2 ENFOQUE DE UN OBJETO MEDIANTE LA APLICACION DE FUERZAS RADIALES.	116

<b>CONCLUSIONES GENERALES.</b>	119
--------------------------------	-----

<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	123
----------------------	-----

<b>GLOSARIO.</b>	125
------------------	-----

<b>APENDICE A. ANALISIS DE ELEMENTO FINITO (FEA).</b>	127
---	-----

<b>APENDICE B. COMBINACIONES DE ENFOQUE.</b>	137
--	-----

<b>APENDICE C. PLANOS CONSTRUCTIVOS.</b>	139
--	-----

# LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Esquema del ojo humano.	2
Figura 2. Contracción y relajación de los músculos ciliares.	3
Figura 3. Metodología híbrida basada en la de Bruno Munari.	6
Figura 4. Los trenes de onda se esparcen en todas direcciones y se superponen para formar una onda plana que avanza hacia abajo.	10
Figura 5. Un haz de ondas planas incidente en una distribución de moléculas que forman un trozo de vidrio o plástico transparente.	11
Figura 6. Refracción y reflexión utilizando un rayo de luz.	12
Figura 7. Una fuente puntual S emite ondas esféricas. Un cono de rayos penetra en un sistema óptico que invierte los frentes de onda, obligándolos a converger en el punto P.	13
Figura 8. Principales puntos de un rayo redireccionado por una interfaz esférica.	13
Figura 9. Principales puntos de un rayo redireccionado por dos superficies esféricas rodeadas por un medio.	14
Figura 10. Localización del foco de un medio refractor.	15
Figura 11. Trazado de algunos rayos clave a través de lentes positivas.	16
Figura 12. Trazado de algunos rayos clave a través de lentes negativas.	16
Figura 13. Anatomía del ojo humano.	17
Figura 14. Componentes refractantes del ojo.	18
Figura 15. Acomodación.	21
Figura 16. Ecuación de primer orden y relaciones entre los elementos propuestos para describir el funcionamiento del ojo humano.	22
Figura 17. Elementos del modelo del ojo humano.	23
Figura 18. Lente adaptativa, al aplicarle fuerzas perpendiculares al eje óptico los parámetros ópticos cambian.	24
Figura 19. Relación forma-material-proceso.	25
Figura 20. Disposición de elementos refractivos y reflejantes de algunos instrumentos ópticos.	26
Figura 21. Diversidad de monturas individuales.	27
Figura 22. Configuraciones de filo para el anillo roscado.	29
Figura 23. Diversidad de monturas para varias lentes.	30
Figura 24. Ensamblajes fijos.	32
Figura 25. Ensamblajes con elementos dinámicos.	34
Figura 26. Análisis del mandril universal.	40
Figura 27. Análisis del broquero.	41
Figura 28. Análisis de las boquillas de resorte.	41
Figura 29. Análisis de las boquillas Jacobs.	42
Figura 30. Análisis de diafragma óptico.	43
Figura 31. Análisis de montura óptica.	43
Figura 32. Familias de los materiales.	44
Figura 33. Métodos de manufactura.	48
Figura 34. División de las principales herramientas de corte con viruta para metal.	49
Figura 35. Algunos tipos de taladro.	49
Figura 36. Principales operaciones con el taladro.	50
Figura 37. Herramientas para operaciones del taladro.	50



Figura 38. Algunos tipos de torno.	51
Figura 39. Principales operaciones con el torno.	52
Figura 40. Herramientas para torneado.	52
Figura 41. Algunos tipos de fresadoras.	53
Figura 42. Operaciones de fresado.	53
Figura 43. Herramientas para fresado.	54
Figura 44. Procesos de conformado de termofijos epoxi.	55
Figura 45. Versión completa de la metodología de Yoder para diseño opto-mecánico.	58
Figura 46. Propuesta de espiral ranurada, los balines están sometidos a fuerzas cortantes.	60
Figura 47. Desarrollo de propuesta con espiral y mordazas.	61
Figura 48. Se proponen mordazas cilíndricas para hermeticidad y fácil fabricación.	61
Figura 49. Se proponen puntos de contacto para mover las palancas.	62
Figura 50. Transmisión de movimiento mediante engranes.	63
Figura 51. Se exageran las ranuras divisoras para lograr una mayor abertura y hermeticidad.	63
Figura 52. Modelo experimental de la montura modelada en Solidworks® para análisis de elemento finito.	70
Figura 53. Tensiones ejercidas sobre las mordazas por el giro del engrane recto.	71
Figura 54. Medidas restrictivas para la lente adaptativa.	72
Figura 55. Bocetaje de propuestas de lente tomando 2 mm de espesor para cada junta con las mordazas.	73
Figura 56. Comportamiento de la lente al aplicarle una fuerza F en cada uno de los extremos, para diferentes grosores: 4, 7.5 y 10.5 mm.	74
Figura 57. Desplazamientos totales en isométrico (a) y corte transversal (b).	74
Figura 58. Comportamiento en la unión de la lente con los ganchos de las mordazas al aplicarle fuerza radial.	75
Figura 59. Diseño de los moldes en Rhino®.	75
Figura 60. Disposición de elementos para el vaciado del elastómero.	76
Figura 61. Disposición de elementos que integran el modelo opto-mecánico.	77
Figura 62. Dimensionamiento y disposición de elementos que integran el modelo a construir.	78
Figura 63. Diseño final a construir del modelo opto-mecánico del ojo humano.	79
Figura 64. Explosivo en perspectiva del modelo a construir.	80
Figura 65. Isométrico del modelo opto-mecánico.	82
Figura 66. Piezas de trabajo en barras de aluminio de 2 plg de diámetro.	86
Figura 67. Piezas de trabajo en barras de aluminio de 4 plg de diámetro y en 3/4 de plg de diámetro en acero para el tornillo sinfín.	86
Figura 68. Piezas de trabajo en acrílico de 3/4 de plg (dimensión 209x117 mm).	87
Figura 69. Diagrama de flujo de la construcción del modelo opto-mecánico.	96
Figura 70. Preparación de códigos g para el maquinado de las piezas (a) 09, (b) 10(A-H), (c) 14, (d) 13, (e) 11, (f) 25 y 26.	97
Figura 71. Piezas de trabajo en 2 y 4 plg.	97
Figura 72. Prensas para sujeción de las piezas de trabajo en el taladro y fresadoras.	98
Figura 73. Utilización de un indicador de carátula para centrado y tinta azul	

para marcado.	98
Figura 74. Diagrama de flujo esquemático del maquinado de la montura para la lente flexible.	99
Figura 75. Diagrama de flujo para el vaciado de la lente.	101
Figura 76. Diagrama de flujo para el maquinado de las monturas para lente córnea y diafragma.	102
Figura 77. Diagrama de flujo para el maquinado del cojinete y tornillo sinfín.	103
Figura 78. Diagrama de flujo para el maquinado de los elementos complementarios de la carcasa.	104
Figura 79. Diagrama de flujo de sub-ensambles.	105
Figura 80. Diagrama de flujo de ensamble final.	106
Figura 81. Modelo opto-mecánico del ojo humano.	107
Figura 82. Modelo con las llaves allen para modificar sus parámetros ópticos, de 1/4 (a y b), 3/16 (c) y 1/8 (d) de plg.	108
Figura 83. Arreglo experimental montado para probar la lente elástica.	110
Figura 84. Montura montada sobre un poste.	110
Figura 85. Mancha de mínima confusión generada por la lente elástica.	111
Figura 86. Diagrama de mancha de la lente flexible generada con OSLO®.	111
Figura 87. Diagramas de mancha al girar el engrane. Nótese la forma de la mancha, debida a las tensiones generadas en los extremos.	112
Figura 88. Manchas de mínima confusión generadas al girar el engrane y mover el plano imagen.	113
Figura 89. Imágenes generadas por la lente elástica al ser usada como lupa.	113
Figura 90. Objetos a enfocar: reloj de manecillas y muñeco de plástico.	114
Figura 91. Disposición de elementos para encontrar los rangos máximos de funcionamiento.	115
Figura 92. Arreglos de enfoque: mínimas distancias (a) y máximas distancias (b).	116
Figura 93. Disposición del objeto de estudio, del modelo y una luz direccional para crear contraste sobre el objeto.	116
Figura 94. Muñeco de plástico a enfoque máximo.	117
Figura 95. Muñeco de plástico 25 mm atrás del enfoque máximo: engrane sin girar (a), a 8 (b), a 14 (c) y a 19 (d) dientes girados.	117

## LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Distintas configuraciones para montaje de lentes.	28
Tabla 2. Clasificación de los engranes.	35
Tabla 3. Distintos tipos de cojinetes.	37
Tabla 4. Algunos tipos de resorte.	38
Tabla 5. Propiedades de los metales.	45
Tabla 6. Características y propiedades del material Sylgard 184®.	46
Tabla 7. Diagrama de afinidad para identificar los requerimientos de la montura.	59
Tabla 8. Características técnicas de la propuesta 1.	64
Tabla 9. Características técnicas de la propuesta 2.	65
Tabla 10. Características técnicas de la propuesta 3.	65
Tabla 11. Características técnicas de la propuesta 4.	66

Tabla 12. Características técnicas de la propuesta 5.	66
Tabla 13. Características técnicas de la propuesta 6.	67
Tabla 14. Características técnicas de la propuesta 7.	67
Tabla 15. Símbolos utilizados en la matriz de calidad.	68
Tabla 16. Matriz de calidad para la elección de la propuesta a construir.	69
Tabla 17. Relación de piezas a comprar y maquinar.	82
Tabla 18. Análisis geométrico de piezas.	84
Tabla 19. Operaciones y secuencias que seguirán cada una de las piezas.	87
Tabla 20. Maquinaria seleccionada para la manufactura de las piezas.	89
Tabla 21. Herramientas a utilizar para las operaciones en cada pieza.	91
Tabla 22. Velocidades y avances para las brocas a utilizar.	93
Tabla 23. Velocidades en el torno para los distintos diámetros de piezas.	94
Tabla 24. Velocidades y avances para los cortadores verticales a utilizar.	94
Tabla 25. Distancias máximas y mínimas entre los distintos elementos ópticos.	115

## **LISTA DE ECUACIONES.**

(1) Ley de la reflexión.	11
(2) Ley de la refracción.	12
(3) Redireccionamiento de un rayo por medio de una interfaz esférica entre dos medios con diferente índice de refracción.	14
(4) Redireccionamiento de un rayo a través de dos superficies esféricas rodeadas por un medio.	14
(5) Foco de un medio refractor en función de los radios de curvatura.	15
(6) Foco de un medio refractor en función de la distancia a la fuente puntual.	15
(7) Ecuación a primer orden para describir el funcionamiento del ojo humano.	23
(8) Balanceo de la ecuación 7 para encontrar las distancias a las que se sitúan los elementos ópticos en función de sus parámetros ópticos.	77

# PRELIMINARES.

## I. INTRODUCCION.

El ojo es uno de los órganos más importantes del cuerpo humano y fundamental para el conocimiento de nuestra realidad. A través de él podemos ver formas, colores, texturas, además de poder calcular distancias y hacer enfoques de objetos en diferentes posiciones. Dada la complejidad de su estructura, naturaleza y funcionamiento este puede adaptarse a diferentes grados de iluminación, haciendo que podamos ver en lugares con poca luz. Para comprender cómo funciona el ojo humano, es necesario conocer el papel que desempeña cada una de sus partes, y el proceso que se desarrolla para la formación de las imágenes. El ojo puede ser considerado como un *sistema óptico*<sup>\*</sup>, que consta de la córnea, humor acuoso, cristalino, humor vítreo y la retina que es donde finalmente se forma la imagen (Fig. 1). La formación de la imagen no se puede considerar como un proceso simple, ni mucho menos estático, ya que se llevan a cabo distintos procesos para la obtención de una imagen nítida. Un ojo normal, enfocado al infinito (más allá de unos cinco metros) está en posición de relajamiento; aparte de la posible contracción del iris para regular la cantidad de luz, la otra parte dinámica del sistema óptico. Lógicamente, un ojo enfocado al infinito, si no varía algo de su sistema óptico, verá borroso a una distancia próxima, al igual que si enfocamos una cámara fotográfica a una distancia y fotografiamos a otra más cercana, la foto saldrá borrosa. La imagen del objeto formada es proyectada en la retina; que es donde se lleva a cabo la transformación en impulsos nerviosos que son transmitidos por medio del nervio óptico para que lleguen al cerebro. En el cerebro es donde se procesan esos impulsos y son transformados en lo que se conoce como imágenes; esto se realiza en un tiempo muy corto alrededor de 0.04 de segundo<sup>1</sup>.

---

<sup>\*</sup> Las palabras en cursiva tienen significado en el apartado de glosario.

<sup>1</sup> Hecht, Eugene. "Óptica". Ed. Addison Wesley Iberoamericana, 3era. Edición, Madrid (2000).

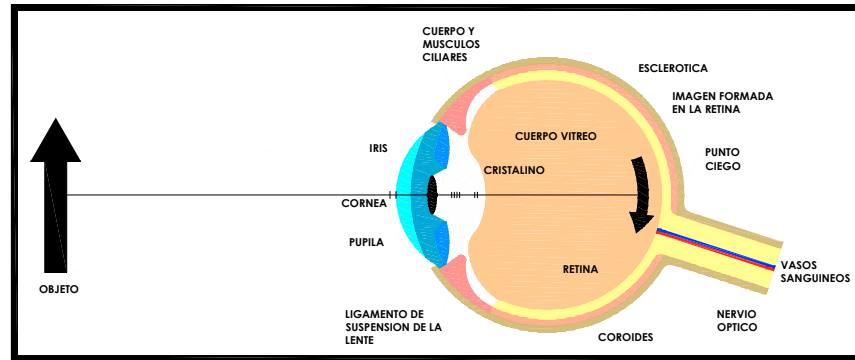


Figura 1. Esquema del ojo humano.

El ser humano ha intentado describir el funcionamiento del ojo desarrollando diversos modelos como los modelos esquemáticos de Helmholtz-Laurence, Gulstrand, Emsley Schwiegerling<sup>2</sup>, pero por diversas circunstancias son aceptados ampliamente por la comunidad científica (médicos, biólogos, físicos, etc.). Cada uno de los modelos aquí mencionados tiene sus propias ventajas y desventajas. Los modelos más simples son usados para fines didácticos y para cálculos simples de gafas correctoras, sin embargo sirven muy poco en términos de análisis de contribución específica de componentes individuales a la calidad de la imagen.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

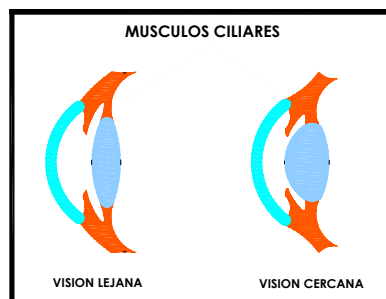
Actualmente no existe un modelo experimental del ojo humano que lo imite al 100%; lo más cercano que permita comprender cómo interactúan los elementos que lo integran. Uno de sus elementos, el cristalino es una lente deformable que se contrae o se expande según las necesidades de enfoque. Los modelos experimentales existentes no simulan el verdadero funcionamiento del cristalino, ya que emplean lentes rígidas que no describen el acomodamiento que se lleva a cabo dentro del ojo. Hay que tomar en cuenta que los modelos actuales describen el funcionamiento del ojo similar al funcionamiento de cámaras, microscopios y binoculares, donde se usan lentes corredizas para el enfoque y desenfoco de los objetos. Actualmente el estudio de la óptica *adaptativa* ha permitido el desarrollo de elementos refractores capaces de modificar sus parámetros ópticos adecuándose a las necesidades requeridas, entre los que destacan las lentes adaptativas. La principal ventaja del uso de este tipo de lentes es que pueden variar sus parámetros geométricos (radio de curvatura, *distancia focal*,

<sup>2</sup> Amar, Agarwal, "Presbicia – Texto Quirúrgico", Highlights of Ophthalmology International (2002).

grosor, etc.), tal y como se comporta el cristalino, para enfocar las imágenes en la retina.

### III. JUSTIFICACION.

El enfoque del ojo se lleva a cabo debido a que la lente cristalino cambia de forma; es decir, se “aplana” o “engruesa”: este proceso se llama acomodación. En un ojo normal no es necesaria la acomodación para ver objetos distantes, pues se enfocan en la retina cuando la lente está delgada gracias al ligamento suspensorio<sup>3</sup>. Para ver los objetos más cercanos, el músculo ciliar se contrae y por relajación del ligamento suspensorio, la lente se redondea de forma progresiva (Fig. 2). Un niño puede ver con claridad a una distancia tan corta como 6.3 cm. Al aumentar la edad del individuo, la lente cristalina se va endureciendo poco a poco y la visión cercana disminuye hasta unos límites de unos 15 cm a los 30 años, y más allá de los 70 años de vida, la mayoría de los seres humanos pierden la capacidad de enfocar objetos situados a corta distancia.



**Figura 2.** Contracción y relajación de los músculos ciliares.

Dado que en la actualidad no existe un modelo que permita explicar el funcionamiento óptico del ojo satisfactoriamente, se propuso en este trabajo (utilizando elementos ópticos adaptativos), analizar, diseñar y construir un modelo experimental del cristalino humano. El uso de una lente con longitud focal variable para simular el comportamiento del cristalino, permitió establecer un modelo del ojo humano que se adaptara mejor a su comportamiento real, debido a que generalmente se ha utilizado una lente rígida, la cual se desplaza para realizar el

<sup>3</sup> Item 1.

enfoque en la retina. En otras propuestas, para su análisis se diseñan ojos para diferentes posiciones<sup>4</sup>.

Describiendo el funcionamiento óptico del ojo humano y simulando el comportamiento del cristalino, en un futuro se proponen soluciones a los problemas de visión relacionados con el cristalino. Como son las *cataratas* y la *presbicia*, problemas en los cuales, se tienen que llevar a cabo diferentes tipos de cirugías: extirpación total o parcial del cristalino, o la inserción de lentes artificiales. Se han desarrollado grandes adelantos tecnológicos que permiten sustituir las funciones que ejerce el cristalino pero hasta el momento, todos tienen sus limitantes. Por citar algunas: la cirugía de catarata sin anestesia con la técnica Karate Chop<sup>5</sup> que consiste en la remoción de cataratas y cristalino completos, sustituyendo con una lente artificial rígida que en algunos casos, un ojo es utilizado para enfocar a larga distancia y otro es utilizado para enfocar a corta distancia; la lente intraocular Phakonit ThinOptx enrollable y el lente intraocular acomodativo<sup>5</sup>, los cuales son sustitutos del cristalino pero sólo son buenos enfocando a intermedia y corta distancia, mas no a larga distancia; el lente intraocular de silicona C&C Vision Crystalens Modelo AT-45<sup>4</sup> y la lente intraocular acomodativo humanoptics 1CU<sup>5</sup>, que no permiten una acomodación continua sino pausada.

En este trabajo se desarrolló un modelo mecánico utilizando elementos ópticos adaptativos como lente cristalino y una lente convergente rígida como córnea. También se caracterizó y describió el funcionamiento óptico del sistema, así como su diseño y construcción. El modelo mecánico, simula la bóveda ocular que contiene los elementos ópticos. Es importante mencionar que se requirió que los elementos del modelo se pudieran acoplar perfectamente para que la imagen se formara siempre en el mismo plano. Como meta se usó una lente con longitud focal variable para simular el comportamiento del cristalino y el análisis de *aberraciones* se deja para un trabajo futuro.

---

<sup>4</sup> A. Santiago-Alvarado, R. Arriaga-Martínez, S. Vázquez-Montiel, J. González-García, V. M. Cruz-Martínez, F. Iturbide-Jiménez, A. Alcalá-Vallejo and B. I. G. Licona-Moran, "Opto-mechanical design of human eye models using lenses with variable focal length", Sociedad Mexicana de Instrumentación SOMI, XXI Congreso de Instrumentación 1-5 (2006). ISBN: 970-32-2673-6.

<sup>5</sup> Ítem 2.

El presente trabajo forma parte del proyecto (SEP-2004-C01-46080/A1) aprobado por CONACyT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) en el año 2004 llamado "Óptica adaptativa de sistemas refractores".

## **IV. OBJETIVOS.**

### **OBJETIVO GENERAL.**

Realizar el diseño y construcción de un modelo opto-mecánico del ojo humano, que permita comprender y simular su funcionamiento utilizando elementos ópticos adaptativos.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- Diseño de propuestas y modelos mecánicos (bóveda y lente adaptativa).
- Análisis de propuestas.
- Elaboración de planos.
- Construcción del modelo del ojo humano.
- Descripción del sistema óptico.

## **V. METODOLOGIA.**

Dada la naturaleza del proyecto fue necesaria una metodología sistematizada y ordenada que de manera lineal permitiera realizar cada uno de los objetivos establecidos. La metodología proyectual de Bruno Munari<sup>6</sup> está diseñada de tal forma que debe cumplirse una etapa antes de pasar a la siguiente, ó dependiendo de la complejidad del cumplimiento de cada uno de los pasos y los requerimientos específicos para el desarrollo del proyecto poder retroceder un paso para verificar los resultados. Esta metodología es ampliamente utilizada en el diseño industrial. La metodología cuenta con trece pasos principales, pero para el desarrollo del proyecto solo se eligieron los de interés debido a la aplicación directa que se les dio. En la figura 3 se presentan los pasos considerados:

---

<sup>6</sup> Munari, Bruno. "Cómo nacen los objetos". Ed. Gustavo Gili. 8ava. Edición. Barcelona (2000).





**Figura 3.** Metodología híbrida basada en la de Bruno Munari.

### **DEFINICION Y ELEMENTOS DEL PROBLEMA.**

En este paso fue necesario delimitar el problema, dado que el proyecto se redujo al diseño y construcción de un modelo del ojo humano que permitiera comprender su funcionamiento integral, por ende también se realizó el análisis de las partes que lo conforman y el desempeño, función que cumple cada una de dichas partes. Esta delimitación se encuentra definida en el capítulo 1 en donde se desarrolló el análisis del ojo humano como un sistema óptico y se designaron los elementos que se necesitaron para la realización del modelo mecánico integral.

Fue necesario reconocer los sub-problemas relacionados con el diseño y construcción del modelo. Primero se tomaron en cuenta los elementos del ojo y cuáles son sus comportamientos ópticos y mecánicos de cada uno de ellos. El haber distinguido cada uno de estos elementos permitió encontrar soluciones que ahorraron tiempo al momento de realizar las propuestas, porque en esta etapa fue donde se identificaron los primeros requerimientos de diseño.

### **RECOPIACION Y ANALISIS DE DATOS.**

Una investigación bibliográfica permitió comprender la amplitud del proyecto y sus alcances. Dicha investigación se llevó a cabo en libros especializados, revistas de divulgación científica y en la web. Como en el proyecto se presenta un prototipo de diseño opto-mecánico fue necesario recurrir a libros, tesis y catálogos especializados en diversas áreas que integran el diseño y construcción de las partes que conforman el modelo. Se recurrió principalmente a libros de ingeniería en donde se pudo estudiar cuál era la mejor solución para el diseño del modelo opto-mecánico.

Una vez hecha la investigación fue necesario realizar el análisis de la información recopilada que permitiera una elección adecuada de diseño y la correcta construcción del modelo propuesto. Mediante la identificación y análisis de mecanismos con requerimientos funcionales similares a los elementos que integran el ojo humano, se pudieron idear mecanismos propios que sirven específicamente para el modelo propuesto, así como también el conocer materiales y procesos de conformado de los mismos ayudó a seleccionar la mejor ruta de trabajo para la construcción del modelo.

### **CREATIVIDAD: DISEÑO OPTO-MECANICO.**

Este paso fue importante ya que permitió realizar las primeras propuestas y bocetos para su posterior análisis y selección. Para llevar a cabo el bocetaje fue necesario basarse en una submetodología que permitiera designar especificaciones constructivas, requerimientos y restricciones para un correcto diseño y disposición de elementos. Por ello se escogió una metodología que integrara las fases características en la diversidad de metodologías de diseño opto-mecánico. Esta submetodología fue anexada debido a que el diseño opto-mecánico<sup>7</sup> es un complejo proceso integral que involucra a un gran número de disciplinas.

Las propuestas de diseño se hicieron mediante bocetaje a mano alzada, lo que permitió explorar las diferentes formas o funciones que se tomaron en cuenta para los requerimientos, posteriormente se estacionaron en la realidad mediante la utilización de softwares (AutoCAD®, Rhino®, 3D Max®, Solidworks®) que permitieron una visualización más detallada de los componentes que integran el modelo.

### **DIBUJOS CONSTRUCTIVOS: LA PLANEACION DE PROCESOS.**

Contemplando los pasos anteriores, en esta etapa se realizaron los planos técnicos. Los planos se hicieron en programas de 2D y 3D, lo que se transmitió en una ventaja para la comprensión del funcionamiento de cada una de las partes. Se realizaron vistas, cortes, isométricos, perspectivas, explosivos y detalles constructivos. Aunado a esto también se desarrollaron *renders* que permitieron comprender como es el modelo hasta al final de su construcción, y si este cumplió con parámetros estéticos también.

---

<sup>7</sup> Yoder, Paul R. "Opto-mechanical systems design", Marcel Dekker, Inc. Second Edition, New York (1993).

Para esta fase, como apoyo se utilizó la planeación de procesos como un método para poder desarrollar previamente como sería todo el proceso constructivo dentro del taller. Toda la información analizada y proporcionada por la planeación de procesos estuvo fundamentada y apoyada por el estudio de materiales y procesos efectuados en la etapa de recopilación de datos. La información provista por esta planeación se anexó como parte de los planos constructivos que se encuentran situados dentro de la sección de apéndices.

### **CONSTRUCCION.**

El ensamble del modelo se desarrolló enteramente dentro de la UTM (Universidad Tecnológica de la Mixteca), utilizando los componentes contruidos con maquinaria de la universidad y aquellas piezas solicitadas por otros medios. En esta fase se llevó a cabo la integración de todas las piezas analizadas en las etapas anteriores. Cabe resaltar que a lo largo de la metodología se utilizaron y aplicaron los conocimientos obtenidos a lo largo de la carrera de Ingeniería en Diseño, conocimientos tanto teóricos como prácticos obtenidos por experiencia en los talleres y en proyectos elaborados con fines académicos.

### **ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO.**

Al haber terminado de construir el modelo se hizo un análisis de funcionamiento que permitió conocer resultados a los que se llegaron. Este análisis se realizó con la finalidad de llegar a conclusiones que permitieron saber si se logró cumplir con los objetivos establecidos y cuales fueron los logros inherentes obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

# 1

# DEFINICION Y ELEMENTOS DEL PROBLEMA.

En este capítulo son definidos los elementos necesarios para desarrollar el modelo opto-mecánico que se eligieron para simular el funcionamiento del ojo humano. Para ello se parte de un análisis del ojo humano en el cual se describe su funcionamiento y el papel que desempeña cada una de sus partes. Pero para comprender su funcionamiento es indispensable conocer los principios físicos y matemáticos que describen el comportamiento de la luz. Por lo que, en este capítulo se inicia con la óptica geométrica: una rama de la óptica que estudia los principios ópticos por medio de los cuales se describe el funcionamiento de los sistemas ópticos utilizados para el procesamiento de imágenes.

## 1. 1 OPTICA GEOMETRICA.

La óptica geométrica estudia el comportamiento de la luz al reflejarse o refractarse en objetos de un tamaño mucho mayor que la *longitud de onda* de la luz. La óptica geométrica está gobernada por dos leyes generales muy simples: la Ley de Reflexión de la Luz y la Ley de Refracción de la Luz, aplicadas al diseño de lentes e instrumentos ópticos. Antes de su descripción se describe previamente la naturaleza de la luz.

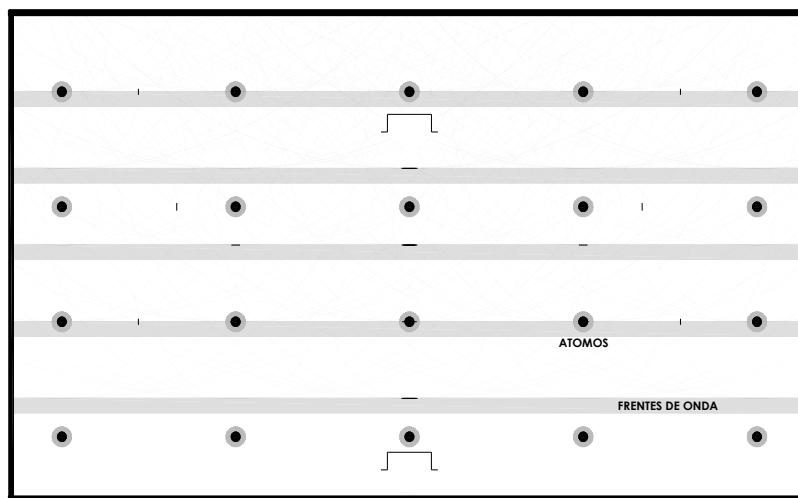
### 1. 1. 1 NATURALEZA DE LA LUZ.

De acuerdo a la naturaleza electromagnética, se considera a la luz como una onda o un paquete de energía que se mueve ondulatoriamente. Hay una gama de situaciones en las que el equipo de detección es tal, que es imposible distinguir las interacciones electromagnéticas y el transporte de energía en términos de *fotones* individuales<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Item 1.

Como se ha mencionado, si la longitud de onda de la luz es pequeña en comparación con el tamaño del equipo de detección, es posible utilizar, como primera aproximación, las técnicas de la óptica geométrica. Un tratamiento más preciso, que es aplicable también cuando las dimensiones del equipo de detección son pequeñas, es el de la óptica física en la que la propiedad dominante de la luz es su naturaleza ondulatoria. El principio de *Huygens* afirma que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden. Con ello puede definirse un nuevo frente de onda que envuelve las ondas secundarias (Fig. 4). Como la luz avanza en ángulo recto a este frente de onda, el principio de Huygens puede emplearse para deducir los cambios de dirección de la luz<sup>9</sup>.

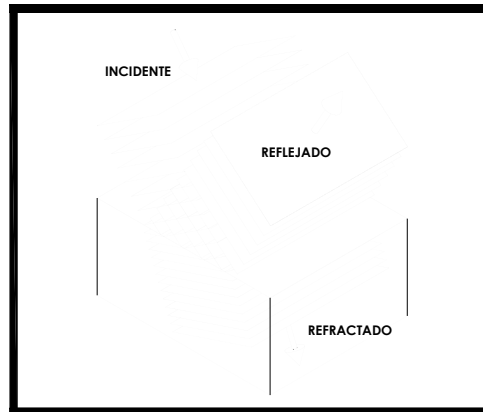


**Figura 4.** Los trenes de onda se esparcen en todas direcciones y se superponen para formar una onda plana que avanza hacia abajo.

Cuando las ondas secundarias llegan a otro medio u objeto, cada punto del límite entre los medios se convierte en una fuente de dos conjuntos de ondas. El conjunto reflejado vuelve al primer medio, y el conjunto refractado entra en el segundo medio (Fig. 5). El comportamiento de los rayos reflejados y refractados puede explicarse por el principio de Huygens. Es más sencillo, y a veces suficiente, representar la propagación de la luz mediante rayos en vez de ondas. El rayo es la línea imaginaria que representa la dirección de propagación de la luz, de la energía radiante y, por tanto, perpendicular al frente de onda. En la óptica geométrica se prescinde de la teoría

<sup>9</sup> Item 1.

ondulatoria de la luz y se supone que la luz no se difracta ya que se supone que las aberturas de detección son mucho mayores que la longitud de onda de la luz<sup>10</sup>. La trayectoria de los rayos a través de un sistema óptico se determina aplicando las leyes de reflexión y refracción, que son descritas enseguida.



**Figura 5.** Un haz de ondas planas incidente en una distribución de moléculas que forman un trozo de vidrio o plástico transparente.

## 1. 1. 2 LEYES DE LA REFLEXION Y LA REFRACCION.

### LEY DE LA REFLEXION.

Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, parte de la luz es reflejada. El plano de incidencia se define como el plano formado por el rayo incidente y la normal (es decir, la línea perpendicular a la superficie del medio) en el punto de incidencia. El ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la normal (Fig. 6).

La ley de la reflexión indica que:

El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

$$\theta_i = \theta_r \quad (1)$$

El rayo incidente, la perpendicular a la superficie y el rayo reflejado se encuentran todos en un mismo plano denominado plano de incidencia<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Smith, Warren J. "Image Formation: Geometrical and Physical Optics", in W. Driscoll (ed.), Handbook of Optics, New York (1978).

<sup>11</sup> Item 10.

## LEY DE REFRACCION.

Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro éste sufre una desviación que está descrita por la ley de la refracción que dice que el seno del ángulo de incidencia multiplicado por el *índice de refracción* ( $n$ ) del medio es igual al seno del ángulo transmitido por el índice de refracción del segundo medio. Por otra parte, el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia están en un mismo plano<sup>12</sup> (Fig. 6).

La ley de la refracción indica que:

$$n_i \text{sen } \theta_i = n_t \text{sen } \theta_t, \quad (2)$$

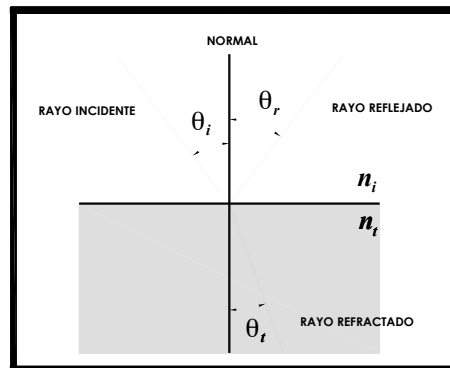


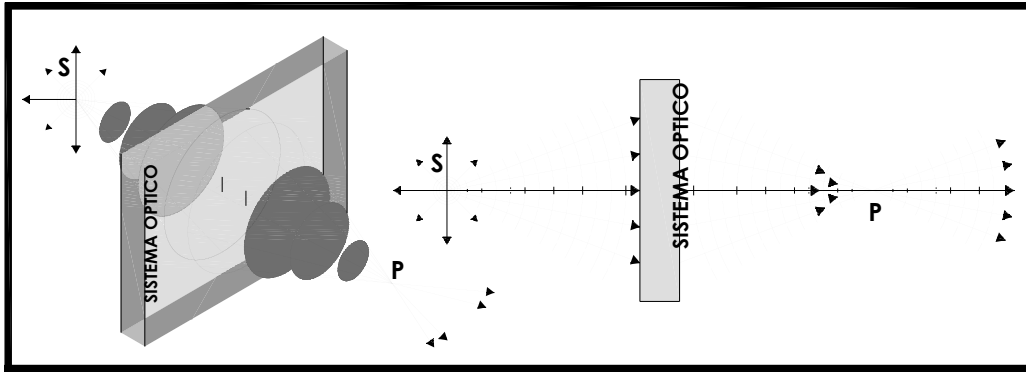
Figura 6. Refracción y reflexión utilizando un rayo de luz.

### 1. 1. 3 SISTEMA OPTICO.

La función de un sistema óptico es recoger y remodelar una parte del frente de onda incidente (Fig. 7), a menudo con la intención esencial de formar una imagen de un objeto. El grado de perfección alcanzable en la formación real de imágenes de un sistema óptico estará limitado por la *difracción*. A medida que la longitud de onda de la energía radiante ( $\lambda_0$ ) disminuye en comparación con las dimensiones físicas del sistema óptico, los efectos de la difracción cobran menos importancia. En el límite conceptual cuando  $\lambda_0 \rightarrow 0$ , en los medios homogéneos se produce propagación rectilínea, definiéndose así el campo ideal de la óptica geométrica<sup>13</sup>. Los sistemas ópticos están formados por lentes, las cuales se definen a continuación.

<sup>12</sup> Item 10.

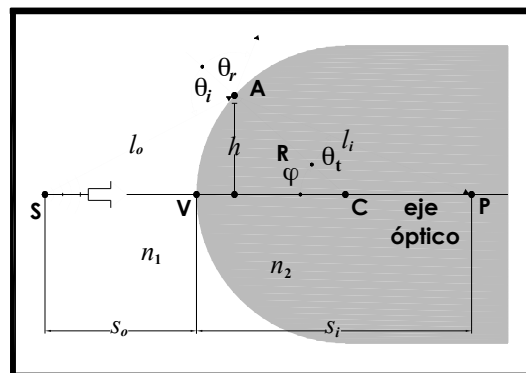
<sup>13</sup> Item 1.



**Figura 7.** Una fuente puntual  $S$  emite ondas esféricas. Un cono de rayos penetra en un sistema óptico que invierte los frentes de onda, obligándolos a converger en el punto  $P$ .

## LENTE.

En términos generales, una lente es un dispositivo refractor (es decir, una discontinuidad en el medio dominante) que reconfigura la distribución de la energía emitida. Para comprender como es que estas funcionan es indispensable describir mediante ecuaciones el redireccionamiento de los rayos que pasan a través de ellas. La figura 8 muestra una onda procedente de la fuente puntiforme  $S$  que incide en una interfaz esférica  $R$  centrada en  $C$ . El punto  $V$  se denomina vértice de la superficie mientras que la longitud de  $S$  a  $V$  es la distancia objeto ( $S_o$ ). Mediante la aplicación de las leyes de la refracción, el rayo  $SA$  será refractado en la interfaz hacia la normal local ( $n_2 > n_1$ ) y por consiguiente hacia el eje óptico. En algún punto  $P$  el rayo cruza el eje óptico, a la distancia del vértice ( $V$ ) de la interfaz esférica ese punto de intersección se le denomina distancia imagen ( $S_i$ )<sup>14</sup>.



**Figura 8.** Principales puntos de un rayo redireccionado por una interfaz esférica.

<sup>14</sup> Item 1.



La ecuación 3 es generada a partir de las relaciones entre las distancias de los puntos principales de la figura 8. Estas relaciones permiten deducir cual es la distancia en la que convergen los rayos transmitidos por una fuente puntual S cuya dirección fue modificada por una interfaz esférica entre dos medios con diferentes índices de refracción.

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{n_1 - n_2}{R} \quad (3)$$

Ahora, suponiendo que la parte posterior de la superficie retractora (con índice de refracción  $n_l$ ) de la figura 8 es pulida de forma que queden dos superficies esféricas rodeadas por un medio (con índice de refracción  $n_m$ ), son encontrados los puntos principales con los cuales se describe el redireccionamiento del rayo<sup>15</sup> (Fig. 9).

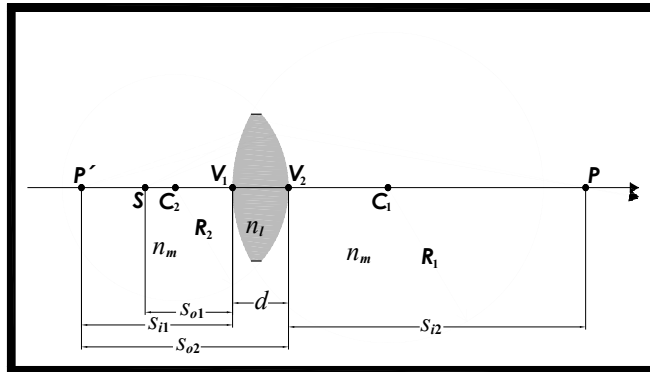


Figura 9. Principales puntos de un rayo redireccionado por dos superficies esféricas rodeadas por un medio.

De los puntos encontrados se obtiene que:

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

Donde  $s_{o1} = s_o$  y  $s_{i2} = s_i$ , y para simplificar la ecuación se considera que la lente es tan delgada que su espesor ( $d$ ) es despreciable. Además de que al medio envolvente es aire, por lo que  $n_m = 1$ .

A menudo es deseable convertir las ondas esféricas divergentes en un haz de ondas planas. Las lámparas portátiles, los proyectores así como los proyectores de exploración

<sup>15</sup> Item 1.

llevan acabo dicha tarea a fin de evitar que el haz se extienda y se debilite a medida que avanza. Por el contrario con frecuencia es necesario recoger rayos paralelos incidentes haciéndolos converger hacia un punto, enfocando así la energía como se hace con una lupa al utilizarla para concentrar el calor. La distancia del vértice de la lente hacia el punto ( $F$ ) donde todos estos rayos paralelos se concentran (Fig. 10) es llamada distancia focal ( $f$ ), la cual es obtenida de la ecuación 4 suponiendo que un rayo proveniente de un punto  $S$  esta tan distante que  $s_o = \infty$ , y este tiende a ser paralelo al eje óptico, por lo que:

$$\frac{1}{f} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (5)$$

O de igual forma:

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

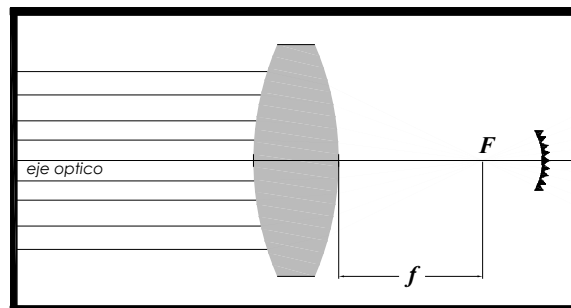


Figura 10. Localización del foco de un medio refractor.

Las ecuaciones obtenidas, sirven para ser aplicadas en sistemas con dos superficies esféricas retractoras (lentes), cuyos sistemas centrados (para los cuales todas las superficies son rotacionalmente simétricas alrededor de un eje común) pueden adquirir las siguientes formas:

### CONVEXAS, CONVERGENTES O POSITIVAS.

Son más gruesas en el centro y así tienden a disminuir el radio de curvatura de los frentes de onda (Fig. 11), es decir, la onda se hace más convergente a medida que atraviesa la lente (suponiendo que el índice de la lente sea mayor que el medio en el que está sumergida).

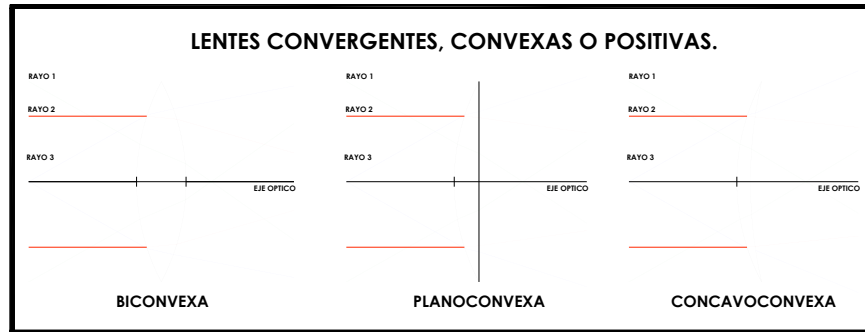


Figura 11. Trazado de algunos rayos clave a través de lentes positivas.

### CONCAVAS, DIVERGENTES O NEGATIVAS.

Son más delgadas en el centro y tienden a hacer avanzar esa parte del frente de onda, de manera que éste diverge más que a la entrada (Fig. 12).

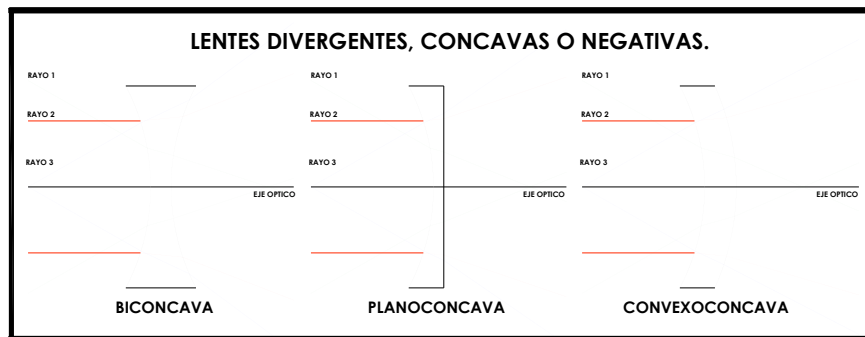


Figura 12. Trazado de algunos rayos clave a través de lentes negativas.

## 1. 2 FUNCIONAMIENTO DEL OJO HUMANO.

El ojo humano como instrumento óptico puede considerarse como una disposición de doble lente positiva para formar una imagen real en una superficie fotosensible. Si bien se parece a una cámara simple, el sistema visual funciona más bien como una unidad televisiva computarizada de circuito cerrado<sup>16</sup>, por lo cual; a continuación se describe su funcionamiento.

### 1 .2 .1 LAS PARTES QUE LO INTEGRAN.

El ojo es una masa gelatinosa casi esférica (de 24 mm de largo y unos 22 mm de ancho) contenido dentro de una envoltura dura y flexible, la esclerótica (Fig. 13). Excepto por la porción frontal o córnea que es transparente, la esclerótica es blanca y opaca. Sobresaliendo del cuerpo de la esfera está la córnea, la superficie curva de

<sup>16</sup> Item 1.

ésta (que esta ligeramente aplastada reduciendo así la aberración esférica) sirve como el primer y más fuerte elemento refractivo del sistema de lentes.

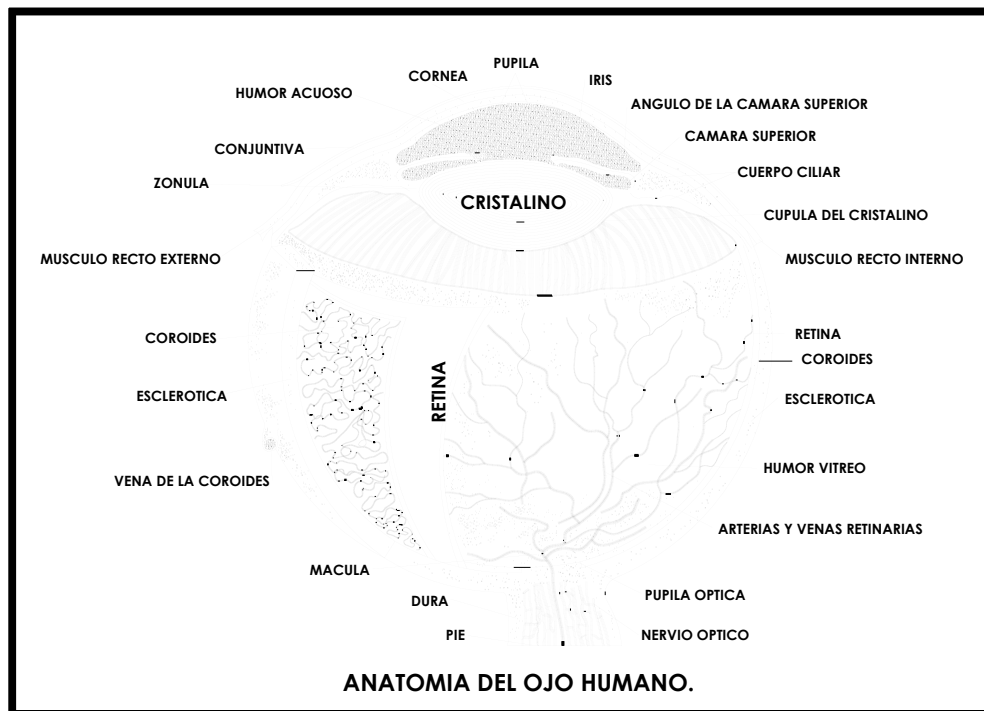


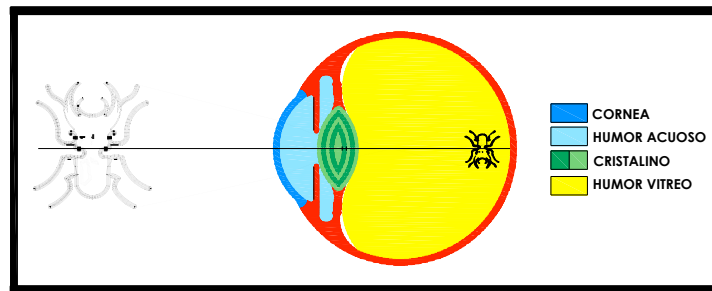
Figura 13. Anatomía del ojo humano.

Desde la córnea, la luz pasa a través de una cámara llena con un fluido acuoso denominado humor acuoso ( $n_{ha} = 1.336$ ) que nutre la parte anterior del ojo. Un rayo que hubiera sido fuertemente refractado hacia el eje óptico en la interfaz aire-córnea, sería tan solo ligeramente redirigido en la interfaz córnea – humor acuoso debido a su similitud de índices. En el humor acuoso está sumergido un diafragma conocido como iris, cuya función es controlar la cantidad de luz que entra en el ojo a través de su agujero o pupila. Es el iris el que proporciona al ojo su característico color azul, marrón, gris, verde o castaño, hecho de músculos circulares y radiales, el iris puede hacer expandir o contraer la pupila dentro de una gama que va de unos 2 mm en luz brillante hasta unos 8 mm en la oscuridad. Además de esta función, está también relacionado con el proceso de enfoque, contrayéndose para aumentar la nitidez de la imagen al realizar trabajos finos de enfocamiento<sup>17</sup>. Inmediatamente detrás del iris se halla la lente del cristalino. Tiene tanto el tamaño como la forma de una pequeña esfera aplastada por los extremos (9 mm diámetro y 4 mm de espesor). El cristalino es

<sup>17</sup> Item 1.

una masa compleja de capas fibrosas rodeada por una membrana elástica. Su estructura es similar a la de una cebolla transparente, formada aproximadamente por 22000 capas muy finas y tiene algunas características notables que lo distinguen de las lentes artificiales que se usan en la actualidad, además del hecho de que su tamaño sigue creciendo. Debido a su estructura laminar, los rayos que lo cruzan siguen trayectorias formadas por diminutos segmentos discontinuos. El cristalino es, en su conjunto, muy flexible, aunque dicha flexibilidad disminuye con la edad. Además, su índice de refracción varía de alrededor de 1.406 en el núcleo interior hasta aproximadamente 1.386 en la corteza menos densa. El cristalino proporciona el mecanismo de enfoque de alta definición, esto lo hace modificando su forma, es decir, tiene una distancia focal variable<sup>18</sup>.

Los componentes refractantes del ojo, la córnea y el cristalino (Fig. 14), pueden estudiarse como parte integrante de una lente efectiva de elementos dobles con una distancia focal frontal de 1.56 mm frente a la superficie anterior de la córnea y una longitud focal posterior de unos 24.3 mm en la retina. Para simplificar un poco el asunto, se deduce que el centro óptico de la lente combinada esté a 17.1 mm de la retina y que se halla precisamente en el borde trasero del cristalino<sup>18</sup>.



**Figura 14.** Componentes refractantes del ojo.

Detrás del cristalino hay otra cámara llena con una sustancia gelatinosa transparente hecha de colágeno (un *polímero* proteínico) y ácido hialurónico (un concentrado de proteínas) denominada humor vítreo ( $n_{hv} = 1.337$ ) que da sustento al globo ocular<sup>18</sup>.

Al interior de la dura membrana esclerótica se halla una envoltura interna, la coroides, una capa oscura, bien provista de conductos sanguíneos y bien pigmentada con melanina que absorbe la luz parásita al igual que la cubierta de pintura negra en el

<sup>18</sup> Item. 1.

interior de una cámara. Una capa delgada (cuyo espesor varía entre 0.5 y 0.1 mm) de células receptoras luminosas reviste en gran parte de la superficie interior de la coroides; se trata de la retina. El haz luminoso enfocado se absorbe a través de reacciones electroquímicas en esta estructura rosácea de capas múltiple<sup>19</sup>.

El ojo humano contiene dos clases de células *fotorreceptoras*: los bastones y los conos. Unos 125 millones de ellas están entremezcladas de manera no uniforme sobre la retina. En algunos casos, el conjunto de los bastoncitos (cuyo diámetro es de unos 0.002 mm) tiene las características de una película en blanco y negro de alta velocidad. Si bien es extremadamente sensible, funcionando con luz demasiado débil como para que reaccionen los conos, es incapaz de distinguir el color y las imágenes que retransmite no están bien definidas. Por el contrario, el conjunto de 6 ó 7 millones de conos (cada uno de un diámetro de unos 0.006 mm) puede imaginarse como si fuera una película de color a baja velocidad, superpuesta pero separada. Funciona con luz brillante proporcionando vistas detalladas y en color, siendo sin embargo bastante insensible con niveles de luz bajos<sup>19</sup>.

La gama normal de longitud de onda de la visión humana oscila entre 390 nm (1 nanómetro=  $1 \times 10^{-6}$  mm) y 700 nm aproximadamente. En todo caso, los estudios que se han llevado a cabo han permitido bajar dichos límites hasta alrededor de 310 nm en el ultravioleta, aumentándolos sucesivamente hasta unos 1050 nm en el infrarrojo. La limitación de la transmisión ultravioleta en el ojo es impuesta por el cristalino que absorbe en el UV. Las personas que han sufrido la extirpación quirúrgica de un cristalino han mejorado enormemente su sensibilidad al UV<sup>19</sup>.

La zona de salida del nervio óptico del ojo no contiene receptores, siendo insensible a la luz; por esta razón se denomina punto ciego. El nervio óptico se extiende sobre la parte posterior del interior del ojo con forma de retina<sup>19</sup>.

Cerca del centro de la retina existe una pequeña depresión de 2.5 mm a 3 mm de diámetro, conocida como la mancha amarilla o mácula cuyo número de conos es más que el doble del de los bastoncitos y en cuyo centro se halla una pequeña región libre de bastones de unos 0.3 mm de diámetro, llamada fovea centralis. Aquí, los conos

---

<sup>19</sup> Item 1.

son más delgados (su diámetro oscila entre 0.0030 mm y 0.0015 mm) y están más densamente empaquetados que en ningún otro lugar en la retina. Puesto que esta zona proporciona la información más clara y detallada, el globo ocular se mueve continuamente de tal forma que la luz que llega del área al objeto de interés primario cae en esta zona. Una imagen se desplaza constantemente a través de las diferentes células receptoras por medio de estos movimientos normales del ojo. Si tales movimientos no se dieran y la imagen se mantuviera estacionaria en una determinada serie de fotorreceptores, tendería a desvanecerse. Sin la fovea, el ojo perdería el 90 y 95% de su capacidad, reteniendo tan sólo la visión periférica<sup>20</sup>.

### **1. 2. 2 EL CRISTALINO Y EL PROCESO DE ACOMODACION.**

El enfoque fino o de acomodación del ojo humano es una función que desempeña el cristalino suspendido en posición detrás del iris mediante unos ligamentos que están conectados con los músculos ciliares. Por lo general dichos músculos están relajados y en ese estado empujan hacia fuera radialmente en la red de finas fibras que fijan el borde del cristalino. Así, este hace que el cristalino flexible adquiera una configuración bastante plana, aumentando su radio que, a su vez, aumenta su distancia focal. Con los músculos completamente relajados, la luz de un objeto al infinito se enfocará en la retina (Fig. 15). Cuando el objeto se acerca más al ojo, los músculos ciliares se contraen, liberando la tensión externa sobre la periferia del cristalino que entonces sobresale por sus propias fuerzas elásticas. Al hacerlo, la distancia focal disminuye de tal forma que la distancia que atraviesan los rayos entre el centro óptico del cristalino y la retina se mantiene constante. A medida que el objeto se acerca aun más, el yugo de los músculos ciliares se contrae con más tensión, la región circular que rodean se hace todavía más pequeña mientras el radio del cristalino se reduce aun más. El punto más cercano que puede enfocar se denomina punto próximo. En un ojo normal podría ser de unos 7 cm, en un adolescente, 25 cm, para un adulto joven y aproximadamente de unos 100 cm, para una persona de edad avanzada. Al diseñar los instrumentos visuales se tiene en cuenta este fenómeno de tal manera que el ojo no haga esfuerzos innecesarios. Lógicamente, el ojo no puede enfocar a dos objetos diferentes al mismo

---

<sup>20</sup> Item 1.

tiempo como podrá corroborarse si al mirar a través de una lámina de vidrio, tratamos de enfocar esta y la escena que se halla detrás al mismo tiempo<sup>21</sup>.

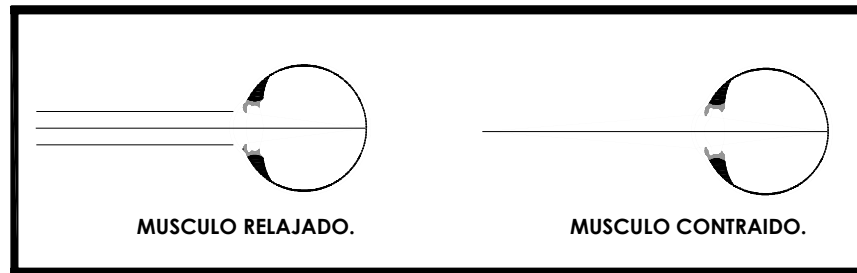


Figura 15. Acomodación.

### 1. 3 EL OJO HUMANO COMO UN SISTEMA OPTICO.

El ojo humano visto como un sistema óptico está compuesto por dos lentes, dos medios ópticos, un diafragma de abertura y un detector colocado en la parte posterior de la cavidad del sistema. La primera lente (la córnea) se considera rígida debido a que no cambia de forma, tamaño y espesor, la segunda (el cristalino) es una lente con longitud focal variable, ya que esta debe cambiar de forma y espesor para poder enfocar las imágenes de los objetos localizados en diferentes posiciones. Como medios ópticos están el humor acuoso: que se encuentra entre la córnea y el cristalino, y el humor vítreo: localizado entre el cristalino y la retina. El diafragma de abertura: el iris, se encuentra localizado delante del cristalino y rodeado por el humor acuoso. Y como detector está la retina que es la encargada de detectar las variaciones de luz mediante procesos electroquímicos en las células fotorreceptoras, que posteriormente son transmitidos por medio del nervio óptico al cerebro para su procesamiento. De esta manera se puede considerar al ojo como un sistema similar al objetivo de una cámara fotográfica, puesto que en ambos casos se debe formar una imagen nítida en un plano del detector. A continuación se define el modelo matemático por medio del cual se simula el comportamiento del ojo humano y los posibles elementos ópticos a considerar para su funcionamiento real.

#### 1. 3. 1 MODELO MATEMATICO.

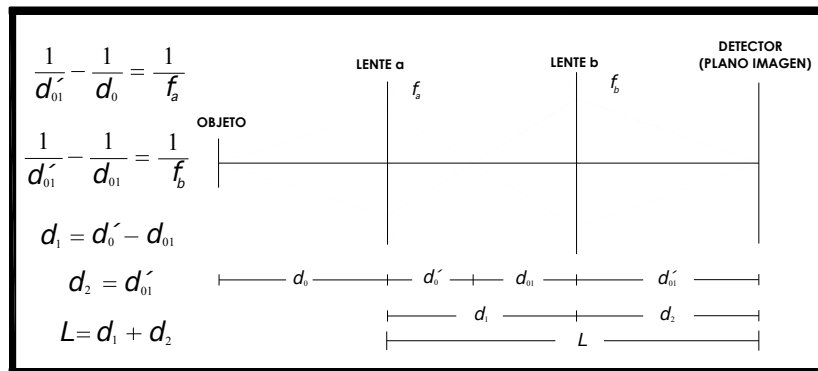
El análisis óptico propuesto para simular el comportamiento del ojo humano, consiste de dos lentes: Una lente rígida con parámetros geométricos fijos para simular el

<sup>21</sup> Item 1.



funcionamiento de la córnea y una lente adaptativa con longitud focal variable para simular el comportamiento del cristalino, además de contar un *plano imagen* que simule a la retina. Por otro lado para una persona sin problemas de visión (miopía, astigmatismo, hipermetropía, presbicia), la imagen formada de un objeto por el ojo (sistema óptico) deberá caer en la retina, por lo que la distancia de la córnea al plano imagen (retina) permanecerá fija, así como la distancia del cristalino al plano imagen, siendo estas las restricciones a considerar para el análisis óptico<sup>22</sup>.

Para simplificar el modelo matemático que describa el procesamiento de la imagen desde el objeto hasta el plano imagen, los medios ópticos (humor acuoso y humor vítreo) son descartados y sustituidos por aire. El diafragma de abertura no es considerado, ya que su funcionamiento depende más de las condiciones luminosas del entorno, además de que se han venido estudiando las trayectorias de los rayos luminosos y no la intensidad con la que se propagan. Partiendo de las ecuaciones utilizadas para la localización de los puntos principales en una lente delgada y el ordenamiento de las lentes principales (una lente a rígida y una lente b adaptativa), se pueden establecer las relaciones necesarias para definir las distancias principales para la disposición de los elementos en función de sus parámetros ópticos<sup>22</sup> (Fig. 16).



**Figura 16.** Ecuación de primer orden y relaciones entre los elementos propuestos para describir el funcionamiento del ojo humano.

Donde  $d_0$  y  $d_{01}'$  son las distancias del objeto y la imagen a la lente rígida, respectivamente,  $f_a$  es la distancia focal de la lente rígida,  $d_{01}''$  y  $d_{01}'$  son las distancias del objeto y la imagen a la lente adaptativa,  $f_b$  es la distancia focal de la

<sup>22</sup> Item 4.

lente adaptativa,  $d_1$  es la separación entre lentes,  $d_2$  es la separación de la lente b al detector, y  $L$  es la longitud total del sistema óptico. Si uno desea conocer la nueva distancia focal de la lente para enfocar el objeto cuando cambia de posición, se utiliza la ecuación 7 donde  $f_b$  esta dada en función de  $d_0$  (la distancia del objeto al sistema óptico).

$$f_b = \frac{d_{01}' [(d_0 + f_a)(L - d_{01}') - f_a d_0]}{L(d_0 + f_a) - f_a d_0} \quad (7)$$

### 1. 3. 1 ELEMENTOS DEL MODELO FUNCIONAL.

Definido el modelo matemático que describe el funcionamiento del sistema óptico propuesto, es necesario designar los elementos ópticos reales capaces de simular dicho sistema. Por lo que para la córnea se propone utilizar una lente común de vidrio (Fig. 17a) con acabado superficial óptico, para el iris un diafragma óptico (Fig. 17b), como cristalino una lente (Fig. 17c) hecha de un material que permita deformaciones tales que cambien sus parámetros ópticos y para la retina, un detector que mediante una interfaz permita visualizar el enfoque de las imágenes en tiempo real, como lo hace una cámara CCD (Fig. 17).

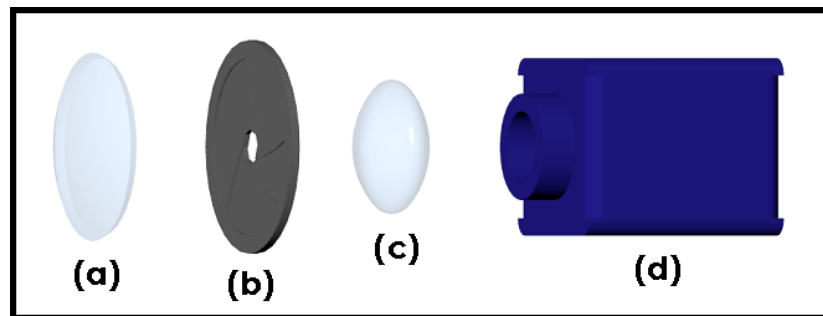


Figura 17. Elementos del modelo del ojo humano.

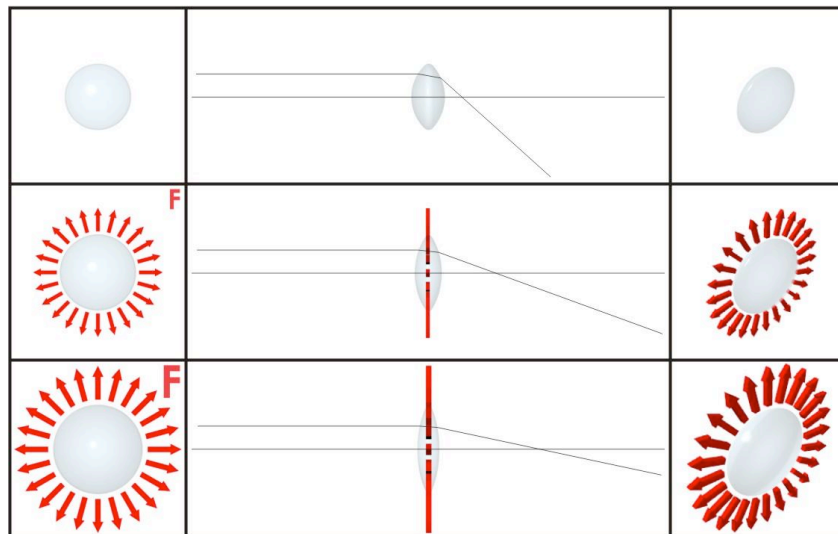
Para la disposición de todos estos elementos ópticos es necesaria la utilización de componentes mecánicos que permitan un correcto dimensionamiento entre elementos.

Dado que la córnea no cambia de forma y está fija, se puede utilizar una montura común, por lo que el diseño del modelo se enfoca principalmente para el desarrollo de

una montura opto-mecánica especial que permita modificar el espesor axial y los radios de curvatura de la lente adaptativa.

Actualmente la revolución en los materiales plásticos, principalmente los *elastómeros*, dan la posibilidad de crear lentes que se expandan o contraigan dependiendo del enfoque que se quiera obtener, sin que éstas pierdan sus propiedades elásticas. Por lo que para el desarrollo de la montura experimental se toman en cuenta los elastómeros, familia de materiales plásticos, cuyas características y propiedades (físicas y mecánicas) son las que más se aproximan a las requeridas para simular el comportamiento del cristalino.

Por lo que se prevé que para el diseño de la montura, esta tendrá que deformar una lente flexible (adaptativa, elástica) aplicando fuerzas radiales sobre bordes (Fig. 18), modificando así sus parámetros ópticos (radios de curvatura, grosor, distancia focal).



**Figura 18.** Lente adaptativa, al aplicarle fuerzas perpendiculares al eje óptico, los parámetros ópticos cambian.

Como parte fundamental del proyecto también se establece la construcción de una carcasa que contenga todos los elementos anteriormente mencionados. Esto tomando en cuenta los parámetros estéticos, los cuales están basados en copiar la geometría predominante del ojo, la cual contribuye para un correcto funcionamiento en el procesamiento de imágenes.

# 2

## RECOPIACION DE DATOS.

Como parte fundamental de la metodología de diseño elegida, fue la investigación bibliográfica. Mediante esta se pudieron estudiar los distintos tipos de monturas optomecánicas existentes, las cuales sirvieron como apoyo para diseñar las utilizadas en el modelo, pero para la selección de éstas se tomaron en cuenta los requerimientos de funcionamiento de dicho modelo. También se realizó un análisis a los mecanismos de abertura y cierre radial existentes, esto con el fin de desarrollar uno propio que cumpliera con los requerimientos de funcionamiento para la deformación de la lente flexible. Finalmente la investigación concluyó con un estudio de materiales y procesos enfocados principalmente a los que en su momento fueran los ocupados para el diseño del modelo. Esto, parte de la investigación se basó en la premisa de que la forma se conceptualiza o visualiza en un material o en una combinación de materiales a los cuales se les da una forma con herramientas. Al crear una forma, de hecho, se está seleccionando un proceso de manufactura. Es necesario tener un entendimiento del mundo real de los materiales y de los métodos de manufactura para crear productos exitosos<sup>23</sup>(Fig. 19).

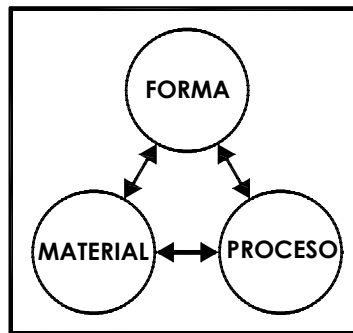


Figura 19. Relación forma-material-proceso.

<sup>23</sup> Lesko, Jim. "Diseño Industrial, guía de materiales y procesos de manufactura". Ed. Limusa-Wiley, México (2004).

## 2. 1 DISEÑO Y ENSAMBLE PARA SISTEMAS OPTICOS.

Los elementos mecánicos escogidos para su estudio entran dentro de la categoría de elementos opto-mecánicos para montajes ópticos empleados en técnicas de obtención de imágenes, esto mediante la utilización de elementos refractivos y reflejantes, como pueden ser lentes, espejos y prismas (Fig. 20). Estos elementos mecánicos comúnmente llamados monturas, se encargan de posicionar y fijar cada uno de estos elementos con exactitud y rigidez, lo que se transmite en imágenes bien definidas en el plano imagen.

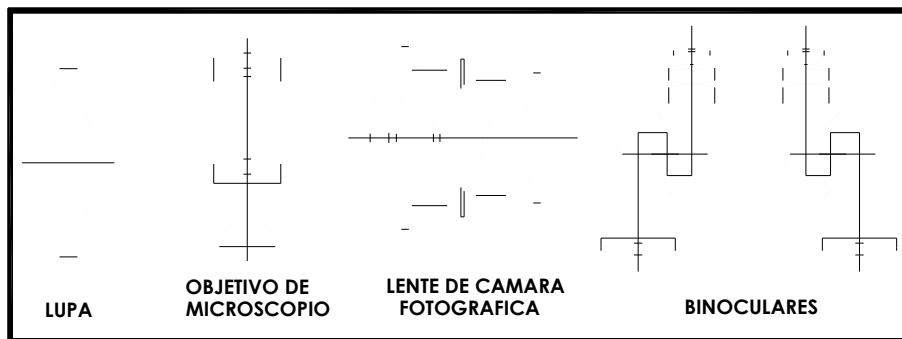


Figura 20. Disposición de elementos refractivos y reflejantes de algunos instrumentos ópticos.

Las monturas se clasifican dependiendo de los criterios a utilizar, según el tamaño, el número de elementos ópticos, si están centradas respecto al eje óptico, si son simétricas, etc. Las monturas a utilizar son del tipo rotacionalmente simétricas, estas a su vez se estudian dependiendo del número de elementos ópticos que contengan: monturas individuales o para varias lentes. Esta clasificación permite comprender de manera gradual la complejidad de los elementos a diseñar.

### 2. 1. 1 MONTURAS INDIVIDUALES.

Este estudio de monturas está considerado para elementos ópticos cuyo rango de diámetro va de 10 a 250 mm. Como consideración fundamental para el diseño de monturas ópticas es el grado de precisión. Respecto a este criterio, se define a una montura individual para lentes de baja precisión como aquella que en la que la superficie óptica tiene una desviación máxima de 0.125 mm respecto al eje óptico común<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> Item 7.

Tomando las consideraciones anteriores, las monturas individuales pueden clasificarse a su vez como: monturas individuales de diámetro variable y monturas de diámetro fijo (Fig. 21). Las primeras generalmente utilizadas como instrumental para montajes dentro de un laboratorio, puesto que para su uso es necesaria la utilización de elementos adicionales tales como: postes, bases y mesas especiales. Las segundas y de interés son utilizadas para elementos ópticos en específico, las cuales cumplen con requerimientos de diseño definidos. Este tipo de monturas están diseñadas de acuerdo a las dimensiones del elemento óptico que contendrá, asimismo también cabe considerar el cómo y dónde estará montada, de acuerdo a las necesidades de diseño establecidas con anterioridad.



**Figura 21.** Diversidad de monturas individuales.

Las monturas de diámetro fijo generalmente se manufacturan de aluminio anodizado, el cual ofrece resultados muy aceptables en cuanto a costos y funcionamiento. Para ensamblar una lente libremente en este tipo de monturas es necesario contar con un mínimo de 0.025 a 0.05 mm libres alrededor de su ubicación en la montura, puesto que el ensamble se efectúa “dejando caer” la lente dentro de la celda que la contendrá. Para pequeñas cantidades de fabricación (prototipos, modelos experimentales), no es necesario considerar tolerancias mecánicas cerradas<sup>25</sup>. En la tabla 1 se presentan algunas configuraciones de montaje utilizadas comúnmente en monturas individuales.

<sup>25</sup> Item 7.

<b>CONFIGURACIONES PARA MONTAJE INDIVIDUAL</b>	
<b>CONFIGURACION</b>	<b>DESCRIPCION</b>
 <p>REBORDE PARA GASTAR CELDA GASTADA EN EL ENSAMBLE</p> <p>ROSCA PARA ENSAMBLE LENTE</p> <p>CELDA ANTES DEL ENSAMBLE REBORDE GASTADO</p> <p style="text-align: center;"><b>CELDA DE DESGASTE</b></p>	<p>Consiste en la deformación del reborde de un metal maleable sobre la lente. Latón y aluminio son comúnmente ocupados. Esta técnica no es cara debido a que no requiere partes extra. La celda es montada sobre un eje giratorio al que se le acerca una herramienta para el desgaste, teniendo cuidado de no aplicar una fuerza extrema que rompa el borde de la lente.</p>
 <p>CELDA REBORDE GASTADO</p> <p>LENTE MUELLE</p> <p style="text-align: center;"><b>CELDA DE DESGASTE CON MUELLE</b></p>	<p>Otra versión del método de desgaste incluye un resorte cilíndrico helicoidal a compresión que es insertado detrás de la lente sobre la celda, posteriormente al desgaste, la lente es ligeramente presionada por el resorte y el reborde gastado. Se recomienda emplear esta técnica cuando el sistema estará sometido a fuertes vibraciones.</p>
 <p>CELDA ANILLO FRAGMENTADO</p> <p>LENTE</p> <p style="text-align: center;"><b>ANILLO FRAGMENTADO</b></p>	<p>El empleo de anillo fragmentado, es una opción económica para montar lentes. Se utiliza un anillo de sección circular al cual le falta un parte de su periferia que es insertado en una hendidura redonda previamente maquinada en la celda. También se puede ocupar un anillo de sección rectangular. Como ventaja se puede desmontar la lente y como desventaja una baja precisión.</p>
 <p>CELDA ANILLO AJUSTADO A PRESION</p> <p>LENTE</p> <p style="text-align: center;"><b>ANILLO CONTINUO</b></p>	<p>Un anillo continuo no requiere de una hendidura maquinada dentro de la celda, pero se requiere que las tolerancias sean mínimas. De esta forma se calienta la celda de modo que se expande, posteriormente se introduce la lente que será presionada por el anillo previamente enfriado para su contracción. Al pasar a temperatura ambiente el sistema se fija automáticamente.</p>
 <p>REMACHE CLIP DE SALTO</p> <p>LENTE ANILLO DE MONTURA</p> <p style="text-align: center;"><b>CLIPS DE SALTO</b></p>	<p>Este es un método comúnmente empleado para soportar lentes en proyectores. Aquí, la lente es sujeta por tres clips espaciados en intervalos de 120° alrededor de la periferia de la lente, unidas a un anillo de metal que realiza la función de soporte. Esta configuración contrarresta la expansión de la lente debida al calentamiento provocado por el foco del proyector.</p>

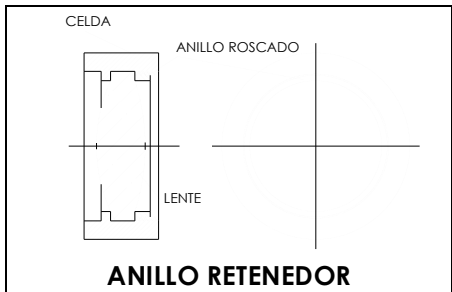
	<p>Un anillo retenedor roscado forma un ángulo de <math>90^\circ</math> en contacto con la superficie del vidrio de la lente. Esta configuración es utilizada cuando se requiere de centricidad máxima. Para este tipo de configuración hay que tener cuidado de que la lente sea presionada a la misma altura en ambas caras, de esta forma se previene un daño sobre ella.</p>
---	--

Tabla 1. Distintas configuraciones para montaje de lentes<sup>26</sup>.

En el caso del anillo roscado, este puede adquirir diferentes configuraciones, ya sea en ángulo de  $90^\circ$ , esquina toroidal, cono tangente o asiento esférico (Fig. 22). Siempre que sea posible, considerar en el diseño del anillo retenedor una contraparte igual, en este caso un asiento que obliga a que los únicos esfuerzos ejercidos sobre el vidrio de la lente sean de compresión. Una de las ventajas de este sistema es que puede ser desarmable, permitiendo así un cambio de lente dependiendo de la necesidad<sup>27</sup>.

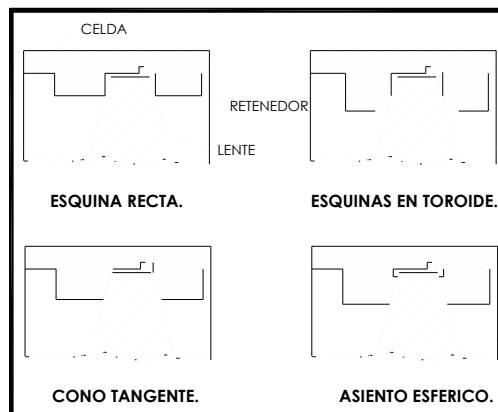


Figura 22. Configuraciones de filos para el anillo roscado.

Las configuraciones anteriores también son ocupadas cuando es necesario montar varias lentes, con la diferencia de variaciones dentro de la celda y la utilización de algunos componentes internos. Dichas variaciones y componentes son explicados a continuación.

### 2. 1. 2 MONTURAS PARA VARIAS LENTES.

En el diseño de ensambles de múltiples lentes, frecuentemente son requeridos espaciadores cuyas longitudes axiales son cuidadosamente maquinadas para obtener los espacios de aire requeridos entre los vértices de las superficies de las lentes. Este tipo

<sup>26</sup> Item 7.

<sup>27</sup> Item 7.



de ensambles generalmente se hacen dentro de los cañones ópticos, que no son más que un contenedor en donde todos los elementos ópticos están situados unos de otros dependiendo del manejo de imágenes que se quiera obtener. Estos permiten una disposición exacta de componentes durante el ensamble, además proveen a los elementos ópticos de protección del medio ambiente (polvo, humedad, temperatura). Para evitar deformaciones, el cañón óptico debe de tener un coeficiente de expansión similar al del vidrio óptico. El material más común es el aluminio, el cual es barato y fácil de maquinar<sup>28</sup>.

Los ensambles para varias lentes se dividen en fijos (estáticos) y dinámicos (Fig. 23). Los primeros se ocupan para sistemas ópticos en los cuales no se requiere del movimiento de alguno de sus elementos ópticos para un enfoque, como por ejemplo oculares, lupas, objetivos, etc. Los segundos cuentan con elementos movibles, ya sean de uno o varios de sus elementos. Por lo que para su funcionamiento requieren de mecanismos más complejos y precisos, logrando así una correcta manipulación de imágenes.



Figura 23. Diversidad de monturas para varias lentes.

### ENSAMBLES FIJOS.

Los ensambles fijos más exactos y precisos son aquellos en donde el diámetro de las lentes es el mismo que el del interior del cañón donde estarán contenidas. Aquí se ocupan espaciadores para situar las distancias entre los distintos elementos ópticos (Fig. 24a). Este tipo de diseño está restringido al uso de 3 o 4 elementos ópticos, el uso de más provocaría desalineamientos respecto al eje óptico. Un problema con esta

<sup>28</sup> Vukobratovich, Daniel, "1° Curso de diseño opto-mecánico", notas del curso, Arizona (Abril 1991).

técnica es la fricción entre los espaciadores y el cañón al momento del ensamble, dificultando de alguna forma el contacto entre espaciadores y lentes. La fuerza aplicada al último elemento (por parte del anillo retenedor), es mucho mayor que la transmitida a las demás lentes, por lo que hay que tener cuidado de no fracturar la superficie de la última lente<sup>29</sup>.

Para configuraciones en donde haya vibraciones y aceleraciones, se puede ocupar un diseño de cañón en el que cada elemento es retenido individualmente. Este diseño requiere que el tamaño de cada elemento haya disminuido progresivamente hasta el final del cañón (Fig. 24b). Esta configuración elimina los espaciadores por lo que los problemas asociados a ellos son eliminados<sup>29</sup>.

Una forma común ensamble de lentes dentro de un cañón es montar previamente las lentes en celdas separadas y posteriormente introducir las dentro del cañón (Fig. 24c). Esta técnica demanda alta precisión en las celdas si se requieren sistemas con un alto grado de exactitud<sup>29</sup>.

En algunos casos para facilitar el ensamble es necesario ocupar dos cañones, uno primario sobre el que va montado un secundario (Fig. 24c). El ensamble de cañones por medio de rosca provee una exactitud pobre, por lo que una variante es utilizar una parte cilíndrica y posteriormente la rosca con un diámetro menor. De esta forma la otra contraparte cilíndrica fija el cañón antes de comenzar a roscar. Otra consideración que se hace al momento de ensamblar las piezas es que pueden presentarse presiones dentro del ensamble (al introducir una celda dentro de un cañón), por lo que en algunos casos se hacen orificios que ventilan el interior del cañón, facilitando así los ensambles<sup>29</sup>.

---

<sup>29</sup> Item 28.

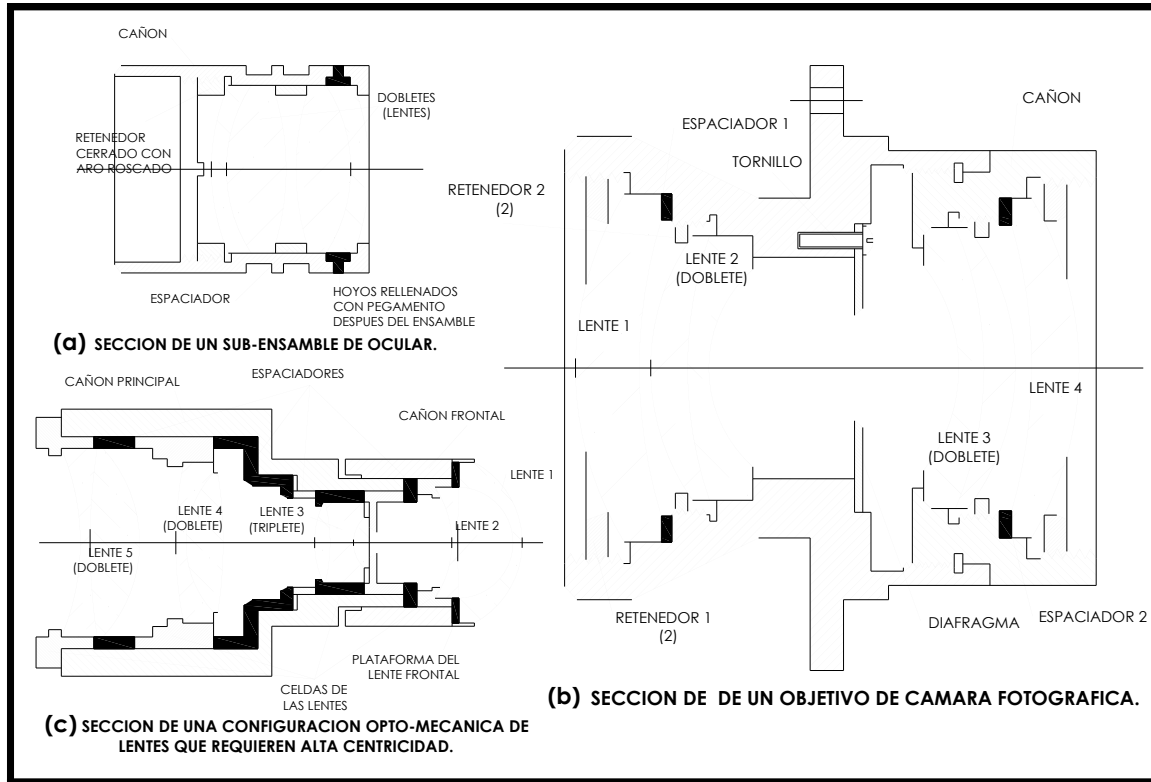


Figura 24. Ensamblajes fijos.

## ENSAMBLES DINAMICOS.

En la mayoría de los instrumentos ópticos (zooms, telescopios, microscopios, binoculares, cámaras), es necesario hacer enfoques, por lo que los cañones cuentan con mecanismos que mueven los elementos ópticos internamente.

Una forma de efectuar estos movimientos, es utilizando una celda con una rosca sobre la que se encuentra montado el arreglo que se quiere mover axialmente (Fig. 25a). La celda es girada de tal forma que se mueve hacia adelante y hacia atrás. Es una forma sencilla aprovechando que el arreglo (una o varias lentes) es rotacionalmente simétrico, ya que la o las lentes giran también. La desventaja de esta técnica es que hay una cierta variación en la imagen. Para eliminar esta variación se utilizan pasos de rosca menores, por lo que los dientes son más robustos, además de que se cambian los dientes con ángulo de  $60^\circ$  a dientes con perfil rectangular<sup>30</sup>.

Otro método utilizado es el uso de ranuras en los cañones principales. Esta ranura en espiral esta maquinada sobre la superficie longitudinal del cañón. Para ensamblar el

<sup>30</sup> Item 7.

sistema, primero se inserta la celda "dinámica" dentro del cañón ranurado, posteriormente se utiliza un poste que pasa por la ranura del cañón y es atornillado sobre la celda. La función de este poste es obligar a la celda que siga la trayectoria ranurada en el cañón principal. De esta forma los límites de desplazamiento están designados por el inicio y final de la ranura<sup>31</sup>.

El uso de "carruajes" sobre los que están montados las celdas que contienen las lentes, disminuyen las variaciones durante el proceso de enfoque (Fig. 25b). Esto debido a que las ruedas que están apoyadas sobre las paredes del cañón principal no permiten una descentración de las lentes respecto al eje óptico. La utilización de carruajes se aplica cuando las distancias que recorren las celdas son relativamente amplias. Se pueden emplear conjuntamente las celdas roscadas o las ranuras en espiral con los carruajes ópticos, todo esto dependiendo de la necesidad<sup>31</sup>.

---

<sup>31</sup> Item 7.

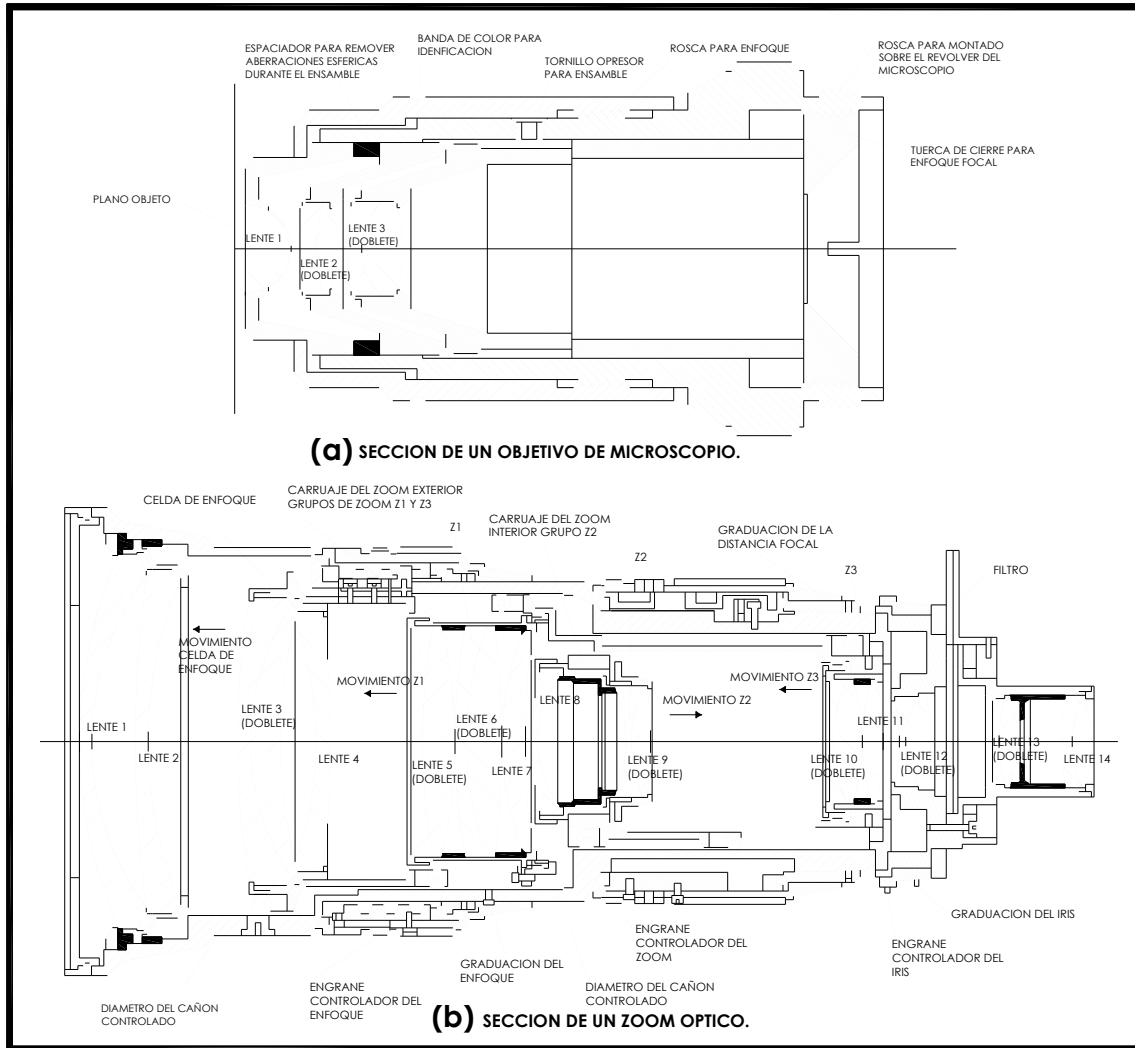


Figura 25. Ensamblajes con elementos dinámicos.

## 2. 2 ANALISIS DE MECANISMOS.

Previamente se comentaron los requerimientos de la montura, el tipo de funcionamiento de la montura, el necesario para una correcta simulación del cristalino. Se requiere de un dispositivo mecánico que se abra y se cierre con precisión, ejerciendo fuerza radial sobre el borde la lente flexible a usar. Por lo regular, un dispositivo implica partes movibles que transmiten energía y logran un patrón específico de movimiento. Así, un sistema mecánico se compone de varios dispositivos mecánicos. En consecuencia para diseñar un sistema mecánico es necesario tener amplios conocimientos en el diseño de elementos mecánicos que lo componen<sup>32</sup>. Por lo que para comprender plenamente el funcionamiento de los mecanismos a estudiar,

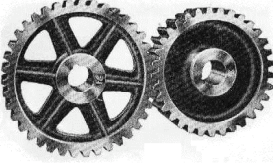
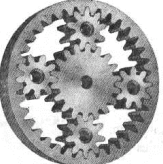
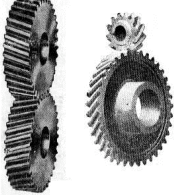
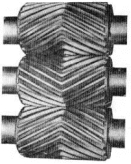
<sup>32</sup> Mott, Robert L., "Diseño de elementos de máquinas", Ed. Prentice Hall, 2da ed., México (1992).

a continuación se definen algunos elementos de maquinaria empleados comúnmente en el diseño de dispositivos mecánicos y posteriormente se hacen los análisis de dichos mecanismos.

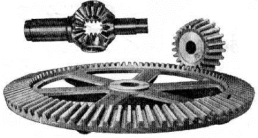
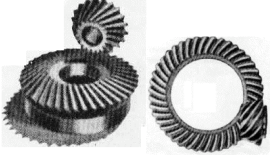
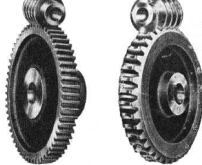

## 2. 2. 1 ELEMENTOS DE MAQUINARIA.

### ENGRANES.

Los engranes se utilizan para transmitir potencia positivamente de un eje a otro, mediante dientes que se van acoplando de manera sucesiva (en dos engranes). Se utilizan en lugar de las transmisiones por banda y de otras formas de transmisión por fricción, cuando debe mantenerse una relación exacta de velocidad y transmisión de potencia. Los engranes también pueden ser utilizados para incrementar o reducir la velocidad del eje impulsado, reduciendo o incrementando así el par de torsión del miembro impulsado<sup>33</sup>. En la tabla 2 se clasifican los principales tipos de engrane.

TIPO DE ENGRANE	DESCRIPCION
 <p data-bbox="316 1129 422 1157"><b>RECTOS.</b></p>	<p data-bbox="532 974 1393 1136">Se utilizan generalmente para transmitir potencia entre ejes paralelos. Los dientes de estos engranes son rectos y paralelos a los ejes a los cuales están fijos. Cuando dos engranes de tamaño diferente están acoplados, el más grande se le conoce como engrane, en tanto al más pequeño se le conoce como piñón.</p>
 <p data-bbox="305 1346 435 1373"><b>INTERIOES.</b></p>	<p data-bbox="532 1192 1393 1354">Estos se usan donde los ejes son paralelos y los centros deben estar más cerca entre sí de lo que podría lograrse utilizando engranes rectos. Esta disposición proporciona una impulsión más resistente, ya que existe un área mayor de contacto que con la impulsión de un engrane convencional.</p>
 <p data-bbox="277 1598 464 1625"><b>HELICOIDALES.</b></p>	<p data-bbox="532 1392 1393 1619">Estos se utilizan para conectar ejes paralelos o ejes en ángulo. Debido a la acción progresiva, más bien que intermitente, de los dientes, los engranes helicoidales operan más suave y silenciosamente que los rectos. En vista de que en todo momento hay más de un diente en acoplamiento, los engranes helicoidales son más resistentes que los engranes rectos del mismo tamaño y paso.</p>
 <p data-bbox="277 1801 464 1829"><b>HERRINGBONE</b></p>	<p data-bbox="532 1654 1393 1816">En la mayor parte de las instalaciones donde es necesario eliminar el empuje axial, se utilizan estos engranes, este tipo de engranes se parecen a dos engranes helicoidales colocados uno al lado del otro, una mitad de hélice izquierda y la otra de hélice derecha.</p>

<sup>33</sup> Krar F., Steve, "Tecnología de las máquinas-herramienta", Ed. AlfaOmega, México (2002).

 <p><b>CONICO RECTOS.</b></p>	<p>Cuando dos ejes están localizados en ángulo, con sus líneas axiales cruzándose a 90°, la potencia se transmite generalmente utilizando estos engranes. Sin embargo, no es necesario que los ejes estén en ángulo recto para transmitir potencia, estos se conocen como engranes cónicos en ángulo.</p>
 <p><b>CONICO HELICOIDALES.</b></p>	<p>Al igual que en los rectos, estos disminuyen el ruido y facilitan la transmisión de potencia. A estos engranes modificados con dientes helicoidales también se les conoce como hipoides. Los ejes de estos engranes, aunque estén en ángulo recto, no están en un mismo plano, por lo tanto no se cruzan. Los engranes hipoides se utilizan en las transmisiones automotrices.</p>
 <p><b>TORNILLO SINFIN.</b></p>	<p>Cuando los ejes están en ángulo recto y se requiere una considerable reducción de velocidad se utiliza el tornillo sinfín.</p>
 <p><b>CREMALLERA.</b></p>	<p>Cuando es necesario convertir un movimiento giratorio en un movimiento lineal, se puede utilizar una cremallera y un piñón. La cremallera, que realmente es un engrane recto o plano, puede tener dientes rectos para acoplarse con un engrane recto, o dientes en ángulo, para acoplarse con un engrane helicoidal.</p>

**Tabla 2.** Clasificación de los engranes<sup>34</sup>.

## COJINETES.

Los cojinetes contribuyen a la buena operación de partes giratorias en motores y maquinaria diversa. Se utilizan para sostener y fijar en posición ejes mecánicos y reducir la fricción por la parte rotatoria, particularmente cuando está bajo carga. Deben ser capaces también de absorber y transmitir cargas a velocidades y temperaturas requeridas. Los cojinetes pueden dividirse en dos clases generales: de deslizamiento y de rodamiento<sup>34</sup>.

Los cojinetes deslizantes operan con base en el principio de la película de aceite; esto es, entre la barra eje y la superficie de apoyo hay una delgada capa de lubricante, estos generalmente se ocupan en máquinas o componentes que giran a velocidades relativamente bajas. Los cojinetes de rodamiento se ocupan en vez de los cojinetes de desplazamiento, por varias razones: tienen menor coeficiente de fricción, no se desgastan tanto y se remplazan fácilmente debido a sus estándares<sup>35</sup>. En la tabla 3 se muestran los cojinetes más comunes en cuanto a uso.

<sup>34</sup> Item 33.

<sup>35</sup> Item 33.


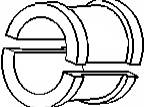
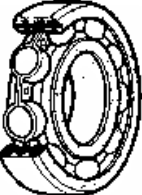
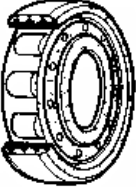
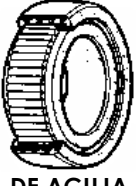
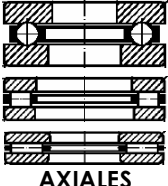
TIPO DE COJINETE	DESCRIPCION
<b>COJINETES DESLIZANTES</b>	
 <b>MACIZOS</b>	<p>Son del tipo casquillo, y se encuentran frecuentemente en motores eléctricos. Pueden estar hechos de bronce e incluso de hierro colado. Este tipo de cojinetes no tienen posibilidad de ajuste, y suelen presentar problemas cuando no se les mantiene adecuadamente.</p>
 <b>PARTIDOS</b>	<p>Estos se utilizan con frecuencia en máquinas más grandes, que operan a velocidades menores. Pueden estar hechos de bronce, o bien de bronce babitt. El ajuste por lo general se logra por medio de calzas laminadas puestas entre las mitades superior e inferior del cojinete.</p>
<b>COJINETES DE RODAMIENTO</b>	
 <b>DE BOLAS</b>	<p>Son fáciles de diseñar, no separables, capaces de operar en altas e incluso muy altas velocidades y requieren poca atención o mantenimiento en servicio. Existen variaciones de este tipo de rodamientos como el de bolas con contacto angular que tiene dispuestos sus caminos de rodadura de forma que la presión ejercida por las bolas es aplicada oblicuamente con respecto al eje, este es especialmente apropiado para soportar no solamente cargas radiales, sino también grandes cargas axiales. También se diseñan con dos hileras de bolas.</p>
 <b>CILINDRICOS</b>	<p>Este rodamiento es adecuado para cargas radiales relativamente grandes y puede también soportar altas velocidades. La más alta capacidad de carga dinámica básica se logra por una mayor área de contacto entre los elementos rodantes y las pistas de rodamiento. También los hay con hilera doble.</p>
 <b>CONICOS</b>	<p>Debido a la posición oblicua de los rodillos cónicos y caminos de rodadura, es especialmente adecuado para resistir cargas radiales y axiales simultáneas. Para casos en que la carga axial es muy importante hay una serie de rodamientos cuyo ángulo es muy abierto. La capacidad de ajuste los hace versátiles. Se utilizan extensamente en la fabricación de máquinas herramienta.</p>
 <b>DE AGUJA</b>	<p>Estos son largos rodillos cilíndricos de pequeño diámetro. Se utilizan cuando se requiere una mayor superficie de apoyo y donde está limitado el espacio disponible. Estos están diseñados para cargas radiales y velocidades moderadas.</p>
 <b>AXIALES</b>	<p>También conocidos como de empuje, consisten en un conjunto de bolas o rodillos alojados en un anillo contenedor entre dos pistas o arandelas. Están diseñados para altas cargas de empuje, y, en algunos casos, para cargas combinadas de empuje alto y radiales medianas.</p>





Tabla 3. Distintos tipos de cojinetes<sup>36</sup>.

<sup>36</sup> Item 33.



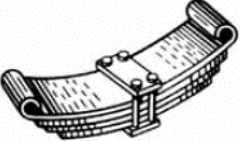


## RESORTES.

Los resortes son componentes mecánicos que se caracterizan por absorber deformaciones considerables bajo la acción de una fuerza exterior, volviendo a recuperar su forma inicial cuando cesa la acción de la misma, es decir, presentan una gran elasticidad. Los resortes se utilizan con gran frecuencia en los mecanismos para asegurar el contacto entre dos piezas, acelerar movimientos que necesitan gran rapidez, limitar los efectos de choques y vibraciones<sup>37</sup>. En la tabla 4 se presentan los resortes más comunes.

TIPO DE RESORTE	DESCRIPCION
 <p data-bbox="250 884 488 934"><b>HELICOIDAL CILINRICO DE COMPRESION.</b></p>	<p data-bbox="524 716 1382 905">Es de uso general, utilizándose en válvulas, engrasadores, amortiguadores. Está formado por un hilo de acero de sección redonda o cuadrada, arrollado en forma de hélice cilíndrica a derecha con paso uniforme. Trabaja tratando de extenderse en la dirección de su eje, oponiéndose a una fuerza externa que lo comprima.</p>
 <p data-bbox="245 1131 496 1182"><b>HELICOIDAL CONICO DE COMPRESION.</b></p>	<p data-bbox="524 1014 1382 1108">En este caso, el hilo de acero se arrolla en forma de hélice cónica a derecha, concebida de manera que, bajo el efecto de una determinada carga, la altura del resorte sea mínima.</p>
 <p data-bbox="240 1352 496 1402"><b>CON LAMINA DE SECCION RECTANGULAR.</b></p>	<p data-bbox="524 1215 1382 1373">El resorte está formado por un fleje de acero de sección rectangular enrollado en forma de hélice cónica. Este tipo de resorte se emplea principalmente para amortiguar fuerzas de choque de gran intensidad en un corto recorrido, por ejemplo en amortiguadores de topes de vagones de ferrocarril.</p>
 <p data-bbox="305 1612 435 1638"><b>DE DISCO.</b></p>	<p data-bbox="524 1430 1382 1619">Es un resorte de compresión formado por arandelas elásticas en forma de tronco de cono (arandelas Belleville), montadas individualmente o en grupo superpuestas. Este tipo de resorte tiene gran aplicación, dada la simplicidad de su composición y las cualidades que reúne. Presentan una gran resistencia a la fatiga.</p>

<sup>37</sup> Aguirre Sponda, Guillermo, "Diseño de Elementos de Máquinas", Ed. Trillas, México (1992).

 <p><b>HELICOIDAL DE TRACCION.</b></p>	<p>Es un resorte helicoidal cilíndrico que ejerce la acción hacia su interior, oponiéndose a una fuerza exterior que trata de estirarlo en la dirección de su eje. En reposo, las espiras de este tipo de resorte están normalmente juntas, por lo que el paso de las espiras es igual al diámetro del hilo. Por su modo de acción, un resorte de tracción debe presentar sus extremos curvados en forma de gancho.</p>
 <p><b>HELICOIDAL DE TORSION</b></p>	<p>Se deforma al ser sometido por sus extremos a un par de fuerzas perpendiculares a su eje. Esta formado por un hilo de acero arrollado en forma de hélice cilíndrica con dos brazos extremos, los cuales se deforman angularmente al estar apoyados en los elementos que tienen el giro relativo.</p>
 <p><b>EN ESPIRAL.</b></p>	<p>Es un resorte de torsión que requiere muy poco espacio axial. Está formado por una lámina de acero de sección rectangular enrollada en forma de espiral. Se utiliza para producir movimiento en mecanismos de relojería, cerraduras, persianas, metros enrollables, juguetes mecánicos.</p>
 <p><b>DE LAMINAS.</b></p>	<p>Este tipo de resorte se conoce con el nombre de ballesta. Está formado por una serie de láminas de acero de sección rectangular de diferente longitud, las cuales trabajan a flexión. Las ballestas se utilizan como resortes de suspensión en los vehículos, realizando la unión entre el chasis y los ejes de las ruedas. Su finalidad es amortiguar los choques debidos a las irregularidades de la carretera.</p>

**Tabla 4.** Algunos tipos de resortes<sup>38</sup>.

### 2. 2. 2 MECANISMOS DE APLICACION DE FUERZAS RADIALES.

Existen dispositivos mecánicos que realizan la función de ejercer fuerza radial al abrir y cerrar. Estos se tomaron para analizar sus partes y comprender su funcionamiento. Posteriormente se eligieron elementos de dichos dispositivos que sirvieron para el diseño y construcción de la montura especial que satisficieran las especificaciones de funcionamiento. El estudio de elementos o componentes mecánicos por separado ayudó a comprender cómo es su comportamiento, qué rol desempeña dentro de un dispositivo y los problemas que se pueden presentar. De la búsqueda realizada se encontraron mecanismos muy usados en la actualidad que emplean el uso de fuerza radial para funcionar. Estos análisis de funcionamiento son presentados a continuación.

<sup>38</sup> [http://aegi.euifig.uniovi.es/ficheros/21\\_m/teo/resortes.pdf](http://aegi.euifig.uniovi.es/ficheros/21_m/teo/resortes.pdf) (2008)

## CHUCK O MANDRIL UNIVERSAL.

El mandril universal (Fig. 26) de tres y seis mordazas sujeta piezas redondas y hexagonales. Sujeta piezas muy rápido y con una precisión de milésimas de pulgada o centésimas de milímetro, esto porque las tres mordazas se mueven simultáneamente. El movimiento es transmitido desde la llave del mandril, esta hace girar un piñón que mueve un engrane cónico sobre el cual esta montada una placa en espiral. El giro de la espiral hace que se muevan las tres mordazas, las cuales tienen ranuras que encajan perfectamente con la espiral. Las mordazas también cuentan con ranuras guías que limitan el movimiento a un solo eje.

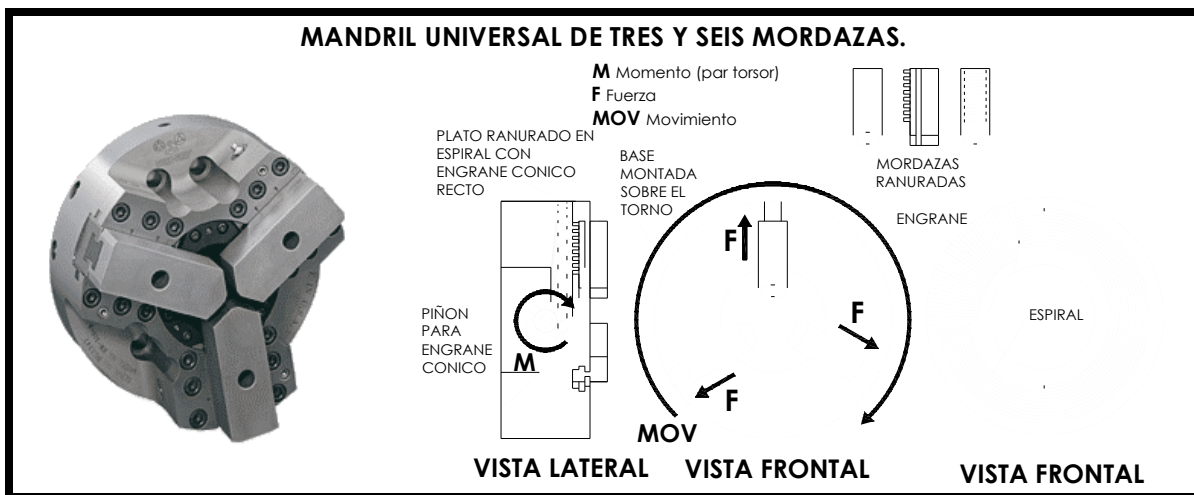


Figura 26. Análisis del mandril universal.

## BROQUERO.

Los broqueros de taladro (Fig. 27) tipo llave son los más comunes. Tienen tres quijadas que entran o salen simultáneamente cuando se gira el casquillo exterior. Esto porque las quijadas tienen un lado con forma de cremallera, y el casquillo cuenta con una rosca interna que encaja con la cremallera. Las brocas se colocan en el broquero y se gira el casquillo exterior manualmente hasta que las quijadas se hayan ajustado sobre el vástago de las brocas. El casquillo se aprieta entonces con la llave (piñón), sosteniendo así las brocas con firmeza y precisión.

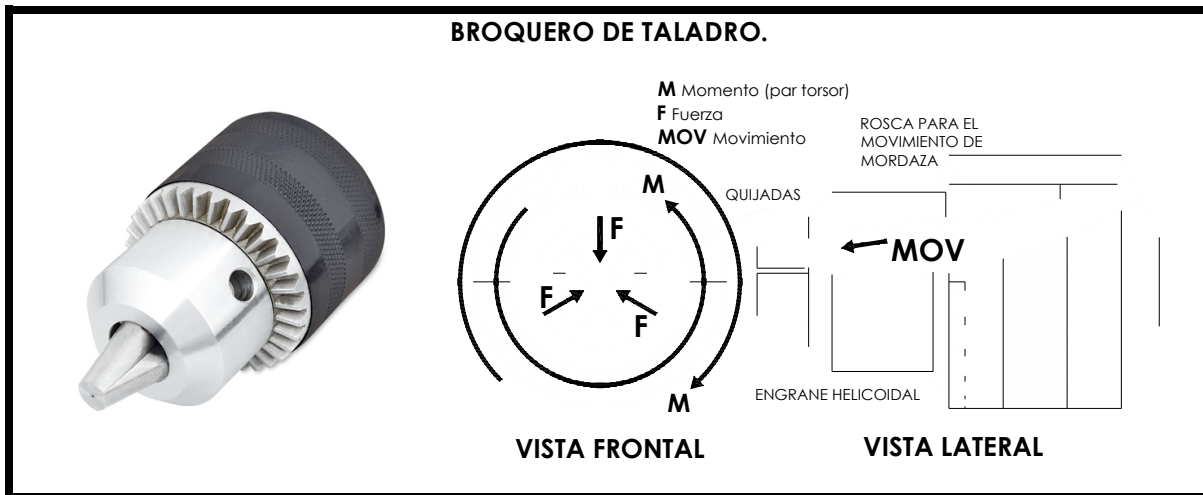


Figura 27. Análisis del broquero.

### BOQUILLAS DE RESORTE.

La boquilla de resorte (Fig. 28) es apretada contra el husillo por una barra de tracción, lo que hace que la boquilla se cierre sobre el zanco de la fresa. La barra de tracción es un tornillo extralargo que es apretado desde el extremo del husillo, la boquilla de resorte tiene una cuerda interna, por lo que al apretar el tornillo sobre la boquilla hace que esta se impulse hacia el interior del husillo. Este sometimiento hace que la boquilla se deforme, disminuyendo los espacios entre ranuras así como también el radio interior inicial. Para evitar que la boquilla patine sobre el husillo se utiliza una cuña con cuñeros entre el husillo y la boquilla.

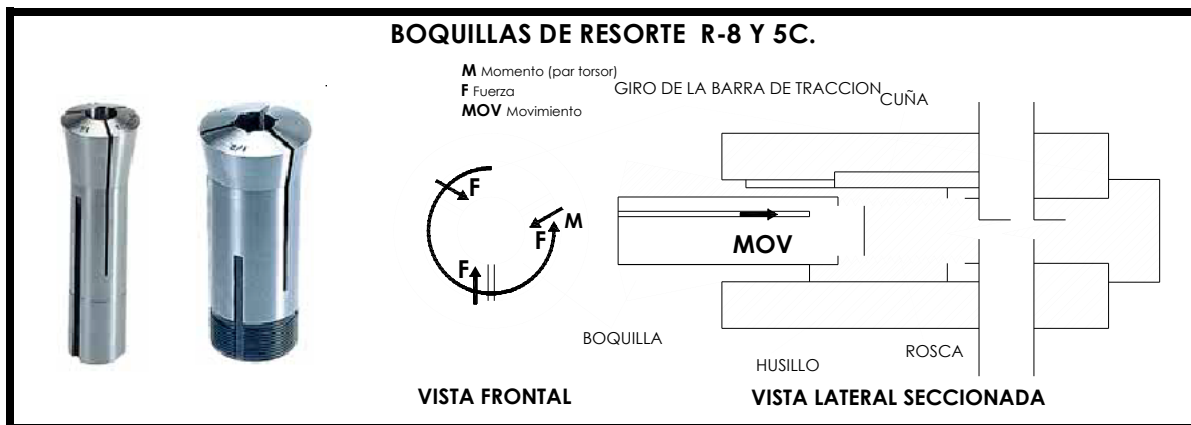


Figura 28. Análisis de las boquillas de resorte.

### BOQUILLA JACOBS.

La boquilla Jacobs (Fig. 29) tiene un rango más amplio que la boquilla de resorte. En vez de una barra de tracción, utiliza una rueda de ajuste al impacto para cerrar la

boquilla sobre la herramienta. Cuando la rueda (tuerca) se gira en dirección de las manecillas del reloj, la boquilla es forzada a un cono, haciendo que apriete sobre la herramienta. Cuando la rueda se gira en contra de las manecillas del reloj, la boquilla se abre y libera la herramienta.

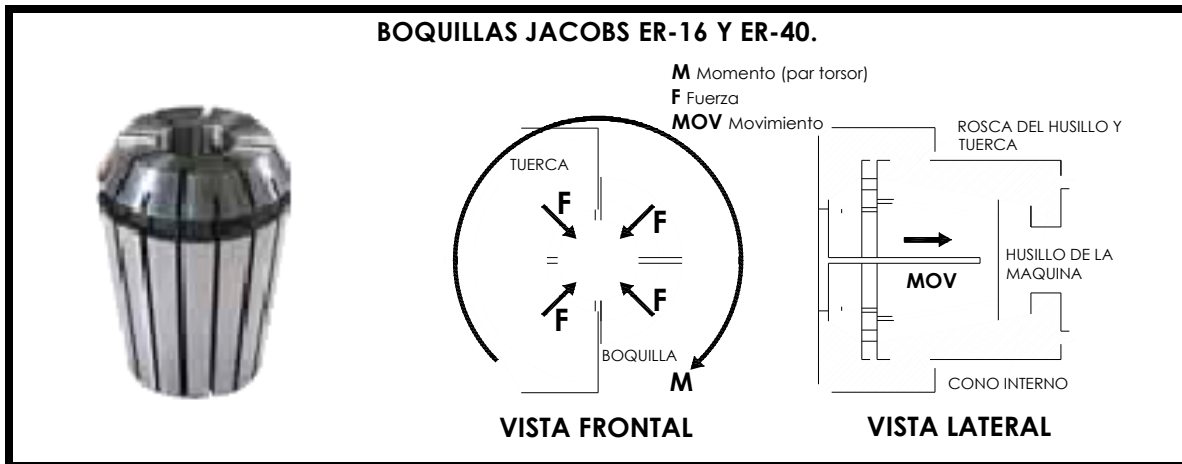


Figura 29. Análisis de las boquillas Jacobs.

### DIAFRAGMA OPTICO.

El diafragma óptico (Fig. 30) es el que ocupan las cámaras fotográficas, este se encarga de regular la cantidad de luz en un sistema óptico. Este diagrama adopta el diseño llamado iris, que consiste en un juego de laminillas metálicas superpuestas que determinan entre sí una abertura de forma aproximadamente circular y diámetro continuamente variable que se controla por medio de un anillo dispuesto en el cuerpo del objetivo. El diseño de las laminillas depende del número de aletas con las que cuenta el diafragma. Estas láminas tienen dos ejes, uno de cada lado. Uno esta montado sobre un barreno y el otro sobre una ranura en arco. Al girar las placas sobre las que están montados los ejes (una a la derecha y otra a la izquierda), el eje sobre la ranura sigue la trayectoria circular del arco, lo que hace que la aleta gire respecto el eje que esta montado sobre el barreno. Todas las aletas giran simultáneamente por lo que la configuración central es simétrica.

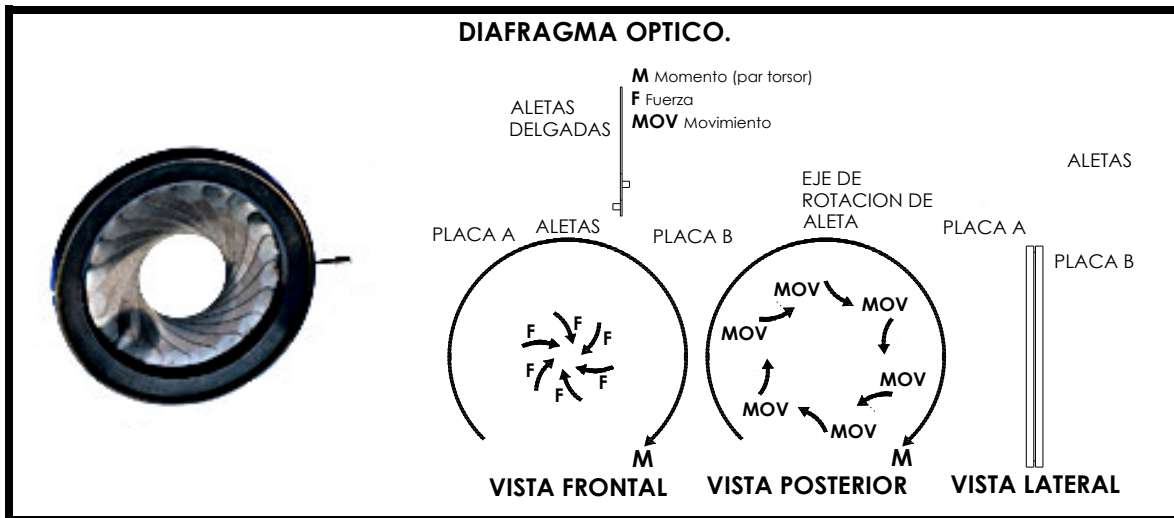


Figura 30. Análisis de diafragma óptico.

**MONTURA OPTICA.**

Esta montura de diámetro variable (Fig. 31) funciona mediante tres puntos de presión que actúan sobre la lente. El sistema funciona mediante tres palancas cuyos ejes de rotación están montados sobre una corona que gira sobre una mayor con el mismo eje de rotación. Sobre las coronas están montados dos postes, uno en cada corona. Estos postes tienen una resistencia que les proporciona un resorte de tracción que une a ambas coronas. Al juntar los postes las coronas giran (una respecto a la otra), de esta forma es como se hacen girar las tres palancas simultáneamente.

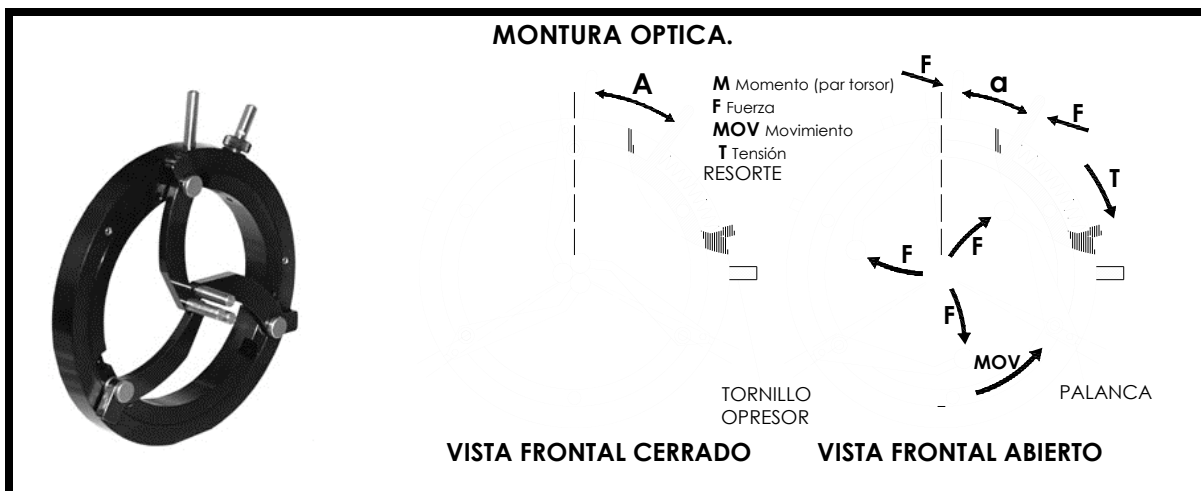


Figura 31. Análisis de montura óptica.

## 2. 3 MATERIALES.

Dependiendo de los materiales elegidos es el proceso de manufactura a seleccionar. Por lo que en esta parte del capítulo se describen los materiales ocupados principalmente para la manufactura de monturas y ensamblajes ópticos, así como también una propuesta de un material que cumpla con las propiedades y características necesarias para la deformación elástica de la lente flexible. Para el estudio de los materiales ocupados se dedujo que únicamente se tenían que estudiar dos tipos de materiales: los metales y los elastómeros (Fig. 32). Dentro de los metales específicamente el aluminio, puesto que en su mayoría, los componentes mecánicos estudiados están fabricados en aleaciones de aluminio. Conocer las características y propiedades de este metal proporciona datos significativos para la realización de diseños y análisis de los mismos. La otra familia de materiales son los elastómeros, específicamente el elastómero Sylgard 184<sup>®</sup> que cuenta con propiedades y características que lo hacen ideal para aplicaciones de óptica adaptativa. Cabe mencionar que se ha venido trabajando con este material dentro de la UTM.

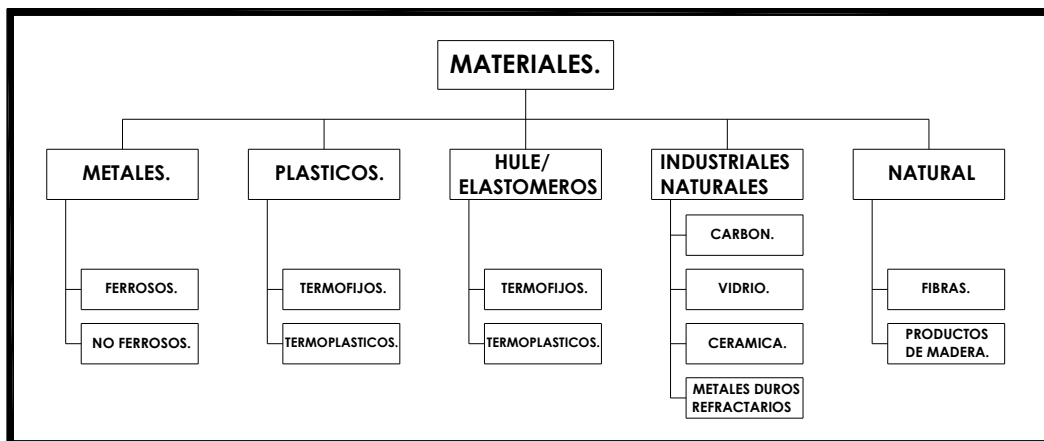


Figura 32. Familias de los materiales.

### 2. 3. 1 METALES.

Los metales se clasifican en aleaciones ferrosas y aleaciones no ferrosas (Tabla 5). Las primeras están compuestas principalmente de hierro al cual se le agregan otros materiales, lo que le proporciona características y propiedades específicas (también influyen los procesos). Las aleaciones no ferrosas generalmente se usan cuando las propiedades requeridas son diferentes en cuanto a peso, conductividad térmica,

conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, maquinabilidad, temperatura de fusión, etc<sup>39</sup>.

METAL	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	RESISTENCIA A LA TENSION (N/mm <sup>2</sup> )	T. DE FUSION (°C)
<b>ALEACIONES FERROSAS</b>			
Hierro	7.87	1379	1538
<b>ALEACIONES NO FERROSAS</b>			
Aluminio	2.7	572	660.4
Berilio	1.85	379	1290
Cobre	8.93	1034	1084.9
Plomo	11.36	67	327.4
Magnesio	1.74	379	650
Níquel	8.9	1241	1453
Titanio	4.51	1103	1668
Tungsteno	19.25	1034	3410
Zinc	7.13	517	420

**Tabla 5.** Propiedades de los metales.

## ALUMINIO.

El aluminio tiene una densidad de 2.7 g/cm<sup>3</sup>, la tercera parte de la densidad del acero y un módulo de elasticidad de 68965 N/mm<sup>2</sup>. Aunque las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la tensión relativamente bajas en comparación con las del acero, su resistencia específica, es decir, su relación resistencia-peso es excelente, a menudo se utiliza cuando el peso es un factor de importancia, como en aeronaves y aplicaciones automotrices<sup>39</sup>.

Las propiedades benéficas del aluminio son alta conductividad eléctrica y térmica, comportamiento no magnético y excelente resistencia a la oxidación y a la corrosión. Cuenta con una buena resistencia al ambiente gracias a la película de alúmina que se forma en su superficie de forma espontánea y lo protege de los entornos corrosivos<sup>39</sup>.

Es un material maquinable, a diferencia del hierro los desbastes y acabados se llevan menor tiempo máquina. La mayoría de las aleaciones de aluminio pueden ser cortadas a alta velocidad, resultando un buen acabado superficial y una larga duración de la herramienta. Generalmente se usa líquido de corte cuando se hacen grandes trabajos de corte y avance<sup>40</sup>.

<sup>39</sup> Askeland, Donald R., "Ciencia e ingeniería de los materiales", Ed. International Thompson Editores, 3ra ed. México (1982).

<sup>40</sup> Item 33.



### 2. 3. 2 ELASTOMEROS.

Los elastómeros son materiales que regresan a su forma original después de haber sido estirados hasta varias veces su longitud. Estos tienen la capacidad de deformarse elásticamente en grandes cantidades sin cambiar de forma permanentemente. Los elastómeros se dividen en termoplásticos y termofijos. Los termoplásticos al ser calentados a temperaturas elevadas, se ablandan y se conforman por flujo viscoso, estos se pueden reciclar con facilidad. Los termofijos no tienen una temperatura de fusión fija y es difícil de reprocesarlos<sup>41</sup>.

#### SYLGARD 184®.

Este silicón elastómero está diseñado específicamente para proteger contra humedad, ataque ambiental, choques mecánicos (vibraciones) y térmicos especialmente donde la claridad óptica es requerida. Como aplicaciones típicas incluyen: encapsulado de amplificadores, bobinas, conectores, placas de circuitos, celdas solares y transformadores. Puesto que el silicón consiste de dos compuestos: un agente base y un catalizador, se le considera como un termofijo epóxico, ya que estos utilizan un agente para acelerar el proceso de curado. Después del curado se convierte en un elastómero flexible transparente. En la tabla 7 se muestran las propiedades y características del silicón elastómero Sylgard 184®, unas proporcionadas por el fabricante y otras determinadas mediante pruebas realizadas en la UTM.

PROPIEDAD	CARACTERISTICAS	CONSECUENCIAS
Optica	Transparente; UV longitud de onda de corte, 240 nm. Índice de refracción 1.4157. Absorción del 0.04% y transmisión arriba del 90% en la región visible.	Detección óptica de 240 a 1100 nm. Transparente en la región visible. Siendo homogéneo, lineal e isotrópico.
Eléctrica	Aislante; voltaje de colapso o falla, $2 \times 10^7$ V/m	Permite incrustación de circuitos; presenta fallas al abrir conexiones
Mecánica	Modulo de Young 1.2 MPa, Razón de Poisson 0.46, Módulo cortante 411 Kpa, Límite de tracción 1.9 Mpa, Límite elástico 700 Kpa, Densidad 0.982 g/mL	Adopta la forma de la superficie; Facilidad de moldeado, y es reversible cuando se actúa sobre el al deformarlo
Térmica	Aislante; conductividad térmica, 0.2 W/(m·K); Coeficiente de expansión térmica, 310 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$	Puede ser usado como aislante térmico; no permite disipación de calor resistivo de electroforética separación

<sup>41</sup> Item 39.

Interfacial	Baja energía libre superficial ~ 20/erg/cm <sup>2</sup> , 100% de elongación	Réplicas son fácilmente removidas del molde; sellado reversible en materiales que contienen soluciones acuosas en canales
Permeabilidad	Impermeable al agua; permeable a gases y solventes orgánicos no polares	Permite transportar gas a través de grandes cantidades de material; incompatible con muchos solventes orgánicos
Reactividad	Inerte; puede ser oxidado por exposición a un plasma; Bu <sub>4</sub> N <sup>+</sup> F <sup>-</sup> ((TBA)F)	No reactivo con muchas sustancias químicas; la superficie puede ser grabada; puede ser modificado para ser hidrofílico y también reactivo con silicón e hidrógeno; grabado con (TBA)F puede alterar la topografía de la superficie
Toxicidad	No toxico	Puede ser implantado en vivo; soporta células mamíferas en crecimiento

**Tabla 6.** Características y propiedades del material Sylgard 184<sup>®42</sup>.

Para la polimerización del elastómero, se mezcla el agente base y el catalizador en proporción de 10:1. Al mezclar la base y el catalizador se obtiene una mezcla con consistencia de aceite de motor. Este líquido se seca dependiendo de las condiciones del ambiente, pero para acelerar el proceso de secado se recomienda aumentar la temperatura bajo condiciones medibles. Algunos ciclos de curado sugeridos son: 25 °C por 24 horas, 65 °C por 4 horas, 100 °C por 1 hora o 150 °C por 15 minutos.

## 2. 4 PROCESOS.

El procesamiento de los materiales produce la forma deseada de un componente a partir de un material inicialmente sin forma. El tipo de procesamiento a utilizar dependerá, por lo menos de manera parcial, de las propiedades del material. En la figura 33 se presenta la clasificación de los procesos de manufactura que depende del tratamiento de la geometría inicial a transformar. Los metales, por ejemplo, se pueden procesar vertiendo metal líquido en un molde (conformado en estado líquido), uniendo piezas de metal mediante soldadura (unión térmica), conformado el metal sólido mediante laminado (conformado estado sólido) o eliminando material excedente

<sup>42</sup> A. Santiago-Alvarado, S. Vázquez-Montiel, J. González-García, B. I. G Licona-Moran, J. A. Rayas-Álvarez, y G. Castro-González, "Fabricación y caracterización de membranas elásticas de PDMS para lentes líquidas con longitud focal variable (LLFV)", *Opt. Pura Apl.* 41 (4) 381-388 (2008).

mediante el maquinado (corte con viruta). Los elastómeros se pueden conformar mediante inyección en moldes (conformado en estado líquido)<sup>43</sup>.

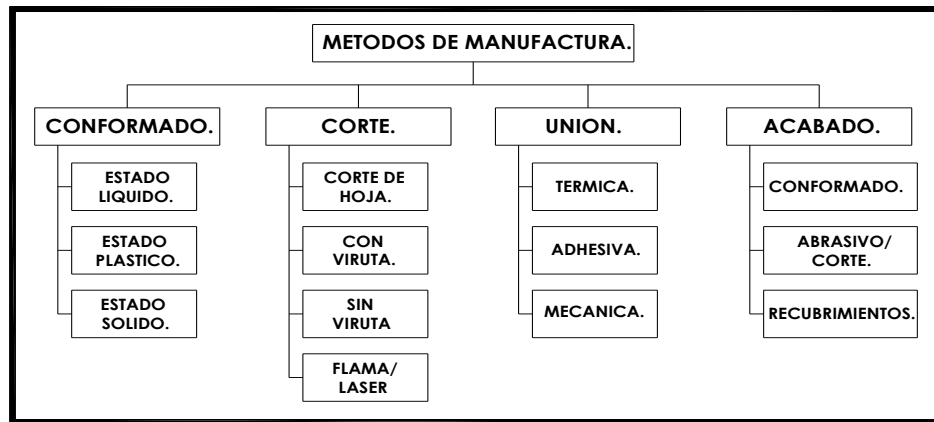


Figura 33. Métodos de manufactura<sup>44</sup>.

Los métodos de procesamiento designados para la manufactura del modelo son elegidos de acuerdo a las propiedades de los materiales y el tipo de geometría requerida en el diseño: la utilización de máquinas-herramienta para el aluminio e inyección en molde para el elastómero Sylgard 184<sup>®</sup>.

#### 2. 4. 1 MAQUINAS-HERRAMIENTA.

Las máquinas-herramienta por lo general son máquinas de potencia para corte o conformación de metales que se utilizan para darles forma. Las máquinas-herramienta se encuentran en la rama metalmecánica, y estas se dividen en tres clases principales: máquinas productoras de viruta, máquinas no productoras de viruta y las máquinas de nueva generación. Las de interés son máquinas-herramienta de corte con viruta (Fig. 34), cuyo desempeño se determina por lo general en función de su velocidad de remoción de metal, su exactitud, y su capacidad de repetición<sup>45</sup>.

<sup>43</sup> Item 39.

<sup>44</sup> Item 23.

<sup>45</sup> Item 33.

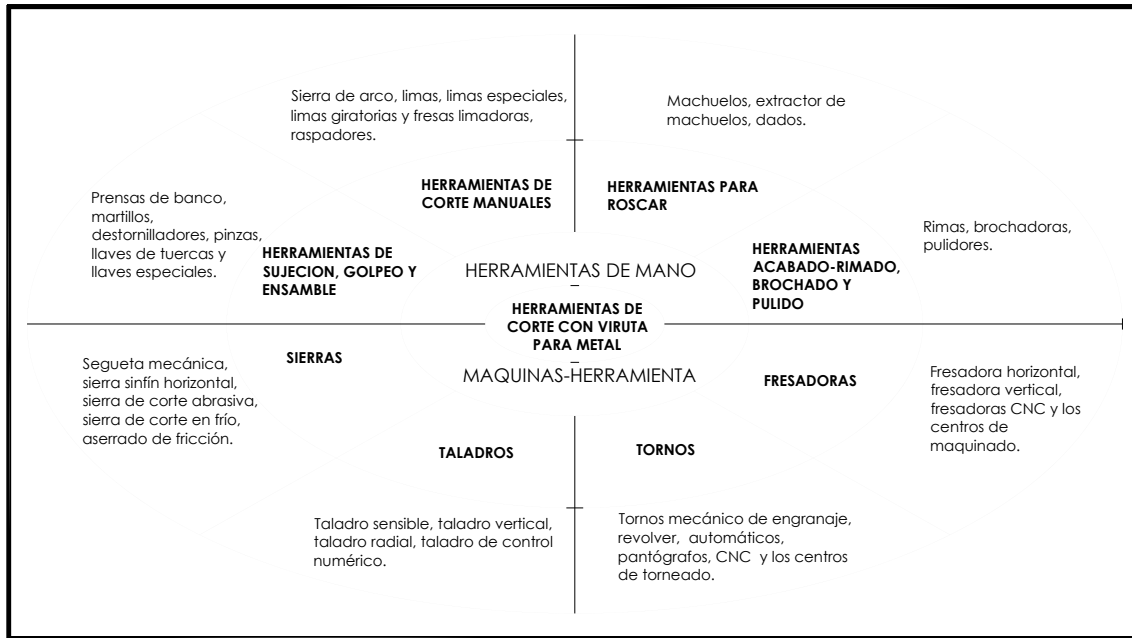


Figura 34. División de las principales herramientas de corte con viruta para metal.

Un taller mecánico general contiene cierta cantidad de máquinas-herramienta convencionales básicas para la producción de una variedad de componentes de metal. Máquinas como el taladro, torno y fresadora son las que se encuentran dentro del taller de metalmecánica de la UTM.

**TALADRO.**

El taladro se utiliza principalmente para producir perforaciones redondas. Los taladros van desde el tipo simple manual, hasta las más complejas máquinas automáticas de control numérico (CNC) utilizadas para fines de alta producción (Fig. 35). La función de un taladro es sujetar y hacer girar la herramienta de corte (generalmente un broca en espiral) de forma que pueda hacer una perforación en una pieza de metal u otro material<sup>45</sup>.

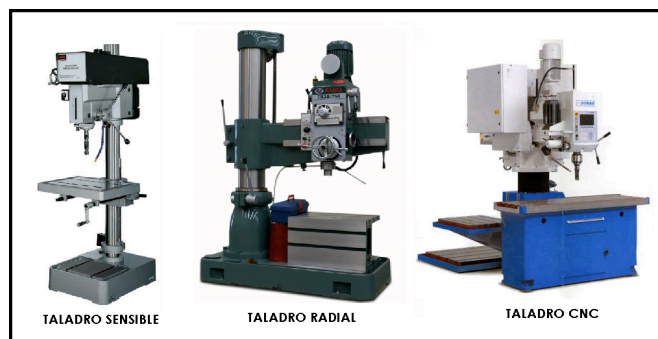
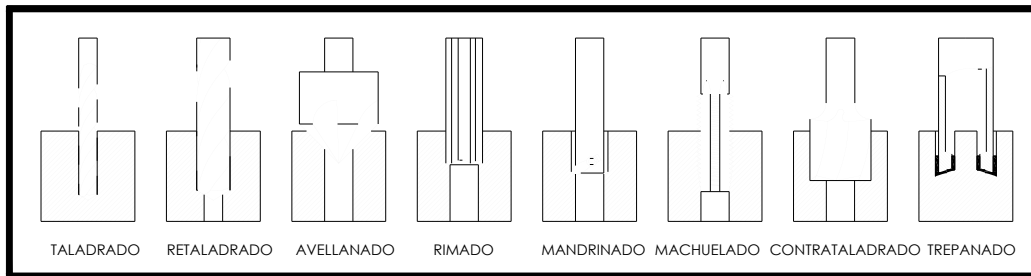


Figura 35. Algunos tipos de taladros.

Los taladros pueden utilizarse para realizar una variedad de operaciones, además de taladrar una perforación redonda. Las más importantes se presentan en la figura 36.



**Figura 36.** Principales operaciones con el taladro.

Las herramientas para el taladro (Fig. 37) son de corte cilíndrico con filos múltiples que cortan inicialmente por la punta. Las herramientas son forzadas hacia la pieza de trabajo, manual o automáticamente.



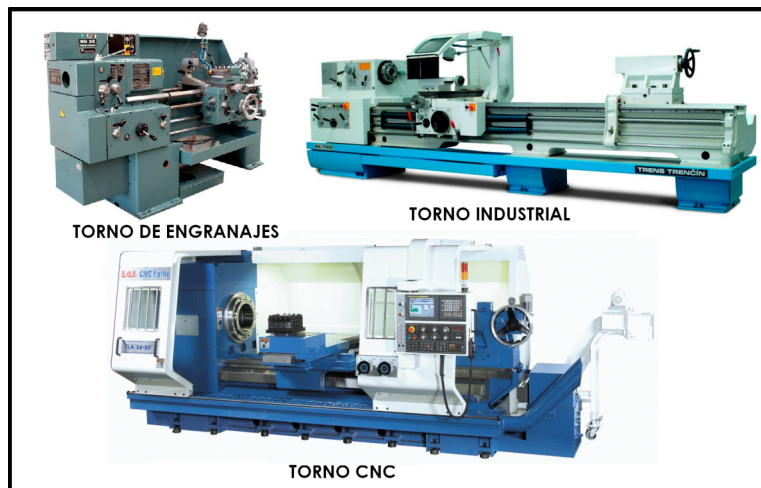
**Figura 37.** Herramientas para operaciones del taladro.

Se utiliza una amplia variedad y tamaños de herramientas para cortar diversos metales; igualmente se requiere de un amplio de velocidades para que la herramienta corte de manera eficiente. Las revoluciones por minuto (rpm) para maquinar aleaciones de aluminio utilizando herramientas de acero de alta velocidad se determinan mediante el diámetro de la herramienta, tomando en cuenta que la velocidad para el aluminio es de 60 m/min. Para las velocidades de avance, una regla general es que estas aumenten conforme aumenta el tamaño de la herramienta. La razón de crecimiento

es de 0.017 mm/rev por cada milímetro de incremento en el diámetro de la herramienta<sup>46</sup>.

## TORNO.

El torno se utiliza para producir piezas redondas. La pieza de trabajo es sostenida por un dispositivo de sujeción montado en eje del torno, se hace girar contra la herramienta de corte, lo que produce una forma cilíndrica. La producción moderna ha provocado el desarrollo de muchos tipos especiales de tornos (Fig. 38), como el mecánico de engranajes, revolver automático, pantógrafo, de control numérico y ahora los centros de torneado controlados por computadora<sup>47</sup>.

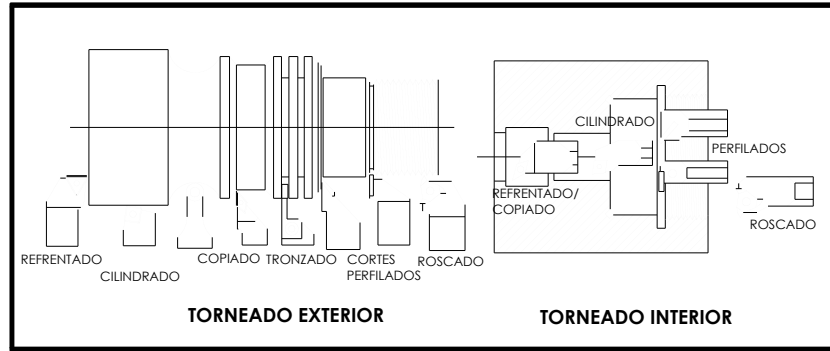


**Figura 38.** Algunos tipos de tornos.

Con los aditamentos adecuados, el torno puede emplearse para operaciones de torneado, hacer conos, cortar tornillos, refrentado, taladrado, mandrinado, esmerilado y pulido. Estas operaciones se pueden dividir principalmente en operaciones de torneado exterior e interior (Fig. 39).

<sup>46</sup> Item 33.

<sup>47</sup> Item 33.



**Figura 39.** Principales operaciones con el torno.

Los cortadores o buriles para torno (Fig. 40) se fabrican generalmente de cinco materiales: acero de alta velocidad (HSS), aleaciones coladas o fundida (estelita), carburos cementados, cerámicos y cermets. Las propiedades que poseen estos materiales son diferentes, y la aplicación de cada uno depende del material a maquinar y el estado de la máquina<sup>48</sup>.



**Figura 40.** Herramientas para torneado.

Para maquinar aleaciones de aluminio utilizando un buril de HSS, la circunferencia de la pieza de trabajo debe de estar pasando por la herramienta a una velocidad de 61 m/min para desbaste, 93 m/min para acabado y 18 m/min para roscado. Conociendo el diámetro de la pieza se pueden definir las rpm a las que debe girar el eje del torno. Para el avance por revolución se recomiendan dos rangos: 0.4 - 0.75 mm para desbaste y 0.13 - 0.25 mm para acabado. En cuanto a la profundidad de corte, si es posible solo se deben considerar dos cortes, uno de desbaste y uno de acabado. Si debe eliminarse mucho material, el corte de desbaste debe ser tan profundo como sea posible, un rango aceptable de profundidad de corte es de 0.76 a 1 mm. Y en cualquier caso para una profundidad de corte para acabado esta no debe ser menor que 0.13 mm. Todas las anteriores condiciones de maquinado dependerán en su

<sup>48</sup> Item 33.

mayoría del estado de la máquina, la rigidez de la pieza de trabajo, el tipo y la forma de la herramienta a utilizar.

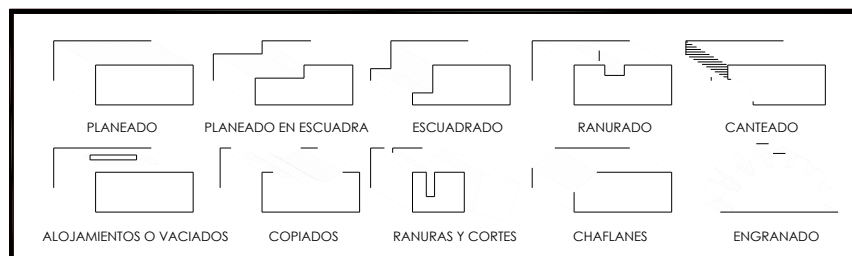
## FRESADORA.

Las máquinas fresadores (Fig. 41) son de las herramientas más útiles y versátiles. Estas utilizan una o más fresas giratorias que tienen uno o varios filos cortantes. La pieza de trabajo, que debe quedar sujeta en una prensa de tornillo, o con un aditamento o accesorio para fijar a la mesa, es avanzada o alimentada hacia la herramienta de corte giratorio.



**Figura 41.** Algunos tipos de fresadoras.

Equipadas con los accesorios apropiados, las máquinas de fresado son capaces de llevar a cabo una gran cantidad de operaciones (Fig. 42). Las fresadoras no sólo se utilizan para el fresado de superficies planas o de forma irregular, sino también para el corte de engranes y roscas, y para operaciones de torneado interno (mandrinado), escariado y ranurado.



**Figura 42.** Operaciones de fresado.

Una fresa o cortador para fresado (Fig. 43) es una herramienta multifilos con varias aristas cortantes (dientes) igualmente espaciadas entre si en su periferia circular. Cada diente puede considerarse como una herramienta de corte de punta simple, y debe tener ángulos de ataque y de alivio adecuados para cortar con eficacia.





Figura 43. Herramientas para fresado.

Uno de los factores de mayor importancia que afectan la eficiencia de una operación de fresado es la velocidad de la fresa. Cuando se trabaja una pieza en una fresadora, la fresa debe girar a un número específico de rpm, dependiendo de su diámetro, para lograr la velocidad de corte apropiada. Para calcular estas rpm se establecen velocidades de corte a razón de m/min y puesto que el material a fresar es aluminio se establecen valores de 150 – 300 m/min para fresas de acero de alta velocidad y de 300 – 600 m/min para fresas de carburo. El avance dependerá del tipo de fresa a utilizar. En este caso fresas frontales, que para trabajo en aluminio se recomiendan los siguientes avances por diente: 0.28 mm/rev para fresas de HSS y 0.25 mm/rev para fresas de carburo. Los cortes de desbaste deben ser profundos, con un avance tan grande como lo permita la máquina y la pieza, y los cortes de acabado deberán ser de por lo menos 0.4 mm, cortes más finos desafilan la fresa<sup>49</sup>.

#### 2. 4. 2 CONFORMADO DE RESINAS.

Los procesos de conformado en estado líquido para plásticos (Fig. 44) son análogos a los procesos de fundición de metales. Los termofijos se manejan como una mezcla semejante a la masa para repostería que se coloca manualmente en el molde<sup>50</sup>. Puesto que el elastómero Sylgard 184® es un termofijo del tipo epoxi, a continuación se presentan los procesos de manufactura utilizados para su conformado.

<sup>49</sup> Item 33.

<sup>50</sup> Item 23.

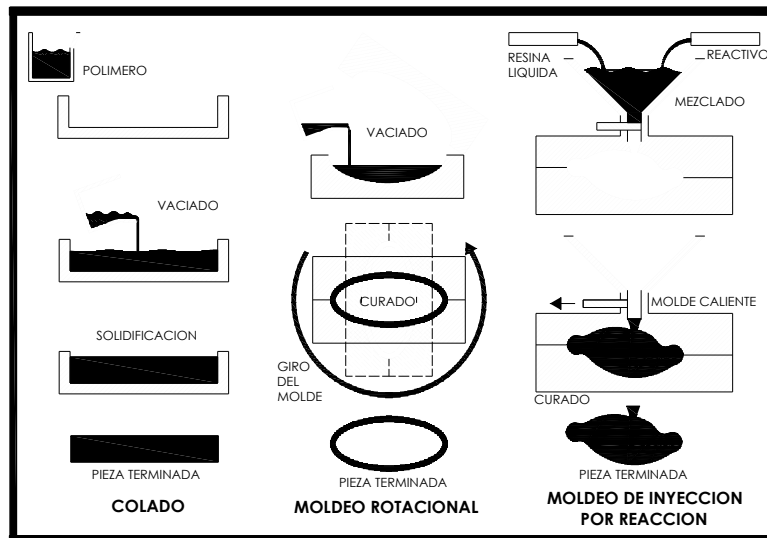


Figura 44. Procesos de conformado de termofijos epoxi.

## COLADO.

El colado es un proceso de producción limitado, utilizado con frecuencia para la evaluación de las partes o la preproducción de las piezas. Los moldes pueden ser de material rígido o flexible. El colado se efectúa en general con una mezcla de dos partes de un monómero y un catalizador, y pigmentos, rellenos y refuerzos como aditivos. Los materiales termofijos generan su propio calor por la reacción con el catalizador durante la polimerización. Los moldes pueden ser placas de vidrio, para producir hojas de plástico gruesas, o bandas de acero inoxidable para colado continuo de hojas más delgadas<sup>51</sup>.

## MOLDEO ROTACIONAL.

Un proceso especial de colado es el moldeo centrífugo, en el cual el polímero fundido se vacía en un molde que gira sobre dos ejes. La acción centrífuga empuja al polímero contra las paredes del molde, produciendo una forma delgada<sup>52</sup>.

## MOLDEO DE INYECCION POR REACCION (RIM, reaction injection molding).

Es un proceso en el cual una resina y un catalizador se combinan y reaccionan químicamente en la cavidad del molde. Debido a que las presiones son bajas, los costos de moldeo son bajos. Como en la mayoría de los procesos termofijos, el espesor de la pared puede variar, y únicamente el fondo del lado del molde es parejo<sup>52</sup>. Los

<sup>51</sup> Item 23.

<sup>52</sup> Item 39.

elastómeros termofijos en forma de resina líquida, primero se inyectan en una mezcladora y a continuación directamente en un molde caliente para producir una forma. El conformado y curado ocurren de manera simultánea dentro del molde. En el moldeo reforzado de inyección por reacción, un material reforzante, en forma de partículas de fibras cortas se introduce en la cavidad del molde y es impregnado por las resinas líquidas para producir un compuesto.

# 3

# DISEÑO

# OPTO-MECANICO.

## 3.1 INTRODUCCION.

En los capítulos anteriores se definieron cuales son los problemas a solucionar, los elementos con los que cuenta y los primeros requerimientos de diseño. En este capítulo se desarrolla la fase creativa mediante la cual se diseñan todos los elementos opto-mecánicos necesarios para la posterior construcción del modelo. Dadas las características del proyecto, se debe definir en que consiste el diseño mecánico y el opto-mecánico. Se define al diseño mecánico como el diseño de objetos y sistemas de naturaleza mecánica; piezas, estructuras, mecanismos, máquinas, dispositivos e instrumentos diversos. En su mayor parte, el diseño mecánico hace uso de las matemáticas, las ciencias de uso de materiales y las ciencias mecánicas aplicadas a la ingeniería<sup>53</sup>. Se puede ampliar la definición para deducir que el diseño opto-mecánico tiene uno o más conceptos sobre el elemento óptico a desarrollar y una especificación cuantitativa que defina el funcionamiento de la aplicación, los requerimientos del elemento óptico y los objetivos a alcanzar; un factor de gran influencia en el proceso del diseño opto-mecánico es el grado de madurez de la tecnología a ser aplicada<sup>54</sup>.

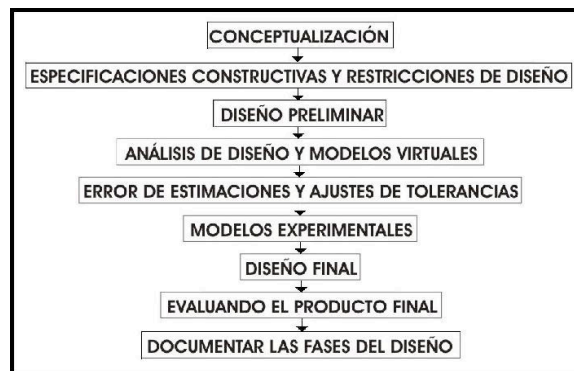
En esta etapa de creatividad, se utiliza a la par una sub-metodología para el diseño opto-mecánico, personalizada para cada elemento a diseñar (montura, lente, carcasa). La sub-metodología a usar está diseñada exclusivamente para la resolución de problemas de diseño opto-mecánico. Esta consta de diez etapas de las cuales dada la flexibilidad de la metodología se pueden escoger los pasos necesarios para

---

<sup>53</sup> Item 32.

<sup>54</sup> Item 7.

determinada parte del proyecto. Los pasos de la metodología para diseño opto-mecánico son mostrados en el diagrama de flujo de la figura 45.



**Figura 45.** Versión completa de la metodología de Yoder para diseño opto-mecánico<sup>55</sup>.

Primero se diseñará la montura especial que generará esfuerzos radiales sobre el borde de la lente flexible, para ellos se hará uso de los análisis de monturas y mecanismos hechos en la etapa de recopilación de datos. Posteriormente se diseñará la lente flexible adecuándola a las dimensiones y funcionamiento de la montura previamente definida. En el proceso de diseño de la lente, será necesario diseñar moldes de vaciado dadas las propiedades físicas y químicas del material con el cual estará hecha la lente. Finalmente los elementos diseñados y los que se comprarán serán integrados en una carcasa donde estarán asentados y distribuidos de tal forma que simulen el funcionamiento del ojo humano. Para ello es necesario que el modelo proyecte características similares a las del ojo humano, y esto se logrará mediante requerimientos funcionales y estéticos a desarrollar en la metodología de diseño opto-mecánico.

## 3. 2 MONTURA.

### 3. 2. 1 ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE DE LA MONTURA.

Dos de los factores más importantes en el proceso del diseño opto-mecánico son las especificaciones constructivas y las restricciones de diseño. De los cuales son considerados: requerimientos constructivos; limitaciones de tamaño, forma o altura; interfaces (óptica, mecánica, eléctrica); ambiente (temperatura, presión, vibración, humedad, acústica); fuerza de cargas (estáticas y dinámicas); requerimientos de vida

<sup>55</sup> Item 7.

útil y mantenimiento; condiciones de emergencia y sobrecarga; centro de gravedad; instrumentos para la interfaz humana; requerimientos y restricciones eléctricas; materiales; requerimientos de protección (corrosión, erosión); requerimientos de envase y embalaje. Examinar estos factores (u otros que quizá sean únicos en cada diseño) ayudará a crear un producto satisfactorio<sup>56</sup>.

Extrayendo los factores más importantes para el diseño se desarrolla la tabla 7, que es elaborada como un diagrama de afinidad. Este diagrama permite desglosar y especificar características técnicas que pueden ayudar a delimitar las propuestas. Debido a que la montura es un prototipo experimental es necesario tener en cuenta los requerimientos mecánicos y constructivos que harán posible su fabricación. Puesto que el proyecto se desarrolla por completo en la UTM es necesario delimitar el diseño anteponiendo las herramientas con las que se cuenta.

<b>¿Cuáles son los requerimientos de la montura de lente adaptativa para la utilización a nivel laboratorio?</b>	
<b>Características del sistema para aplicación de fuerza radial.</b>	
<b>Requerimientos constructivos.</b>	
<b>Mayoría de piezas compradas.</b>	Piezas Standard y comerciales de fácil adquisición.
<b>Geometría maquinable con el mínimo de pasos.</b>	De preferencia geometría simétrica maquinable utilizando las herramientas de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Se puede escoger formas complejas ya que se cuenta con una fresadora de control numérico, siempre y cuando estas estén limitadas a los tres ejes de trabajo de la máquina.
<b>Tamaño de piezas adecuadas al tipo de herramental.</b>	Maquinado utilizando cortadores y buriles standard y comerciales que permitan a su vez tolerancias aceptables y medibles con el herramental de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. En este caso como cortador mínimo de 1/16 plg. y tolerancias de +/- 0.05 mm.
<b>Requerimientos de ensamble y mantenimiento.</b>	
<b>Mínimo de piezas.</b>	Para que los tiempos de manufactura sean los más cortos, se tomará en cuenta las herramientas y el proceso a utilizar.
<b>Facilidad de ensamble.</b>	Un ensamble sencillo sin utilizar maquinaria para ello. Que sea sencillo de manipular para darle mantenimiento.
<b>Características de funcionamiento del sistema.</b>	
<b>Requerimientos de interfaz humana</b>	
<b>Manipulación con la mano.</b>	Rango de tamaño de las propuestas entre los 50 y 100 mm.
<b>Fuerza mínima para funcionamiento.</b>	Transmisión de movimiento con la mano y si es posible hacerlo automático.
<b>Precisión.</b>	Que la transmisión de movimiento sea medible y ajustable para poder modificar los parámetros ópticos de la lente adaptativa de manera más exacta.
<b>Requerimientos para un mínimo de afectaciones ambientales.</b>	
<b>Que sea hermético.</b>	Sistemas cerrados para evitar mayormente el fallo por impurezas en las piezas.
<b>Que no sea corrosivo.</b>	Para utilización en el laboratorio la mejor elección es el aluminio y acero inoxidable.

**Tabla 7.** Diagrama de afinidad para identificar los requerimientos de la montura.

<sup>56</sup> Item 7.

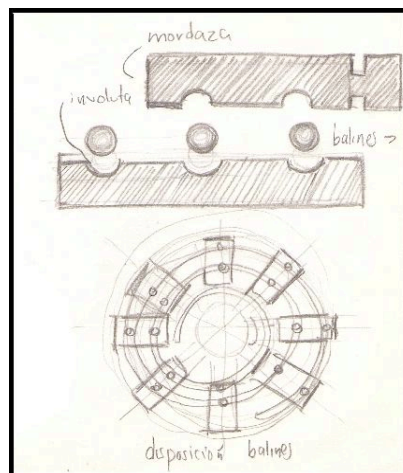
Contando con estos requerimientos posteriormente se podrán evaluar las propuestas y elegir la que más satisfaga al diseño.

### 3. 2. 2 DISEÑOS PRELIMINARES DE LA MONTURA.

Tomando en cuenta la investigación documental, junto con los requerimientos y especificaciones es posible comenzar a diseñar elementos y dispositivos preliminares. Esta fase inicia con el desarrollo de propuestas que en la siguiente etapa se depurarán, analizarán y se seleccionará una de ellas.

#### PROPUESTA 1

Basada en el mandril universal de tres y seis mordazas, se propone una espiral que al girar mueva las mordazas ranuradas. Se consideran ocho mordazas para deformaciones simétricas e igualmente espaciadas. Esta propuesta aplica el principio mediante el cual funcionan los cojinetes de bola. Utilizar balines evita los rozamientos al mínimo y la fuerza necesaria para su funcionamiento es menor. Se usa una espiral ranurada sobre una superficie plana, la cual contiene la mitad del volumen de los balines. La otra mitad está contenida en perforaciones cóncavas hechas en las mordazas. La utilización de balines disminuye la resistencia del sistema para su funcionamiento (Fig. 46).



**Figura 46.** Propuesta de espiral ranurada, los balines están sometidos a fuerzas cortantes.

## PROPUESTA 2

Esta propuesta se basa en la anterior. El diseño de las mordazas se propone prismático y sin geometría compleja para una fácil construcción (Fig. 47). La lente adaptativa es sujeta por uno de los extremos de la mordaza, en este caso se propone un diseño de tipo gancho que permite que el material de la lente no se separe de la mordaza por la aplicación de las fuerzas radiales. La espiral gira sobre el mismo eje que la pieza que contiene las mordazas, esto utilizando un engrane tipo sinfín que mediante un gusano mueve la espiral con gran precisión.

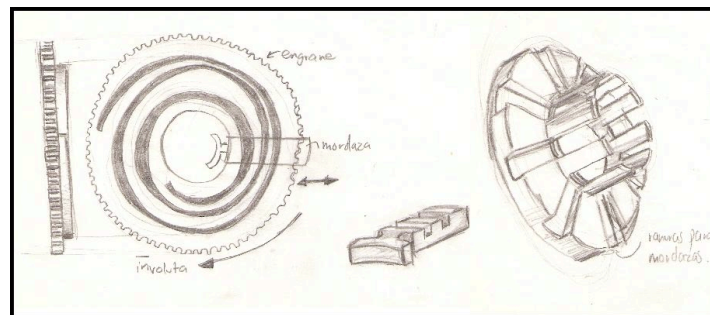


Figura 47. Desarrollo de propuesta con espiral y mordazas.

## PROPUESTA 3

Mismo mecanismo de mordazas pero con diferente geometría. En este caso las mordazas son cilíndricas dándole ventajas al sistema como fácil construcción (por su mayoría de piezas simétricas y cilíndricas), hermeticidad y más área de contacto en donde va sujeta la lente. La espiral gira mediante un engrane cónico recto que esta en la parte trasera de la espiral (Fig. 48).

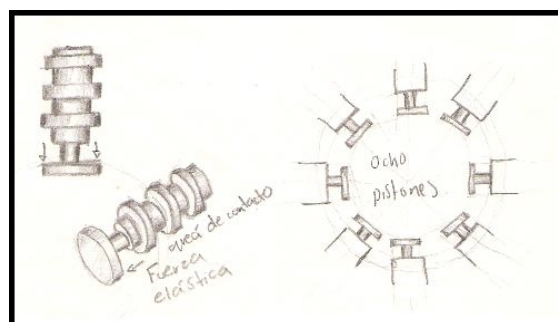


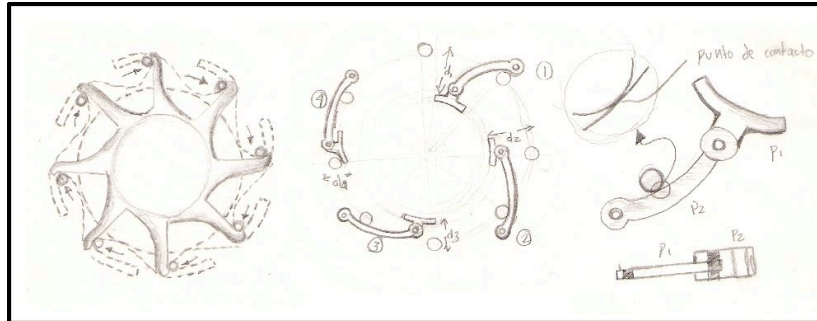
Figura 48. Se proponen mordazas cilíndricas para hermeticidad y fácil fabricación.

## PROPUESTA 4

Sistema basado en los diafragmas y monturas ópticas. Se utilizan puntos de contacto para varias palancas que son sostenidas por un eje y en el otro extremo va sujeta la



lente (Fig. 49). La resistencia la proporciona el material por lo que al momento de girar el punto de contacto, en la palanca cambia su ángulo respecto al eje y el punto de contacto se desliza sobre la misma palanca. Para que este sistema funcione correctamente, la lente elástica debe ejercer permanente una resistencia radial hacia el eje óptico, para que las palancas (mordazas) queden tensas antes de aplicarle fuerza y tratar de deformar la lente.



**Figura 49.** Se proponen puntos de contacto para mover las palancas.

### PROPUESTA 5

Variación de la propuesta 4 en cuanto a medidas y disposición de elementos. La diferencia está en que la propuesta 4 utiliza piezas ranuradas para que una contenga a la otra, y en esta propuesta se encuentren superpuestas lo que ayuda a disminuir las medidas y el tamaño del sistema completo.

### PROPUESTA 6

Utilizando engranes rectos y cremalleras se propone crear un sistema totalmente relacionado, en el cual el movimiento de una mordaza mueve todas (Fig. 50). Además de la concentricidad respecto a las fuerzas radiales. En este caso se proponen los engranes rectos y pequeños que pueden ser de fácil adquisición, lo que se propone construir son las mordazas con cremalleras laterales incluidas. Todos los engranes y cremalleras están contenidos dentro de una pieza con los ejes para engranes y guías para mordazas, además de una tapa para alta hermeticidad.

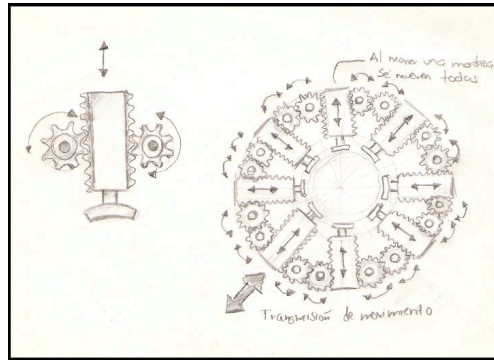


Figura 50. Transmisión de movimiento mediante engranes.

### PROPUESTA 7

Esta propuesta se basa en las boquillas, este sistema funciona por medio de la tensión de la pieza principal. Dicha pieza está ranurada (Fig. 51) dieciséis veces de tal forma que si se le sujeta y aprieta por el perímetro ejerce cierta resistencia deformándose hacia el centro. Se usa un cinturón con el que se pueda abrir y cerrar con un tornillo. Cuando el cinturón se afloja, el centro de la pieza principal se abre por la resistencia elástica y si el cinturón se cierra, la pieza se cierra con la misma resistencia. El material propuesto debe tener determinado módulo elástico que le permita deformarse, pero este no debe de ser menor que el del material a utilizar para la lente flexible.

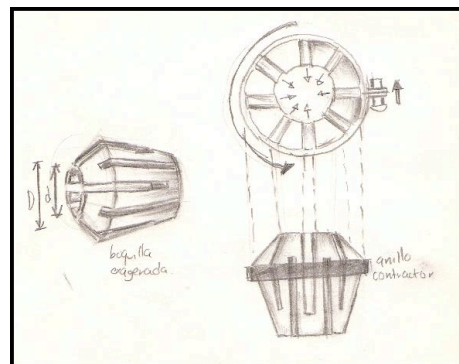


Figura 51. Se exageran las ranuras divisorias para lograr una mayor abertura y elasticidad.

### 3. 2. 3 ANALISIS DE DISEÑO Y MODELOS VIRTUALES DE LAS PROPUESTAS.

Terminadas las propuestas, el próximo paso es utilizar softwares de diseño, con el fin de optimizar y dimensionar las piezas con exactitud, además de que se verifica si los mecanismos seleccionados funcionan adecuadamente (Tablas 8 a 14). En este caso se utiliza Rhino® (para vectorizar curvas y superficies), AutoCAD® (para el dimensionamiento de las propuestas) y 3d Max® (para el renderizado). El diseño asistido

por computadora (CAD) también sirve para identificar las características técnicas y desarrollar un análisis mediante el despliegue de función de la calidad <sup>57</sup> (QFD), que es un método de diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce, en pasos sucesivos, a características técnicas y operativas satisfactorias. Dicho análisis será usado para seleccionar la propuesta a construir.

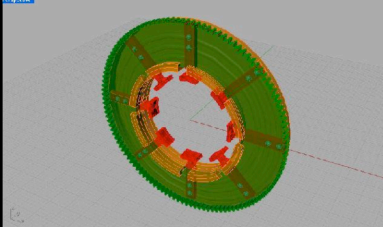
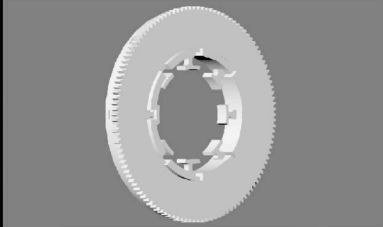
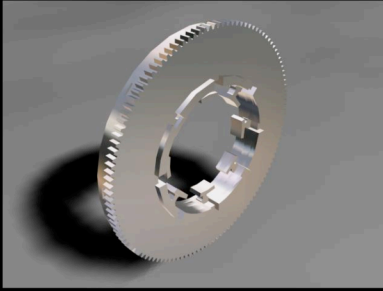
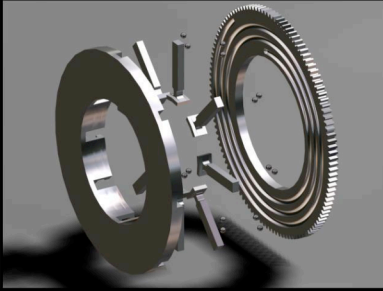
PROPUESTA 1				
				
				
PIEZAS				
TOTAL PIEZAS	TOTAL A MAQUINAR	TORNILLOS Y TUERCAS	MATERIAL	
26	10	0 y 16 balines.	Aluminio y balines de acero.	
DIMENSIONES (mm)				
DIAMETRO	ANCHO	RADIO ABERTURA MAXIMA	RADIO ABERTURA MINIMA	ANCHO MORDAZA
65	7.5	13.6	10.4	4

Tabla 8. Características técnicas de la propuesta 1.

**PROPUESTA 2**

<sup>57</sup> Artículo. Enrique Yacuzzi, Fernando Martin.-QFD: Conceptos, Aplicaciones y nuevos desarrollos. Universidad del CEMA,

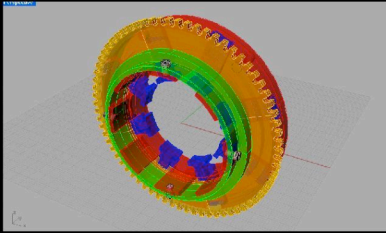
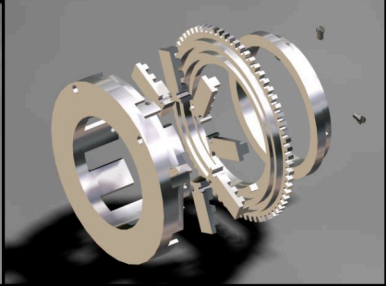
				
				
PIEZAS				
TOTAL PIEZAS	TOTAL A MAQUINAR	TORNILLOS Y TUERCAS	MATERIAL	
15	11	4	Aluminio y tornillos de acero.	
DIMENSIONES (mm)				
DIAMETRO	ANCHO	RADIO ABERTURA MAXIMA	RADIO ABERTURA MINIMA	ANCHO MORDAZA
100	27	20.9	13.1	6.5

Tabla 9. Características técnicas de la propuesta 2.

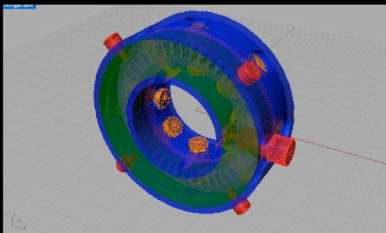
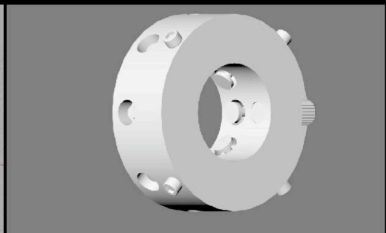
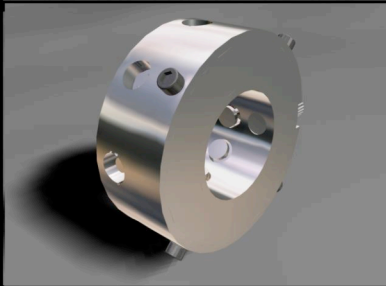
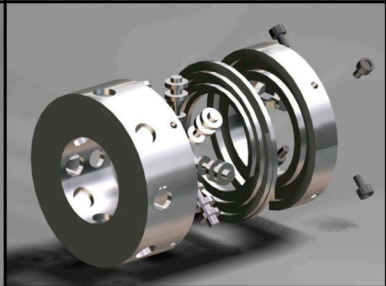
PROPUESTA 3				
				
				
PIEZAS				
TOTAL PIEZAS	PIEZAS A MAQUINAR	TORNILLOS Y TUERCAS	MATERIAL	
16	12	4	Aluminio y tornillos de acero.	
DIMENSIONES (mm)				
DIAMETRO	ANCHO	RADIO ABERTURA MAXIMA	RADIO ABERTURA MINIMA	ANCHO MORDAZA
46	17	9.85	6.65	5

Tabla 10. Características técnicas de la propuesta 3.

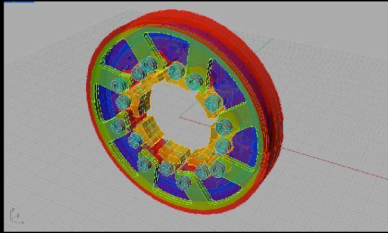
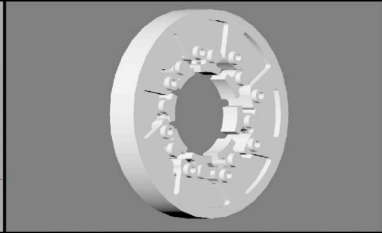

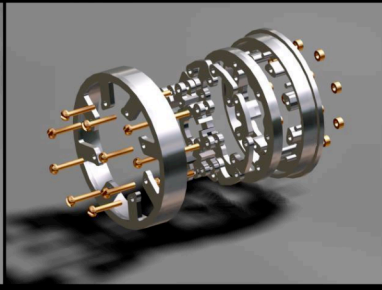
PROPUESTA 4				
				
				
PIEZAS				
TOTAL PIEZAS	PIEZAS A MAQUINAR	TORNILLOS Y TUERCAS	MATERIAL	
51	19	32	Aluminio. Tuercas y tornillos de bronce.	
DIMENSIONES (mm)				
DIAMETRO	ANCHO	RADIO ABERTURA MAXIMA	RADIO ABERTURA MINIMA	ANCHO MORDAZA
59	14	11.9	7	6

Tabla 11. Características técnicas de la propuesta 4.

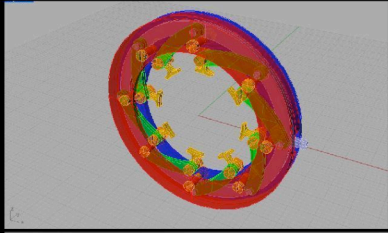
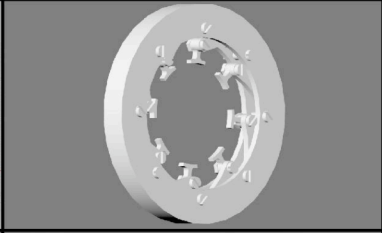

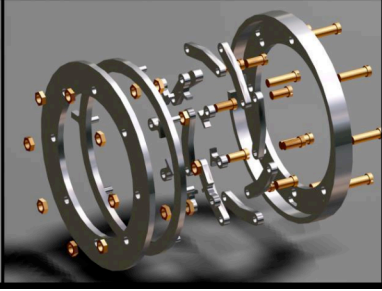
PROPUESTA 5				
				
				
PIEZAS				
TOTAL PIEZAS	PIEZAS A MAQUINAR	TORNILLOS Y TUERCAS	MATERIAL	
51	19	32	Aluminio. Tornillos y tuercas de bronce.	
DIMENSIONES (mm)				
DIAMETRO	ANCHO	RADIO ABERTURA MAXIMA	RADIO ABERTURA MINIMA	ANCHO MORDAZA
49	8	14.5	8	1.5

Tabla 12. Características técnicas de la propuesta 5.

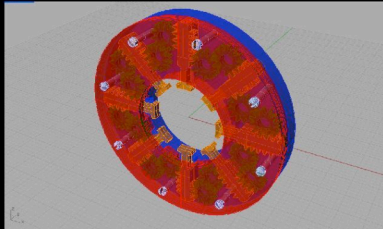
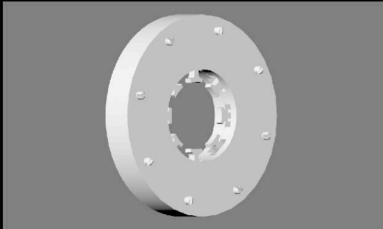

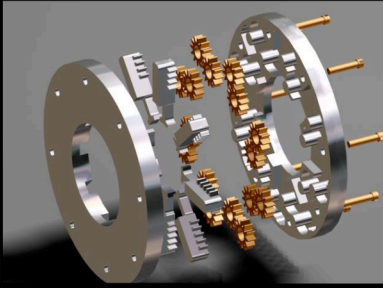
PROPUESTA 6				
				
				
PIEZAS				
TOTAL PIEZAS	PIEZAS A MAQUINAR	TORNILLOS Y TUERCAS	MATERIAL	
26	10	8 tornillos y 16 engranes.	Aluminio. Tornillos y engranes de bronce.	
DIMENSIONES (mm)				
DIAMETRO	ANCHO	RADIO ABERTURA MAXIMA	RADIO ABERTURA MINIMA	ANCHO MORDAZA
50	9.5	8.35	5.35	2

Tabla 13. Características técnicas de la propuesta 6.

PROPUESTA 7				
				
				
PIEZAS				
TOTAL PIEZAS	PIEZAS A MAQUINAR	TORNILLOS Y TUERCAS	MATERIAL	
3	2	1	Aluminio. Cinturón y anillo de acero.	
DIMENSIONES (mm)				
DIAMETRO	ANCHO	RADIO ABERTURA MAXIMA	RADIO ABERTURA MINIMA	ANCHO MORDAZA
80	68.8	21.9	19.1	14.1

Tabla 14. Características técnicas de la propuesta 7.

Finalizados los dimensionamientos, modelados y renders se puede realizar el análisis cuantitativo por medio del QFD. Apoyado en esta metodología se comparan cada una de las propuestas entre sí, para saber cual de todas ellas tiene más ventaja sobre las demás.

Para comenzar con el análisis de QFD primero se debe asignar una prioridad a cada requerimiento que permita evaluar cada ponderación. Primero se establece una escala del 1 al 5 para asignar el grado de importancia de cada requerimiento: 5 como valor máximo y 1 como valor mínimo. Al grado de correlación entre cada requerimiento y característica técnica se le asigna un valor numérico denotado con un símbolo (tabla 15).

GRADO DE CORRELACION	SIMBOLO	VALOR ASIGNADO
Muy correlacionados	⊙	9
Correlacionado	○	3
Poco correlacionados	△	1
Sin correlación	Blanco	0

**Tabla 15.** Símbolos utilizados en la matriz de calidad.

La ponderación de cada característica técnica se obtiene multiplicando la prioridad de cada requerimiento con el grado de correlación entre características técnicas y requerimientos. El valor objetivo de la característica técnica es el valor óptimo con el que se comparan los valores de cada propuesta. En este caso se seleccionan los valores que más satisfagan el valor objetivo de todas las características técnicas de las propuestas. En este análisis se toman en consideración 6 características técnicas:

**RELACION (ANCHO MORDAZA/ANCHURA):** A mayor relación mayor será el área de contacto de la mordaza relativa al ancho de la montura.

**Nº TOTAL DE PIEZAS:** A menor número, facilidad para el ensamble y mantenimiento.

**RELACION (DIAMETRO/ANCHURA):** A mayor relación, más delgada es la montura, lo que se transmite en sistemas opto-mecánicos más compactos.

**RELACION (DESPLAZAMIENTO/RADIO):** A mayor relación, longitud de desplazamiento más efectiva.

**MEDIDA DE HERRAMIENTA:** A herramental más grande, mayores tolerancias.

**Nº DE PIEZAS A MAQUINAR:** Menos piezas, menor tiempo de construcción.

Finalmente se comparan las características técnicas de cada propuesta con el valor objetivo de la característica técnica. Esto, tomando en cuenta el valor de la

ponderación total para cada característica. Todo lo anterior es desarrollado en la tabla 16 mediante la matriz de calidad que es el núcleo del QFD<sup>58</sup>, en este mapa conceptual son relacionados los requerimientos de los clientes (establecidos en el diagrama de afinidad de la tabla 7) con las características técnicas de las propuestas (establecidas en las tablas 8 a 14) necesarias para satisfacerlos. En la parte superior de la matriz se indican las características técnicas que afectan a los requerimientos que se encuentran en la parte izquierda.

MATRIZ DE CALIDAD			P R I O R I D A D	ANCHO MORDAZA/ ANCHURA	Nº TOTAL DE PIEZAS	DIAMETRO/ ANCHURA	DESPLAZAMIENTO/ RADIO	MEDIDA DE HERRAMIENTA mm	NO. DE PIEZAS A MAQUINAR	
CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA PARA APLICACION DE FUERZA RADIAL	REQUERIMIENTOS CONSTRUCTIVOS.	MAYORIA DE PIEZAS COMPRADAS	2						○	
		GEOMETRIA MAQUINABLE CON MINIMO DE PASOS	4	△					○	
		TAMAÑO DE PIEZAS ADECUADAS AL HERRAMENTAL	5					⊙		
	REQUERIMIENTOS DE ENSAMBLE Y MANTENIMIENTO.	MINIMO DE PIEZAS	2		○					
		FACILIDAD DE ENSAMBLE	3		⊙					
	CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	REQUERIMIENTOS DE INTERFAZ HUMANA	MANIPULACION CON LA MANO	2			○		△	
FUERZA MINIMA PARA FUNCIONAMIENTO			1				○			
PRECISION			4				△	○		
REQUERIMIENTOS PARA UN MINIMO DE AFECTACIONES AMBIENTALES		QUE SEA HERMETICO	1		○					
VALOR OBJETIVO DE LA CARACTERISTICA TECNICA				0.533	3	8.7	0.263	6	2	
EVALUACION TECNICA DE LAS PROPUESTAS				PROPUESTA 1	0.533	26	8.7	0.098	1.6	10
				PROPUESTA 2	0.240	15	3.7	0.128	3.2	11
				PROPUESTA 3	0.108	16	2.7	0.138	1.6	12
				PROPUESTA 4	0.428	51	4.2	0.166	1.6	19
				PROPUESTA 5	0.187	51	6.1	0.263	1.6	19
				PROPUESTA 6	0.210	34	5.2	0.120	1.6	10
				PROPUESTA 7	0.210	3	1.2	0.070	6	2
PONDERACION TOTAL DE CADA CARACTERISTICA TECNICA				7	33	6	7	59	18	

Tabla 16. Matriz de calidad para la elección de la propuesta a construir.

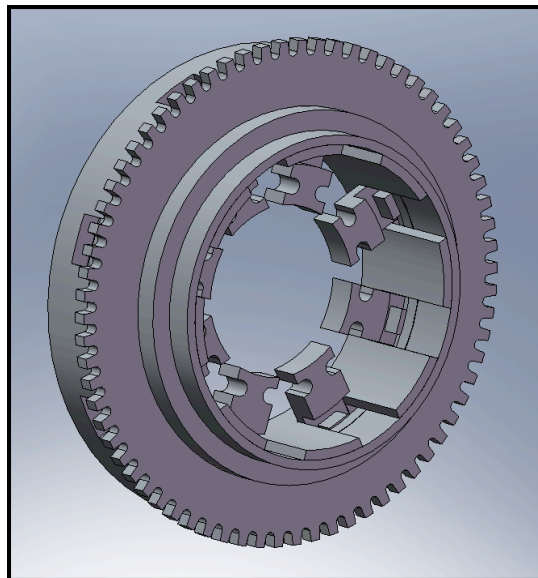
<sup>58</sup> Item 57.



En el análisis QFD, la propuesta 7 tiene más ventajas respecto a las demás, en cuanto a tamaño, número de piezas. Pero falla en cuanto a centro de gravedad y funcionamiento. La desventaja es que es una pieza muy complicada de maquinar, y el molde para la lente elástica sería complicado de adaptar. Por lo que se propone la propuesta 2 (la que le sigue en cuanto a ponderación), que cuenta con un rango de trabajo eficaz. Otra ventaja proporcionada por este sistema es que permite modificar piezas de manera aislada y no se tiene que modificar todo el conjunto como se haría con la propuesta 7.

### 3. 2. 4 MODELO EXPERIMENTAL DE LA MONTURA.

El siguiente paso es efectuar los análisis de diseño a la montura (Fig. 52). Por lo que se utiliza Solidworks® para realizar un análisis mecánico mediante el cual se visualicen las distribuciones de los esfuerzos, desplazamientos, deformaciones y coeficientes de seguridad. Para poder visualizar y analizar estos parámetros se utiliza Cosmosworks® como herramienta de apoyo, que mediante un análisis de elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés), provee datos y gráficos que permiten comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Cabe mencionar que el análisis que se realiza por medio del FEA es enteramente estático por lo que se deben situar las restricciones (empotramientos, apoyos) y cargas (fuerzas normales, momentos) en las caras donde se transmiten las resistencias de la lente flexible si es que se ejerciera movimiento.



**Figura 52.** Modelo experimental de la montura modelada en Solidworks® para análisis de elemento finito.

Para trabajar con FEA es indispensable definir el material de cada una de las piezas. En este caso el material elegido para la montura es la aleación de aluminio 6061 (debido a sus características y propiedades vistas en la recopilación de datos). El análisis se realizó específicamente para la interacción de las piezas. El enfoque se hizo en una mordaza, para poder ver los efectos mecánicos que las demás piezas tienen sobre ella (Fig. 53). Para poder efectuar el análisis se tomaron en cuenta cuáles piezas se mueven, cuáles están fijas y cuáles se tocan entre si. La carga aplicada sobre los ganchos de las mordazas es definida por el límite de carga que soporta el material a utilizar en la misma área de contacto, en este caso el Sylgard 184®. De los datos obtenidos se dedujo que la montura en la parte de las mordazas trabajaría con factor de seguridad (FDS) mínimo de 5.84 soportando una carga total de 23 kgF. También se determinó que la pieza más frágil del sistema es el engrane recto con la espiral ranurada, ya que trabaja con un factor de seguridad de 1.1 y la parte más propensa a la fractura son los dientes del engrane. Todos los datos obtenidos mediante el FEA son presentados con amplitud en el apéndice A.

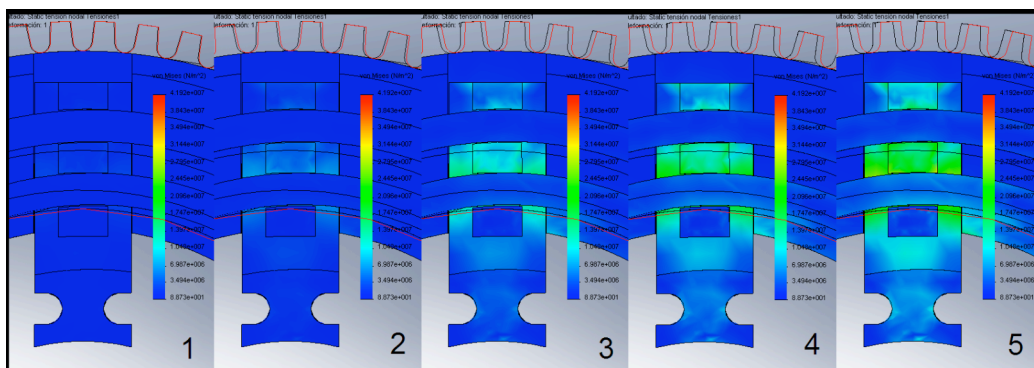


Figura 53. Tensiones ejercidas sobre las mordazas por el giro del engrane recto.

### 3. 3 LENTE ADAPTATIVA.

El siguiente paso es diseñar la lente flexible que será caracterizada mediante la utilización de la montura seleccionada. Para esto primero se debe diseñar mediante una serie de pruebas experimentales, teóricas y prácticas que permitan llegar a un diseño final de lente que cumpla con los requerimientos establecidos en parte con anterioridad. Como metodología para el diseño de la lente adaptativa se utilizan pasos distintos a los que se ocuparon para el diseño de la montura. Por otro lado se debe tomar en cuenta el material de dicha lente, este debe de cumplir con los requerimientos físicos, mecánicos y ópticos. El silicón elastómero Sylgard 184® cumple

con los requerimientos previos: presenta alta transparencia, elasticidad y un índice de refracción de 1.41 (bastante cercano al índice de refracción del vidrio óptico).

### 3. 3. 1 ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE LALENTE FLEXIBLE.

Las especificaciones constructivas de forma y tamaño son indispensables a ser consideradas para el diseño de la lente, es por ello que se debe delimitar el diámetro de la lente para que las mordazas actúen adecuadamente sobre ella. También la resistencia y porcentaje de elongación del material juegan un papel importante para una deformación deseada. En la figura 54 se establecen las medidas con las que cuenta la montura y las cuales servirán para el diseño de la lente. En este caso también se realiza una vista a detalle sobre la mordaza, que es la parte sobre la que irá sostenida la lente, nótese la forma de gancho que tiene la mordaza para que al momento de aplicarle determinada fuerza, la parte trasera del gancho sostenga la lente.

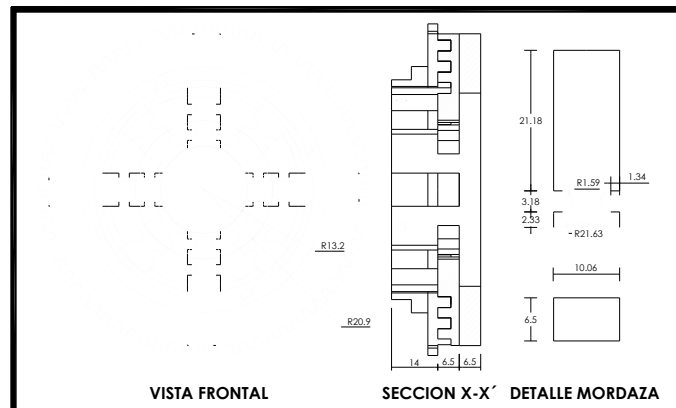


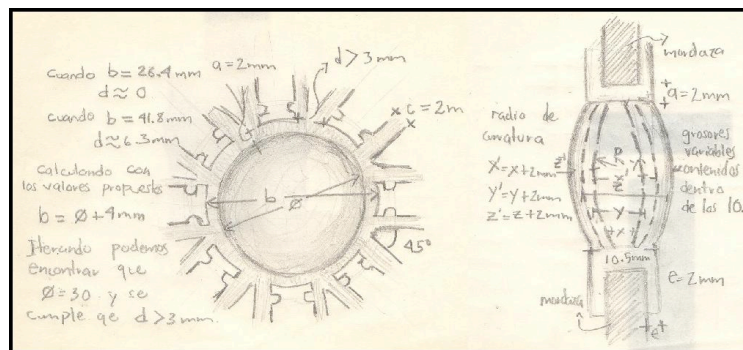
Figura 54. Medidas restrictivas para la lente adaptativa.

Otro requerimiento importante para el diseño de la lente flexible, es que esta no debe tener hendiduras ni cavidades que no puedan conformarse mediante el vaciado o inyección en un molde. Dependiendo de la complejidad de la lente será la complejidad del molde a ser diseñado.

### 3. 3. 2 DISEÑO PRELIMINAR DE LALENTE FLEXIBLE.

La propuesta de diseño para la lente está considerada para contener los ganchos de las mordazas, con el fin de que estos tengan una mayor área de contacto sobre la lente y que la fuerza de las mordazas sean transmitidas efectivamente, obteniendo así deformaciones más amplias y con menor aplicación de fuerza. Entre más rango de estiramiento se obtenga, teóricamente la lente cambiará más sus parámetros ópticos.

Haciendo un cálculo de medidas, se consideran 2 mm como pared del material elastómero que se encuentra adherido a las mordazas. Tomando en cuenta la distancia entre mordaza y mordaza, se propuso una dimensión mayor de 3 mm para que haya una separación que permita la aplicación de fuerzas independientes de las mordazas sobre la lente. Con todos estos parámetros se propone una lente biconvexa (Fig. 55) con un diámetro efectivo de 30 mm, un radio de curvatura de 113 mm en cada lado y tres propuestas con grosores: de 4, 7.25 y 10.5 mm, para que en los extremos de la lente y que esta sea sostenida con: 2, 5.25 u 8.5 mm de material, correspondiente a cada propuesta de espesor de lente. Con este diseño de lente, se delimita el rango de desplazamiento efectivo para la mordaza a 3.9 mm sobre un eje (radio de abertura mínima = 17 mm y radio de abertura máxima = 20.9 mm).



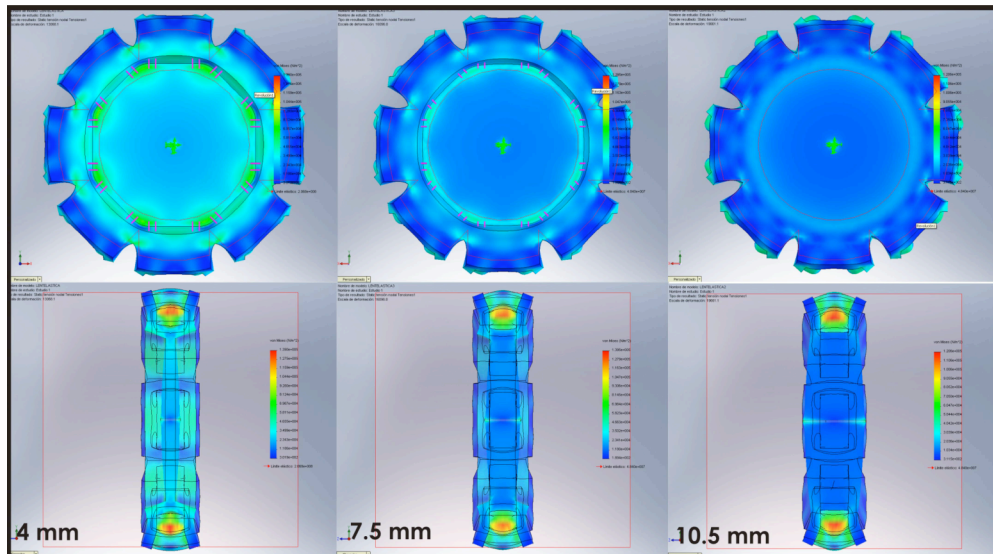
**Figura 55.** Bocetaje de propuesta de lente tomando 2 mm de espesor para cada junta con las mordazas.

### 3. 3. 3 ANALISIS DE DISEÑO Y MODELOS VIRTUALES DE LA LENTE FLEXIBLE.

Diseñada la lente es necesario analizarla para saber cómo se comportará y cuál será su deformación al aplicarle fuerzas radiales. Esto se hace mediante la utilización del software SolidWorks® y si es necesario se tendrán que cambiar las dimensiones o geometría para que la lente funcione adecuadamente.

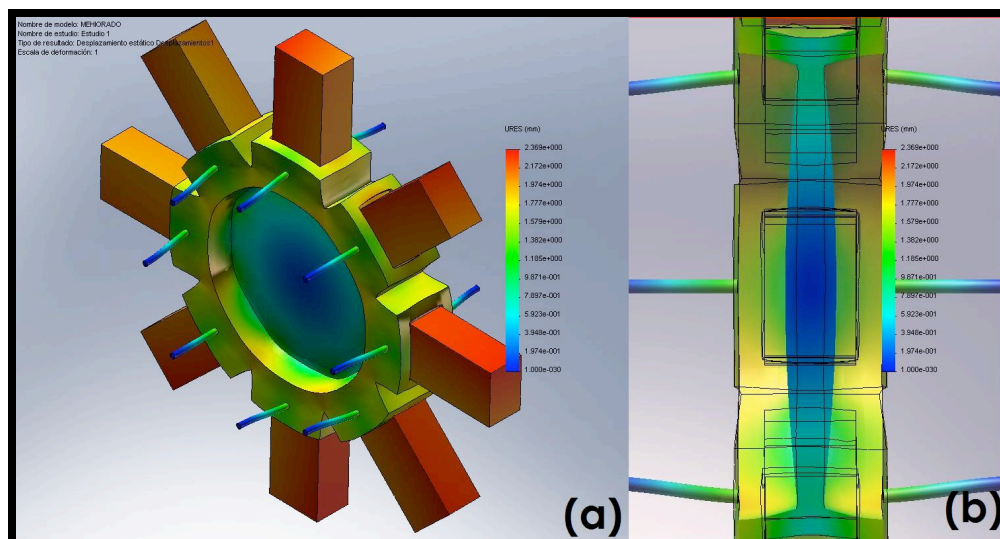
De las tres propuestas se realiza un análisis para poder visualizar cuáles son las deformaciones que sufrirá la lente flexible al aplicarle fuerzas radiales. Asignadas las propiedades físicas y mecánicas del material Sylgard 184® se pueden calcular los límites sobre los cuales trabaja la lente. En la figura 56 se observan las deformaciones obtenidas en cada una de las propuestas, a las cuales se les aplicó una fuerza radial  $F$ . Entre más azul esté la lente, menos desplazamientos hay, las zonas rojas indican los desplazamientos más grandes. De lo anterior se decide escoger la propuesta de 4 mm

de grosor, ya que es la que más se deforma en el área de la lente, además de que en las uniones de la lente con las mordazas las tensiones son similares en los tres casos.



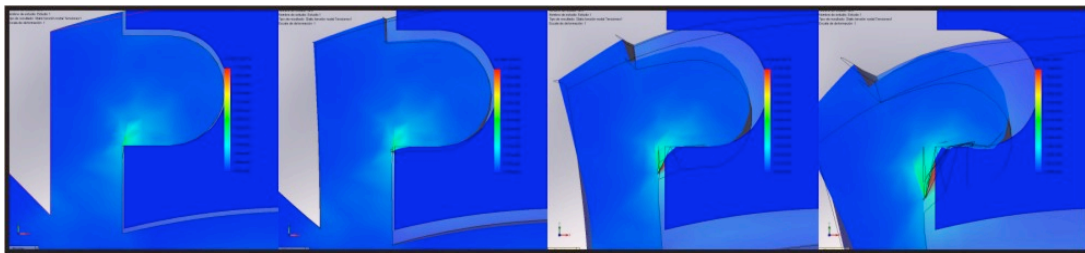
**Figura 56.** Comportamiento de la lente al aplicarle una fuerza  $F$  en cada uno de los extremos, para diferentes grosores: 4, 7.5 y 10.5 mm.

La lente elegida fue analizada y se encontraron los parámetros que intervienen para su deformación máxima (Fig. 57). La carga máxima aplicada en cada extremo de la mordaza fue de 9.68 N ( $FDS=1$ ). Y el desplazamiento radial necesario para la aplicación de esa fuerza por parte de la mordaza es de 2.172 mm, aproximadamente 23 dientes girados en el engrane recto. El grosor de la lente disminuyó a 3.626 mm y el radio de curvatura aumentó a 126.518 mm. El proceso de obtención de todos estos datos son presentados en el apéndice A.



**Figura 57.** Desplazamientos totales en isométrico (a) y corte transversal (b).

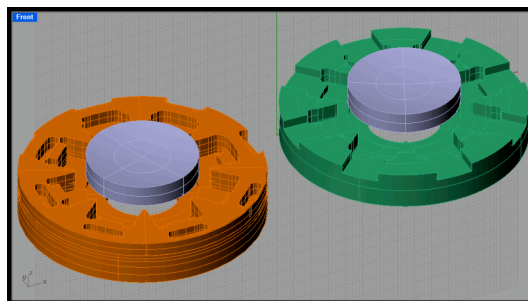
Haciendo un análisis para la interacción lente-mordaza, se visualiza cómo se comportarían las uniones del material elástico con el aluminio (Fig. 58). Debido a las propiedades de los materiales no existe un rozamiento entre las piezas, el acabado del aluminio es muy liso y el elastómero no se adhiere a los materiales con facilidad. Es por eso que se tomó en cuenta la forma de gancho en las mordazas. Se observa que la resistencia a la fuerza cortante es lo que hace que el elastómero se mantenga sostenido por la mordaza. Una consideración importante es el acabado de la pieza, dejar sin filos los ganchos de las mordazas evitará que rasguen el material elástico.



**Figura 58.** Comportamiento en la unión de la lente con los ganchos de las mordazas al aplicarle fuerza radial.

### 3. 3. 4 MODELO EXPERIMENTAL DE LALENTE FLEXIBLE.

Elegida la propuesta experimental para la lente, se debe diseñar el molde donde será vaciada. En este caso se propone *acrílico* para el molde de vaciado, que como ventaja principal, tiene una traslucidez que permitirá verificar que todas las cavidades del molde sean rellenas por la resina antes del curado. Otra consideración importante es el acabado óptico con el que deberán contar las superficies esféricas después del curado, por lo que se usarán dos lentes cóncavas con calidad óptica (una en cada cara del molde) para el acabado superficial de la lente biconvexa a ser deformada (Fig. 59).



**Figura 59.** Diseño de los moldes en Rhino® .

El tipo de molde a ocupar es un molde de inyección por reacción (RIM), como ventaja en este tipo de molde, las presiones sobre las paredes no son altas en comparación con

el proceso de moldeo por inyección común. La disposición de todos los elementos que conforman el molde son establecidos en la figura 60 en donde las mordazas están contenidas dentro de él, y su disposición está designada por ranuras hechas en una de las caras del molde. Las lentes para el acabado superficial son aseguradas mediante silicón convencional y para fijar ambas caras del molde se usan tornillos comerciales que presan las caras evitando las filtraciones de la resina al momento del vaciado. Para poder efectuar el vertido de la resina dentro del molde se disponen dos orificios normales al centro de la superficie y sobre la circunferencia de una de sus caras, uno para la inyección del material y el otro como orificio de salida de aire para cuando esté llenando el molde. El vaciado del elastómero Sylgard 184® se hará a nivel laboratorio con la utilización de instrumentos que permitan mezclar las proporciones exactas de base y catalizador, y el curado se efectuará en un ambiente controlado por lo que el tiempo se puede designar consultando los rangos sugeridos por el proveedor.

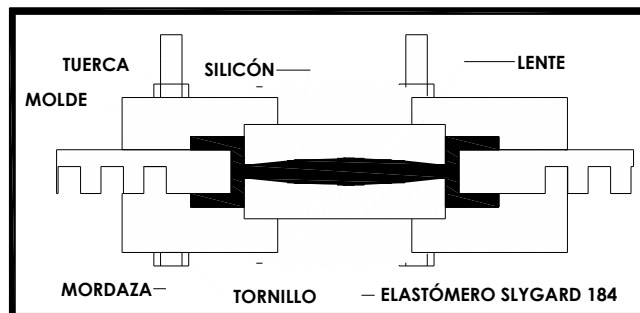


Figura 60. Disposición de elementos para el vaciado del elastómero.

### 3. 4 CARCASA.

Diseñados los elementos principales del modelo opto-mecánico (montura y lente flexible), es necesario diseñar la carcasa para adaptar todos los elementos faltantes que permitan el correcto funcionamiento del modelo. En este caso los elementos faltantes son: la lente que simulará la córnea, el diafragma óptico que funcionará como iris y una cámara CCD que hará el papel de la retina.

#### 3. 4. 1 ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE LA CARCASA.

Las restricciones más importantes de la carcasa que contendrá a todos los elementos integrantes son las dimensiones de dichos elementos y las distancias a las que se encontrarán unos de otros. En la figura 61 se muestra la disposición de cada uno de los elementos integrantes del modelo, las distancias entre sí y sus dimensiones en cuanto a grosor y diámetro. Las distancias X, Y y Z, están determinadas por los parámetros

ópticos de cada uno de los componentes, por lo que es importante conocer los radios de curvatura de los elementos refractivos y sus posiciones, en este caso de la lente para córnea y la lente flexible para saber como los rayos de luz modificarán sus direcciones para así enfocarse en un solo punto, en este caso el detector (cámara CCD). La colocación del diafragma es importante ya que determina el tamaño angular y la cantidad de luz que entrará al ojo, por lo que su posición se elige a la distancia Y del cristalino para producir un tamaño angular similar al del ojo real. Cabe mencionar que el posicionamiento del cristalino también está determinado por su tamaño y forma, además del método de accionamiento para su funcionamiento.

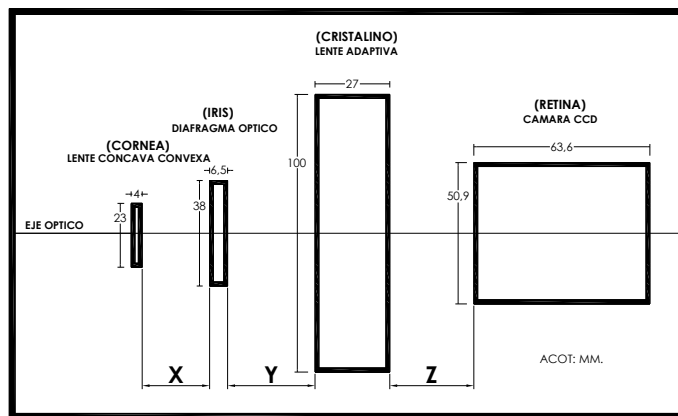


Figura 61. Disposición de elementos que integran el modelo opto-mecánico.

Para proponer las distancias a las que deben estar los elementos, se usa la ecuación (7) que describe el funcionamiento del modelo matemático del ojo humano utilizando los principios de la óptica geométrica. Despejando la longitud ( $L$ ) total del sistema, se obtiene la ecuación 8 que queda en función de la distancia del objeto al sistema ( $d_0$ ) y la distancia de la lente flexible hacia el detector ( $d'_{01}$ ).

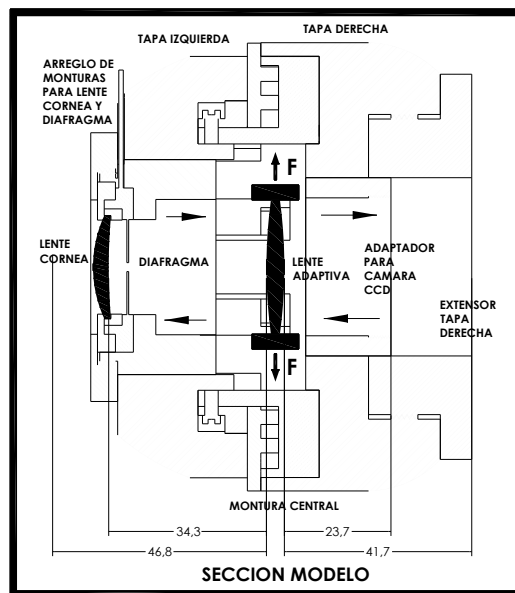
$$L = \frac{f_a f_b d_0}{d'_{01} (d_0 + f_a) \left( \frac{f_b}{d'_{01}} - 1 \right)} - \frac{f_a d_0}{\left( \frac{f_b}{d'_{01}} - 1 \right) (d_0 + f_a)} - \frac{d'_{01}}{\left( \frac{f_b}{d'_{01}} - 1 \right)} \quad (8)$$

Para encontrar las dimensiones finales del sistema, la ecuación 8 es analizada y sustituida con los parámetros ópticos de los elementos a utilizar, de tal forma que haciendo una interpolación con Maple® son encontraron las distancias óptimas con las cuales funcionará el sistema óptico propuesto.



### 3. 4. 2 DISEÑO FINAL DEL MODELO.

La disposición de elementos y las distancias entre estos permite diseñar un modelo compacto. El sistema cuenta con una distancia total de 63 mm desde la lente córnea hasta el detector, especificando que la distancia de la lente córnea al lente cristalino es de 33 mm y la distancia del lente cristalino hacia el detector es de 30 mm. En los datos obtenidos de la ecuación 8 no se consideraron los grosores de los elementos ópticos, por lo que en la integración del sistema se propone que la lente córnea y el detector puedan tener un desplazamiento de  $\pm 5$  mm en sentido del eje óptico (Fig. 62).



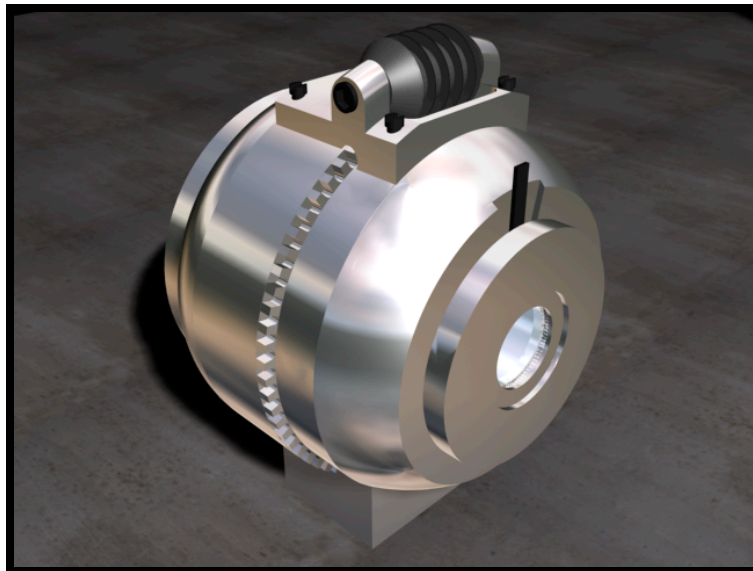
**Figura 62.** Dimensionamiento y disposición de elementos que integran el modelo a construir.

El diseño de las monturas para los elementos está basado en el diseño de ensamblajes ópticos para varias lentes. Para la montura del diafragma y la lente córnea se utiliza la configuración con anillo retenedor roscado, de esta forma los elementos quedan presionados y sin movimiento perpendicular alguno respecto al eje óptico.

La carcasa está dividida en una tapa derecha y una tapa izquierda, ambas tipo rondana, que permiten el paso de los rayos de luz en el centro de ellas. Las dos tapas funcionan como cañones que contienen las monturas que a su vez fijan los elementos ópticos, asimismo estas monturas funcionan como pistones que permiten desplazamientos: acercándose o alejándose de la lente flexible, permitiendo así el enfoque del sistema.

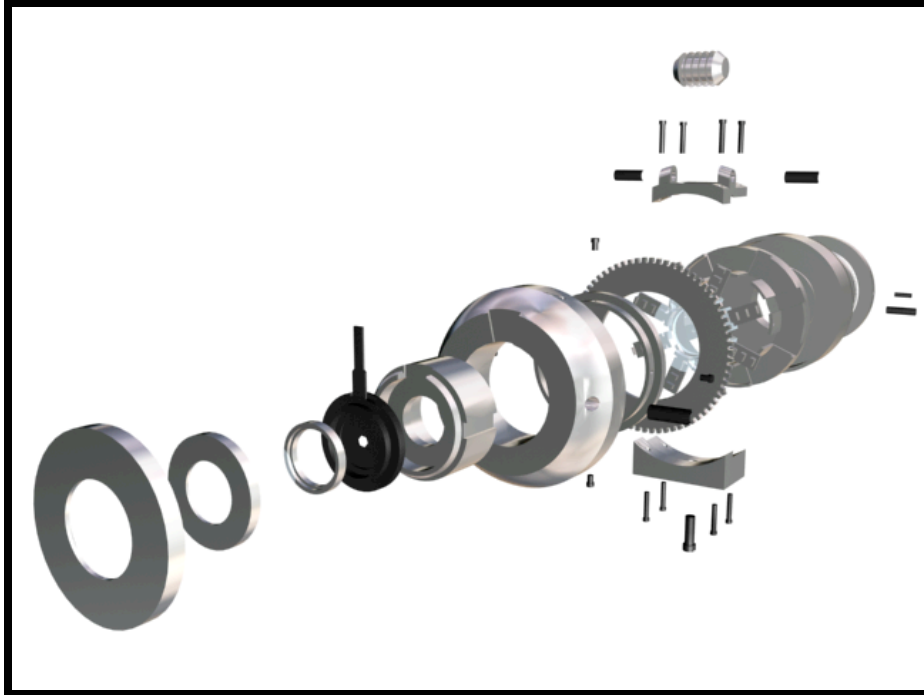
También se propone un extensor que permita aumentar la distancia de la lente flexible al detector para poder visualizar el funcionamiento del modelo sin tener que utilizar un detector CCD, simplemente con el ojo directamente sobre el eje óptico o un plano imagen pegado sobre el adaptador para cámara CCD, que puede ser un círculo cortado de papel blanco.

Diseñados los elementos del modelo se presenta el modelo a construir en la figura 63 al cual se le anexa un cojinete para tornillo sinfín que hará girar el engrane recto de la montura principal, así como una base que estabilice el sistema completo. En los siguientes capítulos se desarrolla la construcción de cada una de sus partes y el ensamble de dicho modelo.



**Figura 63.** Diseño final a construir del modelo opto-mecánico del ojo humano.

En total el modelo consta de un total de 47 piezas, entre piezas diseñadas, tornillos y elementos ópticos (Fig. 64). Los mecanismos de ensamble están diseñados para realizarse de forma progresiva y utilizando herramientas sencillas como desarmadores planos y llaves allen.



**Figura 64.** Explosivo en perspectiva del modelo a construir.

# 4

# PLANEACION DE PROCESOS.

En el capítulo anterior se desarrolló el proceso de diseño, en este se describe el proceso de manufactura que seguirá el material seleccionado para el formado de cada una de las partes que integran el modelo opto-mecánico. Para ello se empleará una metodología que permita diseñar un plan para construir las piezas siguiendo una ruta sencilla, rápida y conveniente para cada materia prima, maquinaria y herramienta a utilizar. Por lo que se realizará un análisis con el cual se desarrollará una metodología constructiva para cada una de las componentes, todo esto mediante la implementación de la planeación de procesos.

La planeación de procesos consiste en la creación de un método particular para la fabricación que generalmente comprende cierto número de pasos u operaciones. El plan de procesos es un mapa que se sigue para transformar materias primas en productos terminados. El trabajo de la planeación de un proceso de construcción se inicia típicamente con un análisis de los dibujos de ingeniería (Fig. 65), esto es los planos detallados del producto que se piensa fabricar. Posteriormente con las especificaciones del diseño de la parte (incluyendo características geométricas, dimensiones, tolerancias y requisitos de materiales) que se deben evaluar en relación con el volumen de producción: es decir, el número total de partes que se va a producir. La planeación de procesos representa el vínculo principal entre el diseño del producto y la manufactura en el taller<sup>59</sup>.

---

<sup>59</sup> Mark, A. Curtis, "Planeación de procesos", Ed. Limusa Noriega Editores, 1era. Edición. México (1996).

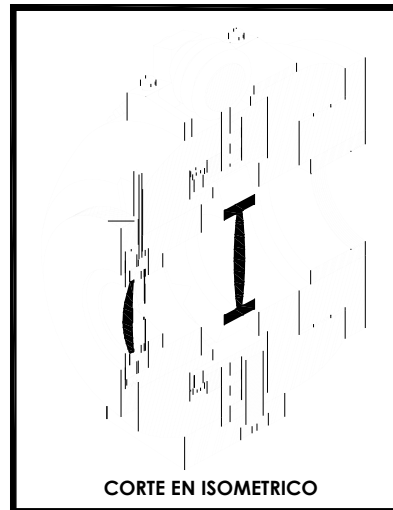


Figura 65. Isométrico del modelo opto-mecánico.

La actividad previa a la planeación de procesos, es la diferenciación de las piezas a fabricar y las que se pueden comprar. Para las piezas a comprar se pensó en partes standard y de fácil adquisición en la región. En la tabla 17 se muestran las piezas a maquinar (con descripción y nomenclatura de referencia) y las piezas a comprar (con descripción técnica comercial y nomenclatura de referencia).

<b>PIEZAS A MAQUINAR</b>		
<b>NOMENCLATURA</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>No. PIEZAS</b>
MO-01	Tapa izquierda del modelo completo	1
MO-02	Tapa derecha del modelo completo	1
MO-03	Extensión de la tapa derecha	1
MO-04	Adaptador para detector, cámara CCD	1
MO-05	Montura para contener al diafragma	1
MO-06	Montura para lente córnea	1
MO-07	Soporte retenedor de lente córnea	1
MO-08	Presionador roscado para soporte retenedor	1
MO-09	Base guía para mordazas y eje para engrane	1
MO-10 (A-H)	Mordazas ranuradas para espiral	8
MO-11	Engrane recto con espiral	1
MO-12	Aro contenedor de mordazas y espiral	1
MO-13	Base del modelo completo	1
MO-14	Cojinete para tornillo sinfín	1
MO-15	Gusano de tornillo sinfín	1
MO-16	Lente biconvexa adaptativa vaciada y curada	1
MO-25	Molde izquierdo de lente adaptativa	1
MO-26	Molde derecho de lente adaptativa	1
<b>TOTAL PIEZAS A MAQUINAR</b>		<b>25</b>
<b>PIEZAS A COMPRAR</b>		
<b>NOMENCLATURA</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>No. PIEZAS</b>
MO-17	Lente cóncava convexa para simulación de cornea	1
MO-18	Diafragma óptico anodizado con 6 aletas	1
MO-27	Lente plano cóncava para superficie adaptativa	2

MO-19	Tornillo para desarmador plano NC 1/8 plg x 1/4 plg	4
MO-20	Tornillo para desarmador plano NC 1/8 plg x 3/4 plg	8
MO-21	Tornillo opresor llave allen NC 1/4 plg x 3/4 plg	3
MO-22	Tornillo opresor llave allen NC 3/16 plg x 3/4 plg	1
MO-23	Tornillo opresor llave allen NC 1/8 plg x 1/2 plg	1
MO-24	Tornillo cabeza hexagonal NC 1/4 plg x 3/4 plg	1
MO-28	Tornillo cabeza hexagonal NC 1/8 plg x 1 1/2 plg	4
MO-29	Tuerca hexagonal NC 1/8 plg	4
<b>TOTAL PIEZAS A COMPRAR</b>		<b>30</b>

Tabla 17. Relación de piezas a comprar y maquinar.

Hecha la identificación de los componentes, el enfoque de la planeación de procesos únicamente se aplicará a las piezas que se maquinarán. Por lo que se elige la metodología propuesta por Singh<sup>60</sup> que consta de seis pasos sucesivos mediante los cuales se realiza un análisis de cada una de las piezas, determinando así, la ruta de trabajo a seguir.

#### 4. 1 ANALISIS GEOMETRICO.

Es importante identificar el tipo de geometría en cada pieza, esto para definir la materia prima, las operaciones, las herramientas y las secuencias a seguir para su maquinado. Por lo que se debe de realizar un análisis geométrico, el cual esta diseñado especialmente para el modelo a fabricar. El análisis geométrico se realiza tomando tres parámetros principales:

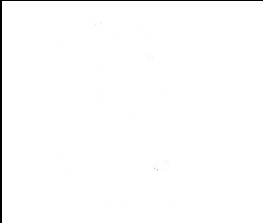
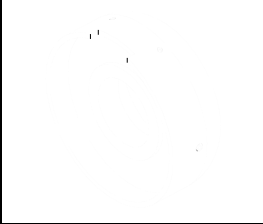

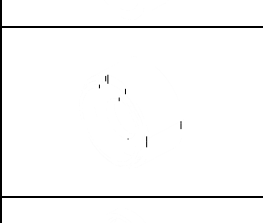
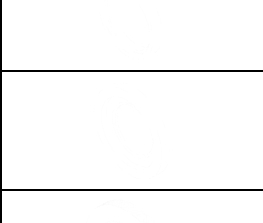
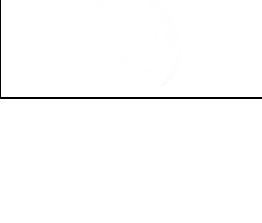

**CARAS CONTENIDAS EN PLANOS PARALELOS:** Es necesario conocer los planos en los que se encuentran contenidas las caras, ya que los cortes de máquinas-herramienta dejan caras paralelas y perpendiculares a la herramienta de corte. Las caras a tomar en cuenta son aquellas que tengan la máxima distancia entre planos paralelos.

**GEOMETRIA PREDOMINANTE:** Fundamental para saber que tipo de maquinaria se debe utilizar, se puede diferenciarlas según sea cilíndrica, esférica, prismática o rectangular.

**NUMERO DE BARRENOS Y UBICACION:** Este parámetro esta definido para este proyecto en particular, ya que la mayoría de las piezas tienen barrenos. En este caso se tomará en cuenta donde están situados, para saber si se encuentran normales o paralelos al plano de trabajo.

<sup>60</sup> Singh, Nahua, "Systems approach to computer-integrated design and manufacturing", Ed. John Wiley and Sons, USA (1996).

En la tabla 18 se muestran gráficamente las piezas con un análisis de cada una de los parámetro anteriormente mencionados (1 para caras contenidas en planos paralelos, 2 para geometría predominante y 3 para No. de barrenos y ubicación) y un recuadro para una descripción geométrica para las características especiales de la pieza.

ANALISIS GEOMETRICO DE PIEZAS					
PIEZA	ISOMETRICO	1	2	3	DESCRIPCION
MO-01		2	Cilíndrica.	1 normal al eje principal y 4 paralelos a los planos paralelos	Redondeo con sección perpendicular a los planos principales. Ranura sección angular en un plano paralelo.
MO-02		2	Cilíndrica.	1 normal al eje principal y 4 paralelos a los planos paralelos	Ranura sección cuadrada con punto medio normal al eje principal.
MO-03		2	Cilíndrica.	1 normal al eje principal	Rosca 22 hilos por pulgada sobre el eje principal.
MO-04		2	Cilíndrica.	Sin barrenos	Rosca para CCD sobre el eje principal.
MO-05		2 1 perp	Cilíndrica.	Sin barrenos	Rosca 22 hilos por pulgada sobre el eje principal. Ranura rectangular normal a los planos paralelos y ranura con sección cuadrada con punto medio normal al eje principal.
MO-06		2	Cilíndrica.	Sin barrenos	Perfil en revolución.
MO-07		2	Cilíndrica.	Sin barrenos	Perfil en revolución con chaflán tangente al radio de curvatura de la lente cornea.
MO-08		2	Cilíndrica.	Sin barrenos	Perfil en revolución roscado a 22 hilos por pulgada.


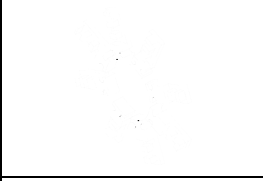

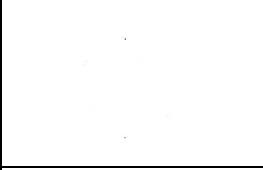

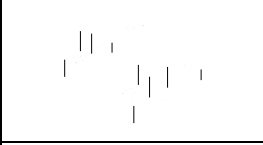



MO-09		2	Cilíndrica.	4 perpendiculares entre si y normales al eje principal y 1 normal al eje principal	8 ranuras rectangulares normales al eje principal.
MO-10 (A-H)		Cada pieza 2 1 perp	Prismática.	Sin barrenos	Cada pieza esta diseñada para la espiral. Las ranuras tiene un arco para facilitar la entrada y salida de la espiral.
MO-11		2	Cilíndrica.	Sin barrenos	Engrane recto con la espiral al frente. Número de dientes: 70. Paso por cada vuelta de la espiral 6.4 mm.
MO-12		2	Cilíndrica.	4 perpendiculares entre si y normales al eje principal	Perfil en revolución.
MO-13		4 1 perp	Prismática.	4 normales al plano perpendicular	Redondeo cóncavo entre 2 planos paralelos con radio paralelo a los mismos.
MO-14		2 1 perp	Prismática.	4 normales al plano perpendicular y 2 normales a los planos paralelos	Redondeo cóncavo y convexo entre 2 planos paralelos con radio paralelo a los mismos.
MO-15		2	Cilíndrica.	1 normal a los planos paralelos	Rosca interna sobre los planos paralelos. Cuerda del gusano 6 hilos por plg.
MO-25		2	Cilíndrica.	4 normales a los planos paralelos	Ranuras adaptadas para ubicar las mordazas.
MO-26		2	Cilíndrica.	4 normales a los planos paralelos	8 ranuras ubicadas a 45° entre si.

Tabla 18. Análisis geométrico de piezas.

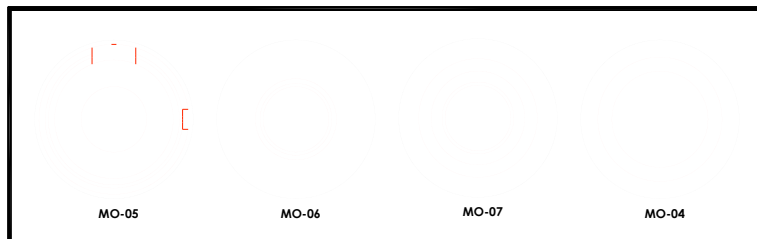
## 4. 2 PIEZA DE TRABAJO.

El material seleccionado en el capítulo anterior para la manufactura de los componentes fue el aluminio, en este caso la aleación 6061. Para las piezas se usarán

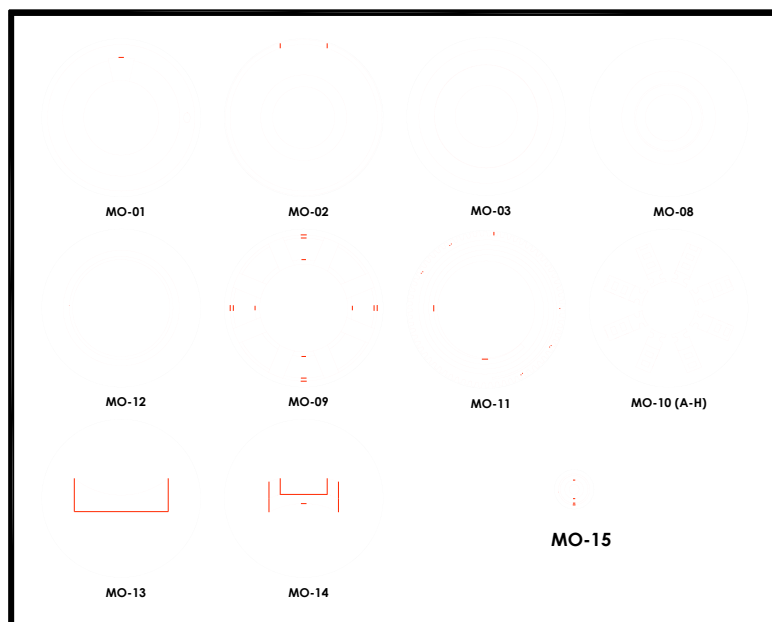


barras de aluminio de 2 (Fig. 66) y 4 (Fig. 67) plg de diámetro. La altura de la pieza de trabajo es variable debido a que al terminar una pieza queda una superficie plana por lo que se puede trabajar una pieza nueva. Solo se tomará como altura mínima la dimensión total de la pieza más 1 cm para poder sujetarla en la prensa o el mandril del torno, dependiendo de la operación a realizar.

La pieza MO-15 será de acero, lo cual le proporcionará mayor resistencia al momento de maquinar y evitará su deformación por las fuerzas de corte de las máquinas. Como pieza de trabajo se elige una barra de 3/4 plg y una altura mínima total para sujeción de 4 cm más la altura total de la pieza.

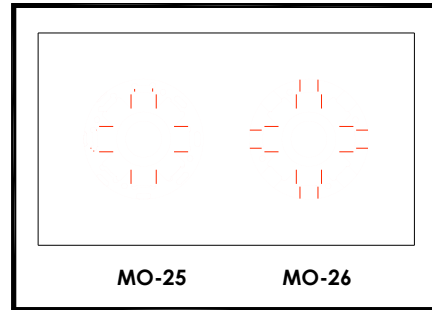


**Figura 66.** Piezas de trabajo en barras de aluminio de 2 plg de diámetro.



**Figura 67.** Piezas de trabajo en barras de aluminio de 4 plg de diámetro y en 3/4 de plg de diámetro en acero para el tornillo sinfín.

El material de los moldes será acrílico de 3/4 de plg. En este caso para las piezas MO-25 y MO-26 se tomará un rectángulo cuyas dimensiones serán las dimensiones especificadas para el molde más 1 plg (Fig. 68) para sujeción.



**Figura 68.** Piezas de trabajo en acrílico de 3/4 de plg (dimensión 209x117mm).

### 4. 3 OPERACIONES Y SECUENCIAS.

Analizada la geometría de la pieza y la pieza de trabajo, es indispensable diseñar una serie de operaciones consecutivas que permitan maquinar eficientemente la pieza. El tipo de máquinas-herramienta a utilizar dependerá en gran parte de la geometría a maquinar. Para este proyecto se considera utilizar torno, fresadora y taladro, y dependiendo de la maquinaria también se especificará el tipo de operación a efectuar. Se utilizarán herramientas de mano para poder efectuar algunas operaciones necesarias, como es el caso del machuelado que se hará con un maneral y para el corte de la materia prima se utilizará segueta. En la tabla 19 se especifica en orden consecutivo las operaciones que se efectuarán para cada pieza.

OPERACIONES Y SECUENCIAS			
PIEZA	No	MAQUINA O HERRAMIENTA	OPERACIÓN
MO-01	1	Torno	Refrentado (interior y exterior)
	2		Cilindrado (interior y exterior)
	3		Copiado
	4	Fresadora	Ranurado
	5	Taladro	Taladrado en macizo
	6	Machuelo con maneral	Machuelado
MO-02	1	Torno	Refrentado (interior y exterior)
	2		Cilindrado (interior y exterior)
	3		Copiado
	4		Roscado interno
	5	Taladro	Taladrado en macizo
	6	Machuelo con maneral	Machuelado
MO-03	1	Torno	Refrentado
	2		Cilindrado (interior y exterior)
	3		Roscado externo
	4		Moletado
	5		Tronzado
	6	Taladro	Taladrado en macizo
	7	Machuelo con maneral	Machuelado
MO-04	1	Torno	Refrentado
	2		Cilindrado (interior y exterior)

4 PLANEACION DE PROCESOS.



	3		Roscado interno
	4		Tronzado
MO-05	1	Torno	Refrentado (interior y exterior)
	2		Cilindrado (interior y exterior)
	3		Roscado externo
	4	Fresadora	Ranurado
MO-06	1	Torno	Refrentado (interior y exterior)
	2		Cilindrado (interior y exterior)
	3		Tronzado
MO-07	1	Torno	Refrentado (interior y exterior)
	2		Cilindrado (interior y exterior)
	3		Perfilado
	4		Tronzado
MO-08	1	Torno	Refrentado (interior y exterior)
	2		Cilindrado (interior y exterior)
	3		Roscado interno
	4		Moleteado
	5		Tronzado
MO-09	1	Fresadora	Planeado
	2		Ranurado
	3	Torno	Tronzado
	4	Taladro	Taladrado en macizo
	5	Machuelo con maneral	Machuelado
MO-10 (A-H)	1	Fresadora	Planeado
	2		Escuadrado
	3		Ranurado
	4	Torno	Tronzado
MO-11	1	Fresadora	Planeado
	2		Escuadrado
	3		Ranurado
	4	Torno	Tronzado
MO-12	1	Torno	Refrentado
	2		Cilindrado (interior y exterior)
	3		Tronzado
	4	Taladro	Taladrado en macizo
	5	Machuelo con maneral	Machuelado
MO-13	1	Fresadora	Planeado
	2		Escuadrado
	3	Torno	Tronzado
	4	Fresadora	Ranurado
	5	Taladro	Taladrado en macizo
MO-14	1	Fresadora	Planeado
	2		Escuadrado
	3	Torno	Tronzado
	4	Taladro	Taladrado en macizo
	5		Retaladrado
MO-15	1	Torno	Refrentado
	2		Cilindrado
	3		Roscado
	4		Tronzado
	5	Taladrado	Taladrado en macizo
	6	Machuelo con maneral	Machuelado
MO-25	1	Fresadora	Planeado
	2		Planeado en escuadra
	3		Ranurado
	4		Cortado

MO-26	5	Taladro	Taladrado en Macizo
	1	Fresadora	Planeado
	2		Planeado en escuadra
	3		Ranurado
	4		Cortado

**Tabla 19.** Operaciones y secuencias que seguirán cada una de las piezas.

#### 4. 4 SELECCION DE LA MAQUINA.

La maquinaria a utilizar es la que se encuentra dentro de los talleres de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. De acuerdo con las operaciones y secuencias seleccionadas se elige un torno de engranajes, una fresadora CNC (para las piezas que comprendan elementos geométricos complejos que requieren precisión), una fresadora horizontal universal, un taladro y un taladro fresador (para operaciones de poca remoción de material). En la tabla 20 se muestra la maquinaria elegida con una nota técnica en donde se especifica el tipo de máquina, las velocidades del husillo, los avances, las dimensiones máximas de la pieza de trabajo y las piezas a maquinar.

MAQUINARIA SELECCIONADA				
MAQUINA	RPM HUSILLO	AVANCES	DIMENSIONES	PIEZAS
Torno de Engranajes Marca: ILSA Modelo: TR, 1000-EX 	24 50 70 125 270 375 700 1500 2000	(mm/rev) 0.064 0.075 0.11 0.24 0.28 0.33 0.41 0.8	Diámetro máximo de pieza: 300 mm  Distancia entre centros: 800 mm  Recorrido transversal: 190 mm	MO-01 MO-02 MO-03 MO-04 MO-05 MO-07 MO-08 MO-09 MO-10 (A-H) MO-11 MO-12 MO-13 MO-14 MO-15
Fresadora de CNC de tres ejes. Marca: DYNA Modelo: EM 3116 	De 814 a 2500.	(mm/min) 0-5000	X: 600 mm Y: 42 mm Z: 15 mm	MO-09 MO-10 (A-H) MO-11 MO-13 MO-14 MO-25 MO-26


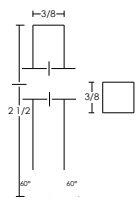
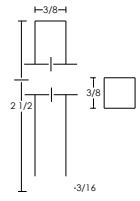
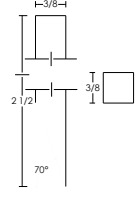
<p>Fresadora horizontal universal                  Marca: AHMSA                  Modelo: UE</p> 	48 66 88 120 170 230 320 410 600 865 1140 1500	(mm/min)  12.7 36.5 127 19.05 57.15 187.3 25.4 85.7 279.4	X: 60 mm Y: 25 mm Z: 30	MO-14
<p>Taladro sensible de tipo banco                  Marca: Vimalert                  Modelo: M- 15</p> 	650 1300 2500 4650	Manual	Distancia husillo a piso: 115 cm  Distancia husillo a poste: 200 mm	MO-01 MO-02 MO-03 MO-09 MO-12 MO-13 MO-14 MO-15 MO-25
<p>Máquina: Taladro Fresador                  Marca: OTMT                  Modelo: OT25020</p> 	100 120 180 190 200 240 290 320 380 455 660 790 890 1005 1045 1250 1500 1565 1880 2200 2640	Manual	X: 350 mm Y: 200 mm Z: 150 mm	MO-01 MO-02 MO-05

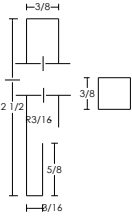
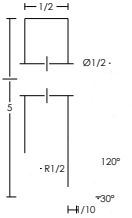

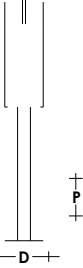
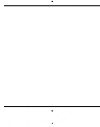
**Tabla 20.** Maquinaria seleccionada para la manufactura de las piezas.

## 4. 5 SELECCION DE HERRAMIENTAS.

La elección de las herramientas esta condicionada por el material a maquinar, la geometría de la pieza y la maquinaria a ocupar. Como el material a maquinar es una aleación de aluminio, no es necesario utilizar herramientas hechas de materiales especiales (carburo cementado, carburo de tungsteno, materiales cerámicos o con recubrimientos especiales), con herramientas de acero de alta velocidad (HSS) se pueden efectuar desbastes y acabados a buen ritmo de trabajo. En el caso de las

herramientas a utilizar en el torno se utilizará acero de cobalto el cual se afilará dependiendo del tipo de la geometría de la pieza a tornearse. En la tabla 21 se describen las medidas, el material, la operación a efectuar, y las piezas a maquinar de las distintas herramientas a utilizar.

SELECCION DE HERRAMIENTAS				
HERRAMIENTA	MEDIDAS (PLG)	MATERIAL	OPERACION	PIEZA
<b>CORTADORES VERTICALES</b>				
	D: 1/2 Z: 3/4 Gavilanes o filos: 4	Acero de alta velocidad (HSS)	Planeado	MO-09 MO-10 (A-H) MO-11 MO-25 MO-26
	D: 3/8 Z: 3/4 G: 4	HSS	Ranurado Planeado en escuadra Escuadrado	MO-09 MO-13 MO-14
	D: 1/4 Z: 1/2 G: 4	HSS	Ranurado Planeado en escuadra Escuadrado	MO-01 MO-05 MO-13
	D: 1/8 Z: 1/2 G: 2	Carburo de tungsteno	Ranurado	MO-10 (A-H) MO-11 MO-25 MO-26
	D: 1/16 Z: 1/8 G: 2	Carburo de tungsteno	Escuadrado	MO-11
<b>BURILES PARA TORNO</b>				
	D: 3/8 L: 2 1/2	HSS	Refrentado Cilindrado Perfilado Roscado	MO-01 MO-02 MO-03 MO-04 MO-05 MO-06 MO-07 MO-08 MO-12 MO-13 MO-14 MO-15
	D: 3/8 L: 2 1/2	HSS	Copiado	MO-01 MO-02
	D: 3/8 L: 2 1/2	HSS	Cilindrado interior Refrentado interior Perfilado interior	MO-01 MO-02 MO-04 MO-05 MO-06 MO-07 MO-08 MO-12 MO-13 MO-14

	D: 3/8 L: 2 1/2	HSS	Tronzado	MO-03 MO-04 MO-06 MO-07 MO-08 MO-09 MO-10 (A-H) MO-11 MO-12 MO-15
	D: 1/2 L: 5	Barra de acero con punta de carburo cementado soldada con bronce	Cilindrado interior Roscado interior	MO-01 MO-02 MO-04 MO-05 MO-08 MO-13
<b>BROCAS</b>				
	D: 25/64	HSS	Retaladrado	MO-14
	D: 1/4	HSS	Taladrado en macizo	MO-13 MO-14
	D: 13/64	HSS	Taladrado Barrenado para machuelo 1/4 Retaladrado	MO-01 MO-09 MO-15 MO-13 MO-14
	D: 5/32	HSS	Taladrado Barrenado para machuelo 3/16	MO-02
	D: 1/8	HSS	Taladrado en macizo	MO-13 MO-14
	D: 3/32	HSS	Taladrado Barrenado para Machuelo 1/8	MO-01 MO-02 MO-03 MO-09 MO-12
	D: 1/16	HSS	Taladrado	MO-25
<b>MACHUELOS</b>				
	D: 1/4 NC P: 20 H/PLG	HSS	Machuelado	MO-09 MO-15
	D: 3/16 NC P: 24 H/PLG	HSS	Machuelado	MO-02
	D: 1/8 NC P: 40 H/PLG	HSS	Machuelado	MO-01 MO-02 MO-03 MO-09 MO-12
<b>HERRAMIENTA ESPECIAL</b>				
	Herramienta de moleteado con cuatro juegos de rodillos en cabeza giratoria.			

**Tabla 21.** Herramientas a utilizar para las operaciones en cada pieza.

## 4. 6 DETERMINAR CONDICIONES DE MAQUINADO.

Las condiciones de maquinado (velocidad, avance, profundidad de corte) son obtenidas mediante cálculos matemáticos utilizando los valores proporcionados en el capítulo dos, los cuales están determinadas por el tipo de máquina, las características de la herramienta (dimensiones, forma, número de filos), el material de la herramienta y el material a maquinar. Se desperdiciará tiempo de producción si la velocidad y/o el avance son demasiado bajos, y si son demasiado altos, la herramienta de corte puede desafilarse o romperse. La velocidad y el avance ideal para cualquier pieza de trabajo es la combinación con la que se logra la mejor velocidad de producción y mejor vida de herramienta<sup>61</sup>. Por ello en las tablas 22, 23 y 24 son tabuladas las condiciones ideales que dependen de la herramienta a utilizar y la maquinaria sobre la que esta se montará. Se proponen los valores óptimos y a la derecha entre paréntesis los adaptados a los proporcionados por la maquinaria seleccionada.

### TALADRO (BROCAS).

Los valores obtenidos para taladrar el aluminio con brocas de acero de alta velocidad son los siguientes:

DIAMETRO BROCA (HSS)	VELOCIDAD DE CORTE	AVANCE
plg	(rev/min)	mm/min
25/64	1960 (2500)	196-353
1/4	3055 (2500)	306-550
13/64	3930 (4650)	197-393
5/32	4775 (4650)	238 – 477
1/8	6110 (4650)	122 -305
3/32	8530 (4650)	170 – 425

**Tabla 22.** Velocidades y avances para las brocas a utilizar.

### TORNO (BURILES).

Los valores de la siguiente tabla están calculados para corte de aluminio con un buril de acero de alta velocidad.

<sup>61</sup> Item 33.



DIAMETRO DE PIEZA (plg)	OPERACION	VELOCIDAD DE HUSILLO	AVANCE POR REVOLUCION	PROFUNDIDAD DE CORTE
		rev/min	Mm	mm
4-3	Desbaste	191-255 (270)	0.4-0.75	0.76-1
	Acabado	286-382 (375)	0.13-0.25	> 0.13
3-2	Desbaste	255-382 (270)	0.4-0.75	0.76-1
	Acabado	382-573 (375)	0.13-0.25	> 0.13
	Roscado	76-114 (70)	var	var
2-1	Desbaste	382-764 (700)	0.4-0.75	0.76-1
	Acabado	573-1146 (700)	0.13-0.25	> 0.13
	Roscado	114-229 (125)	var	var
< 1	Desbaste	< 764 (700)	0.4-0.75	0.76-1
	Acabado	< 1146 (700)	0.13-0.25	> 0.13
	Roscado	< 229 (270)	var	var

**Tabla 23.** Velocidades en el torno para los distintos diámetros de piezas.

### FRESA (CORTADORES VERTICALES).

Las condiciones de los cortadores verticales dependen del material de la herramienta, el diámetro (D) y el número de gavilanes (G).

MATERIAL	G	DIAMETRO HERRAMIENTA	VELOCIDAD DE CORTE	AVANCE	PROFUNDIDAD
		plg	Rev/min	mm/min	Mm
HSS	4	1/2	3750-7500 (2500)	4200-8400	0.4 (mínimo)
HSS	4	3/8	5000-10000 (2500)	5200-10400	0.4 (mínimo)
HSS	4	1/4	7500-15000 (2500)	3900-7800	0.4 (mínimo)
Carburo	2	1/8	30000-60000 (2500)	15000-30000	0.4 (mínimo)
Carburo	2	1/16	60000-120000 (2500)	30000-60000	0.4 (mínimo)

**Tabla 24.** Velocidades y avances para los cortadores verticales a utilizar.

Para las condiciones de maquinado de los moldes, los valores asignados son mayores que los calculados para las demás piezas, esto por las propiedades mecánicas del acrílico que están por debajo de la mitad de las de la aleación de aluminio seleccionada. Por lo que las velocidades, avances y profundidades de corte serán duplicadas, siempre tomando en cuenta las capacidades de la máquina.

Todas las selecciones hechas en la planeación de procesos estarán anexadas a los planos constructivos, los cuales influirán en una efectiva manufactura de cada pieza dentro del taller.

# 5

# CONSTRUCCION.

En este capítulo se describe como fue el proceso de manufactura del modelo dentro de los talleres de la UTM, el cual se inició con la comprensión de los planos mecánicos constructivos de todo el modelo (apéndice C), los cuales cuentan con dibujos técnicos (vistas, isométricos, explosivos, cortes), dimensiones, tolerancias, especificaciones de materia prima seleccionada, así también como las elecciones de maquinaria, herramientas y condiciones de maquinado para cada pieza. Cada una de las piezas fue construida siguiendo estas especificaciones, y para detallar la ruta constructiva del modelo, en este capítulo son utilizados *diagramas de flujo* esquemáticos que permiten visualizar los procesos (maquinados, moldeo, ensambles) empleados para la manufactura del modelo.

## 5.1 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL.

El orden de construcción de cada una de las piezas fue determinado por el orden de utilización. El desarrollo del diagrama de flujo de la figura 69 determina la secuencia de construcción del modelo, el vaciado de la lente elástica, los sub-ensambles y el ensamble final del modelo opto-mecánico. Primero se construyó la montura para la lente adaptativa, esto permitió hacer las pruebas del sistema mecánico para verificar que funcionaba como se había previsto. Posteriormente se efectuó el formado de la lente, que fue un proceso diferente al de la construcción del modelo, puesto que se hizo por medio de vaciado en un molde hecho de acrílico, es por eso que se especifica como un solo paso en el diagrama de flujo. Al maquinar la montura y hacer el vaciado para generar la lente se pudieron llevar a cabo pruebas ópticas que permitieron comprobar el funcionamiento y posteriormente la caracterización de la lente adaptativa. Construido el sistema principal del modelo (montura y lente), la construcción de la carcasa se desarrolló en un orden que permitiera verificar que las

piezas fueran ensamblando entre si, esto para evitar los errores de armado después de haber finalizado la manufactura de todas las componentes.

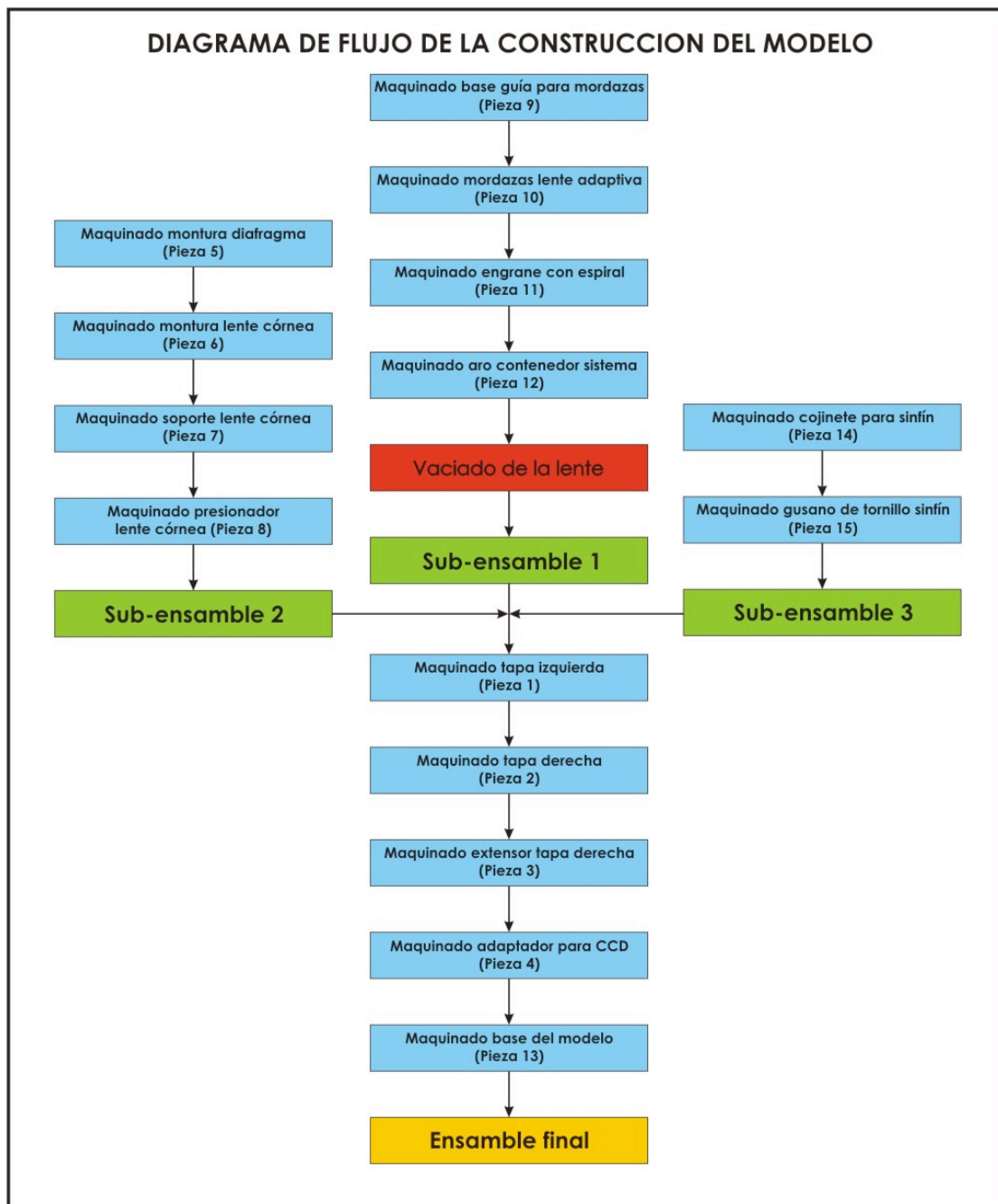
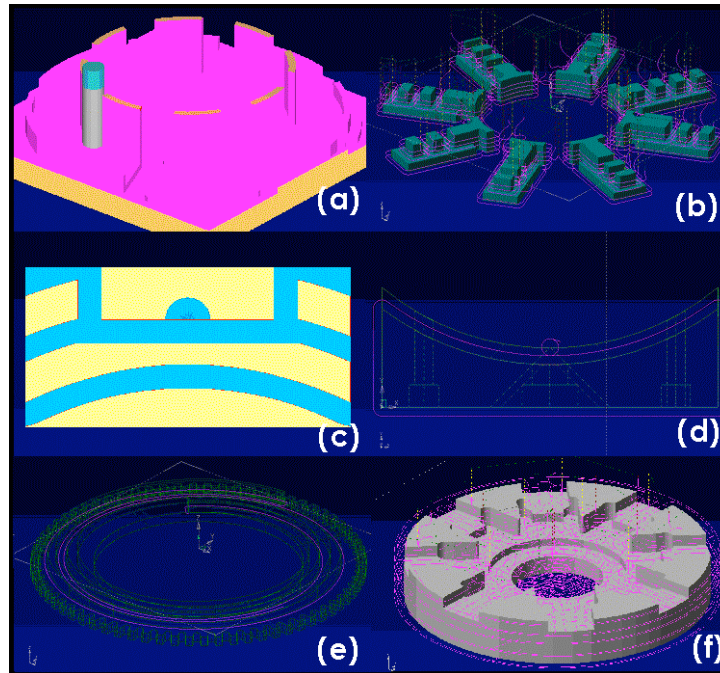


Figura 69. Diagrama de flujo de la construcción del modelo opto-mecánico

## 5. 2 CONSIDERACIONES INICIALES.

Durante las operaciones de maquinado, se consideró efectuar algunos procedimientos con el apoyo de algunas herramientas, esto con el fin de tener un buen desempeño dentro del taller.

Se empleó el software VISI-series® (Fig. 70) para preparar los archivos NC que fueron utilizados en la fresadora de control numérico para el corte de las piezas designadas con anterioridad. Este software genera de manera automática las trayectorias (códigos g) que sigue la herramienta de corte para el maquinado de la pieza.



**Figura 70.** Preparación de códigos g para el maquinado de las piezas (a) 09, (b) 10(A-H), (c) 14, (d) 13, (e) 11, (f) 25 y 26.

Se utilizó segueta para los cortes de la pieza de trabajo (materia prima). Se tuvo especial cuidado en que la superficie de corte fuera lo más plana posible (Fig. 71), cortes derechos ahorraron tiempo en las operaciones de refrentado (torno) y planeado (fresadora).



**Figura 71.** Piezas de trabajo en 2 y 4 plg.

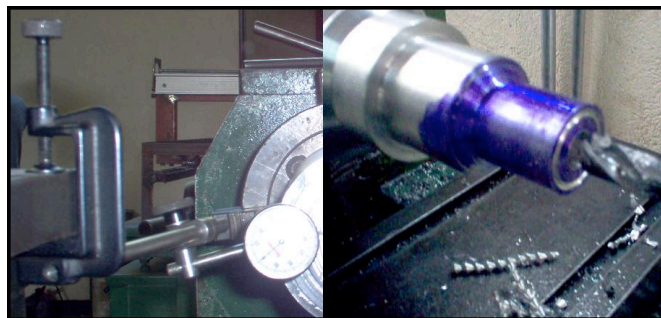
Se seleccionaron las prensas más adecuadas (de las disponibles en el taller) para cada operación realizada (Fig. 72). Se tomó en cuenta que fuera posible montarlas

sobre la maquinaria seleccionada, también que estuvieran bien aseguradas y centradas sobre la mesa de trabajo, con el fin de que se pudieran efectuar operaciones sobre distintas caras de la pieza de trabajo, montando y desmontando la pieza rápidamente.



**Figura 72.** Prensas para sujeción de las piezas de trabajo en el taladro y fresadoras.

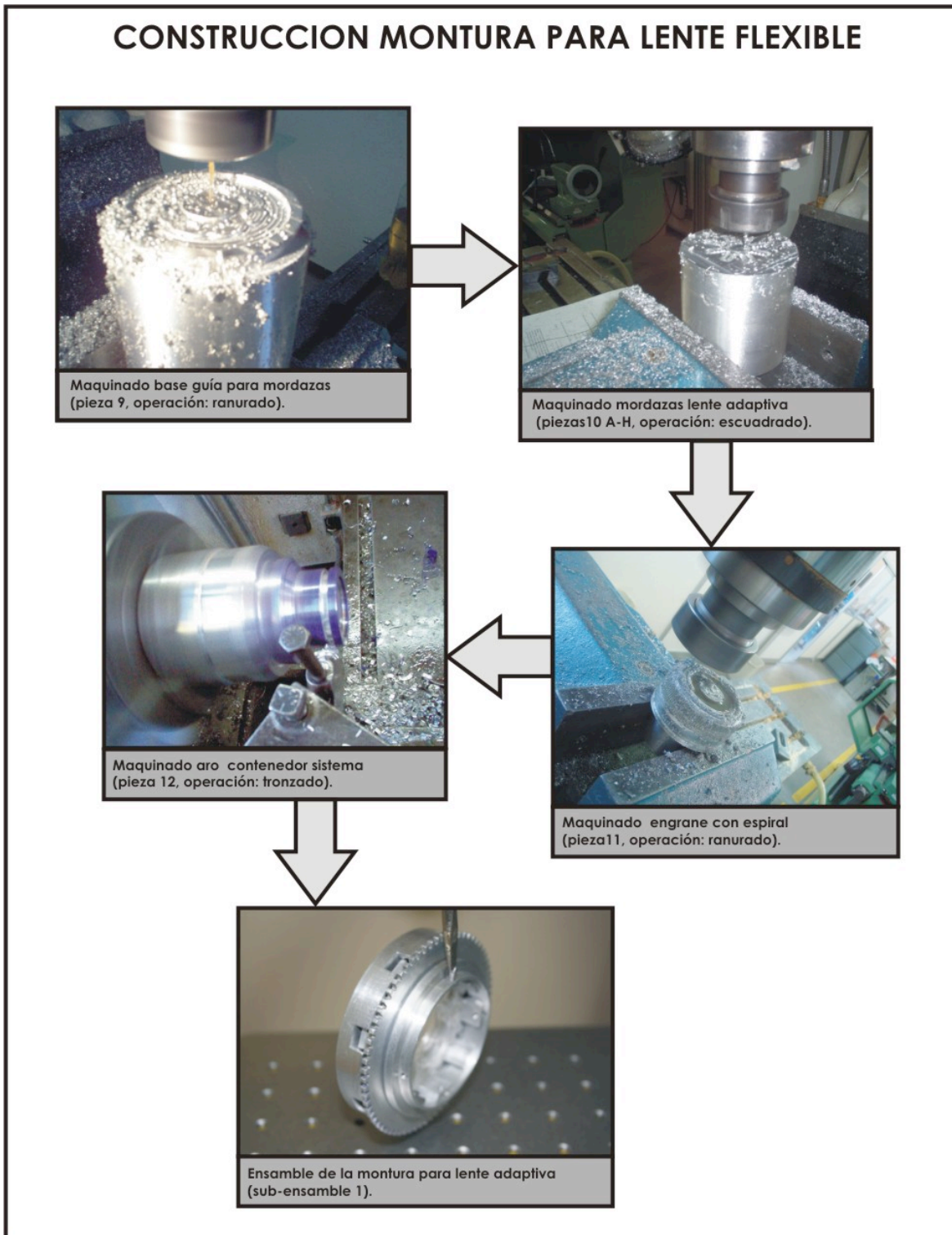
Para el dimensionamiento de los cortes, se utilizaron herramientas de medición y marcado. Para las mediciones se utilizó un vernier, un vernier digital, un micrómetro y un indicador de carátula para el centrado de las piezas en el torno (Fig. 73). Para el marcado de los cortes se uso tinta azul y una charrasca para el rayado de los trazos.



**Figura 73.** Utilización de un indicador de carátula para centrado y tinta azul para marcado.

### 5. 3 MANUFACTURA DE LA MONTURA.

La secuencia de construcción de la montura se desarrolló como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 74, mostrando en cada uno de los pasos la imagen de una de las operaciones efectuadas en cada pieza.



**Figura 74.** Diagrama de flujo esquemático del maquinado de la montura para la lente flexible.

## 5. 4 VACIADO DE LALENTE FLEXIBLE.

El proceso de vaciado de la lente comenzó con el maquinado de los moldes de acrílico (Fig. 75). La geometría de estos moldes fue pensada de tal forma que contuviera las mordazas maquinadas para la montura, esta fue la razón por la que se impuso primero la manufactura de la montura.

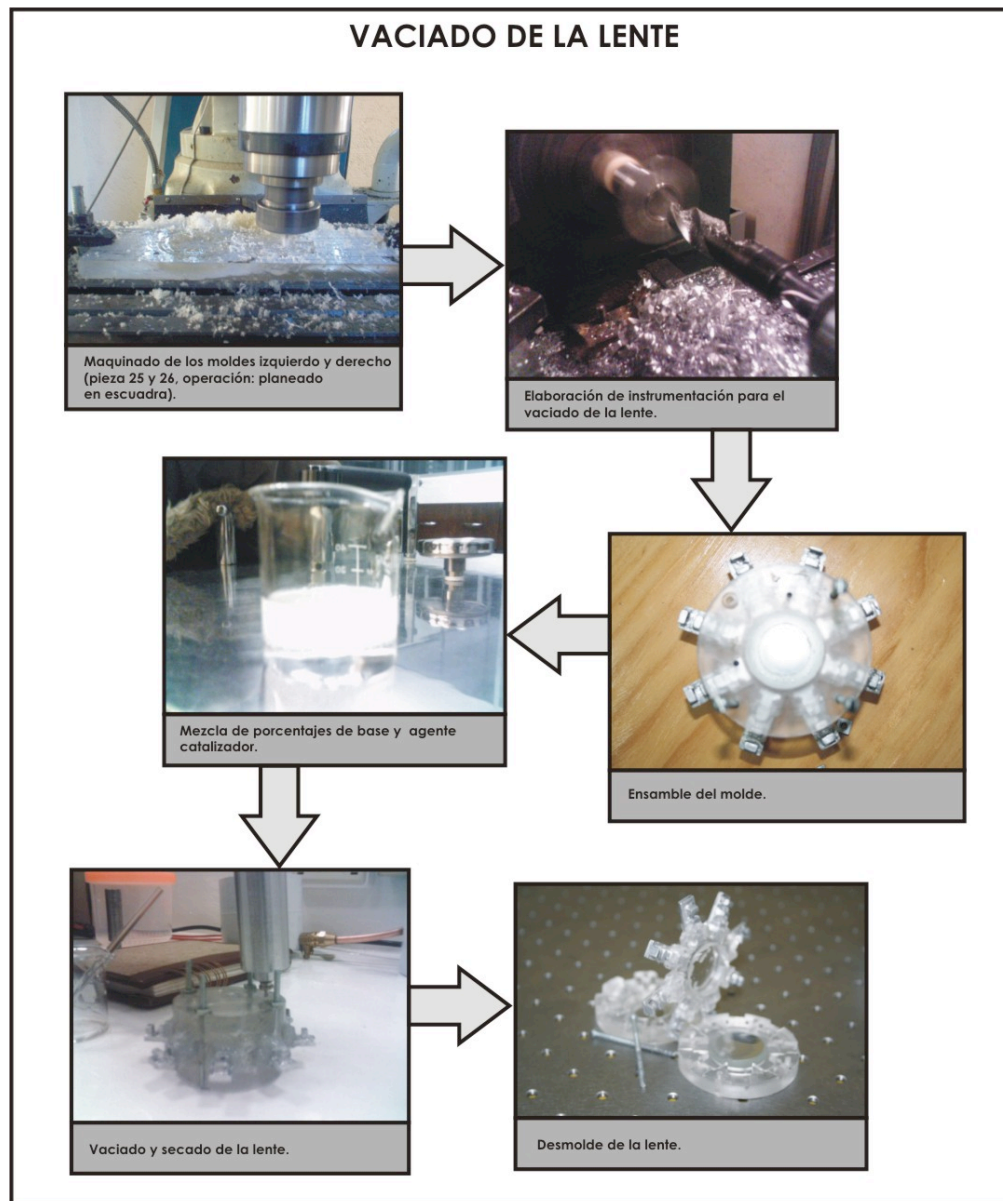
Dado que la viscosidad del silicón elastómero es alta en comparación con la del agua, se tuvo que construir una jeringa de aluminio que ejerciera la presión necesaria para inyectar el elastómero dentro de los moldes (posterior a la etapa del mezclado). Esto porque las jeringas comunes tienen un orificio de salida muy pequeño y la fuerza aplicada al pistón (de acuerdo con las leyes de la hidráulica) tendría que ser alta dada la viscosidad de la resina, dificultando de esta forma el proceso de inyección.

Para el armado del molde se colocaron mediante presión las lentes dentro de las piezas de acrílico, posterior a esto se aplicó silicón comercial de tal forma que permanecieran estáticas. Se tuvo especial cuidado de mantener limpias las superficie de las lentes convexas, para evitar que después del desmolde la superficie de la lente flexible no contara con la transparencia requerida. Después del prensado con los tornillos y tuercas se aplicó sellador comercial alrededor de las superficies de contacto de los moldes, evitando así cualquier posible fuga.

Otro proceso de suma importancia fue la mezcla de la base y el agente catalizador del elastómero. Las proporciones de los componentes sugeridas por el proveedor, son de 10 partes de la base por 1 parte del agente catalizador. Cabe destacar que las propiedades mecánicas (elongación, resistencia) cambian de acuerdo a la cantidad de agente catalizador que se le agregue a la base, esto también modifica los tiempos de secado. Para este vaciado únicamente se utilizó la proporción 1:10, porque las propiedades y características del material ocupadas para los distintos análisis y simulaciones fueron calculadas para esta razón.

El vaciado se efectuó tratando de mantener en movimiento oscilatorio el molde armado, para así poder eliminar todas las burbujas presentes en la mezcla y que pudieran afectar la composición de la lente después del curado.

Para el desmolde de la lente se tuvo especial cuidado de no romper la lente en la parte de las uniones con los soportes que se encuentran adheridos a las mordazas, puesto que en la circunferencia de la lente flexible se encuentran los puntos más débiles.



**Figura 75.** Diagrama de flujo para el vaciado de la lente.

## 5.5 MANUFACTURA DE LA CARCASA.

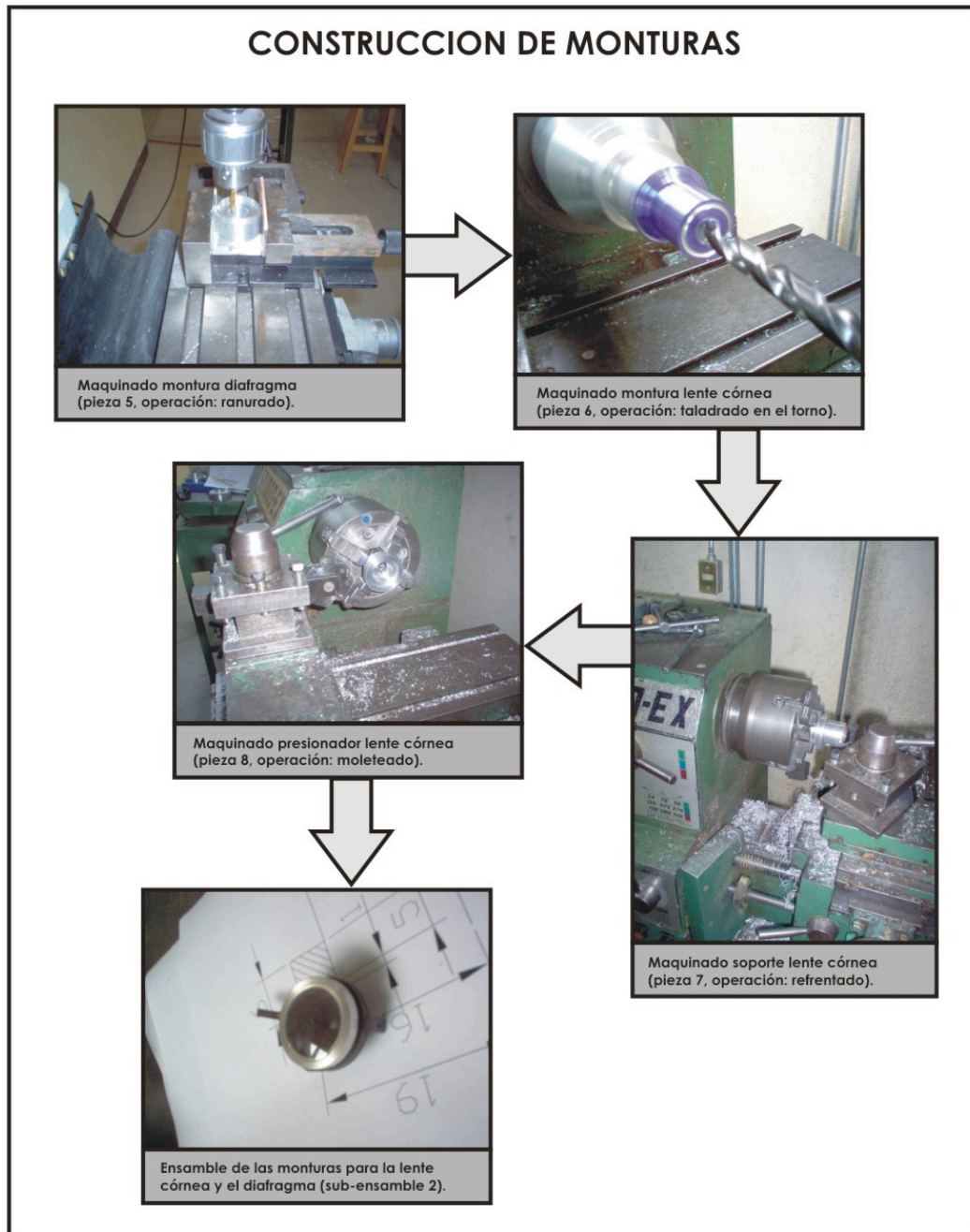
La carcasa del modelo se compone de diferentes tipos de piezas: monturas para los elementos ópticos, el tornillo sinfín y las tapas. Por lo que la manufactura de la carcasa se siguió de acuerdo a los pasos del diagrama de flujo inicial. Como la carcasa esta



constituida por dos sub-ensambles, la manufactura de las piezas se desarrolla en diagramas de flujo por separado.

### 5. 5. 1 MAQUINADO MONTURAS PARA LENTE CORNEA Y DIAFRAGMA.

Para la construcción de las monturas (Fig. 76) se tuvo especial cuidado de que todos los componentes ópticos encajaran perfectamente sobre las piezas maquinadas, esto con el fin de evitar que quedaran desalineados respecto al eje óptico.



**Figura 76.** Diagrama de flujo para el maquinado de las monturas para lente córnea y diafragma.

### 5. 5. 2 MAQUINADO COJINETE Y TORNILLO SINFIN.

Durante el torneado para el tornillo sinfín, en cada pasada, se fue verificando que el gusano encajará perfectamente con los dientes del engrane recto (Fig. 77). Para la operación de machuelado se usó líquido de corte para evitar un posible rompimiento del machuelo por las fuerzas de corte, evitando así el volver a repetir la pieza completa.



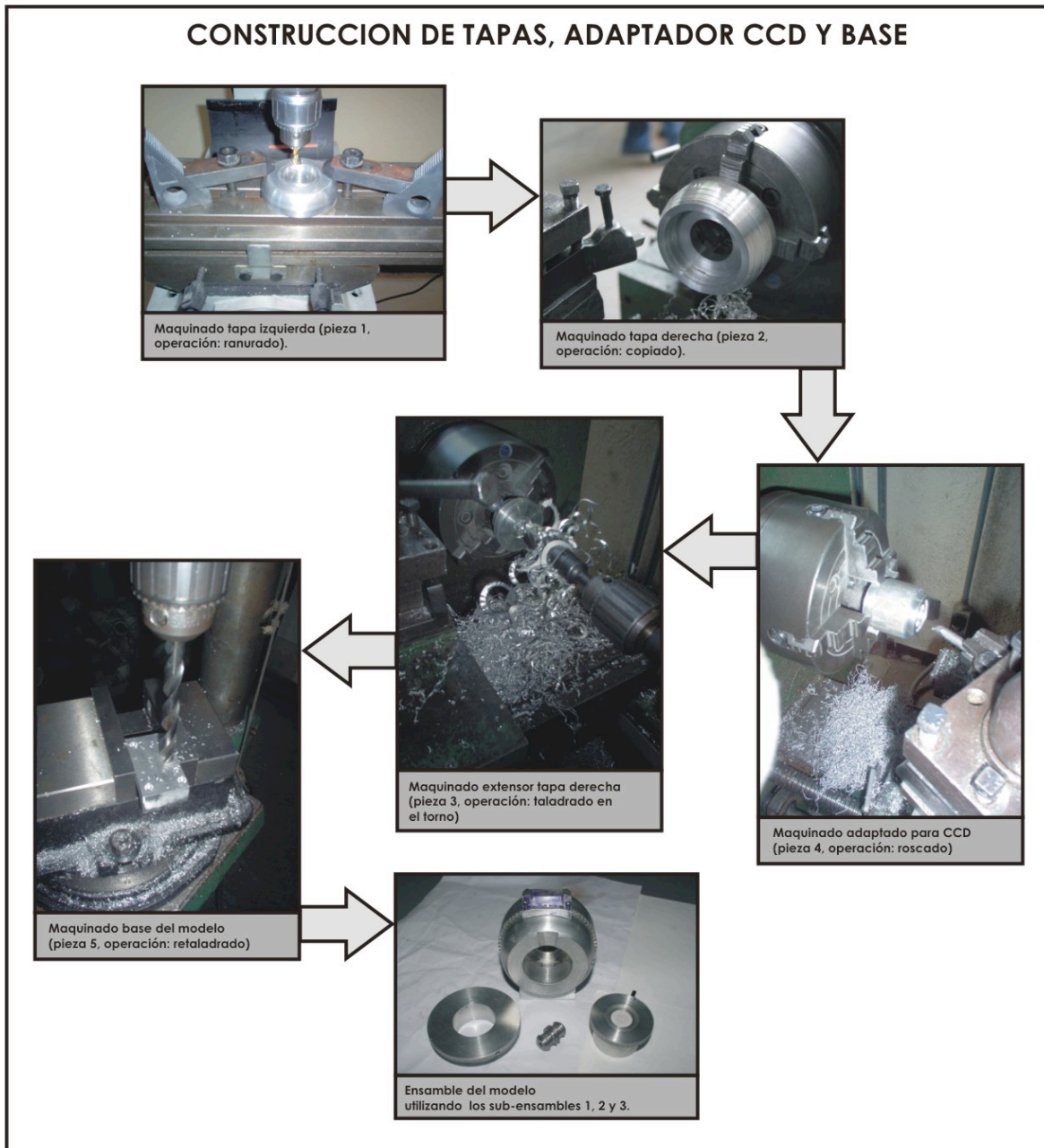
**Figura 77.** Diagrama de flujo para el maquinado del cojinete y tornillo sinfín.

### 5. 5. 3 MAQUINADO TAPAS Y ADAPTADOR CCD.

Para el maquinado de las tapas derecha e izquierda (Fig. 78), se utilizó la montura de la lente flexible para verificar que las cavidades de las tapas contuvieran a la montura principal. El sub-ensamble de las monturas para la lente córnea y diafragma se usó para verificar la medida del diámetro del barreno de la tapa izquierda. Y después de

maquinada la tapa derecha se torneó el adaptador para la cámara CCD, que a su vez se uso para verificar la medida del extensor de la tapa derecha.

El sub-ensamble (cojinete con tornillo sinfín) y la base, se usaron para situar los barrenos que sirvieron de guía para el machuelo, el cual cortaría la rosca sobre la que van los tornillos que unen ambas tapas.



**Figura 78.** Diagrama de flujo el maquinado de los elementos complementarios de la carcasa.

## 5. 6 ENSAMBLE.

Para efectuar los ensambles: tres sub-ensambles (Fig. 79) y un ensamble final (Fig. 80) se utilizaron herramientas de mano, en este caso llaves allen para tornillos opresores de 1/4 , 3/16, 1/8 de plg y un desarmador plano. En los diagramas de flujo se especifican los pasos consecutivos que se realizaron para el armado final del modelo. Cada paso se considera como la superposición de una pieza con otra, al igual que el ajuste de todos los tornillos para una pieza.

### 5. 6. 1 SUB-ENSAMBLES.

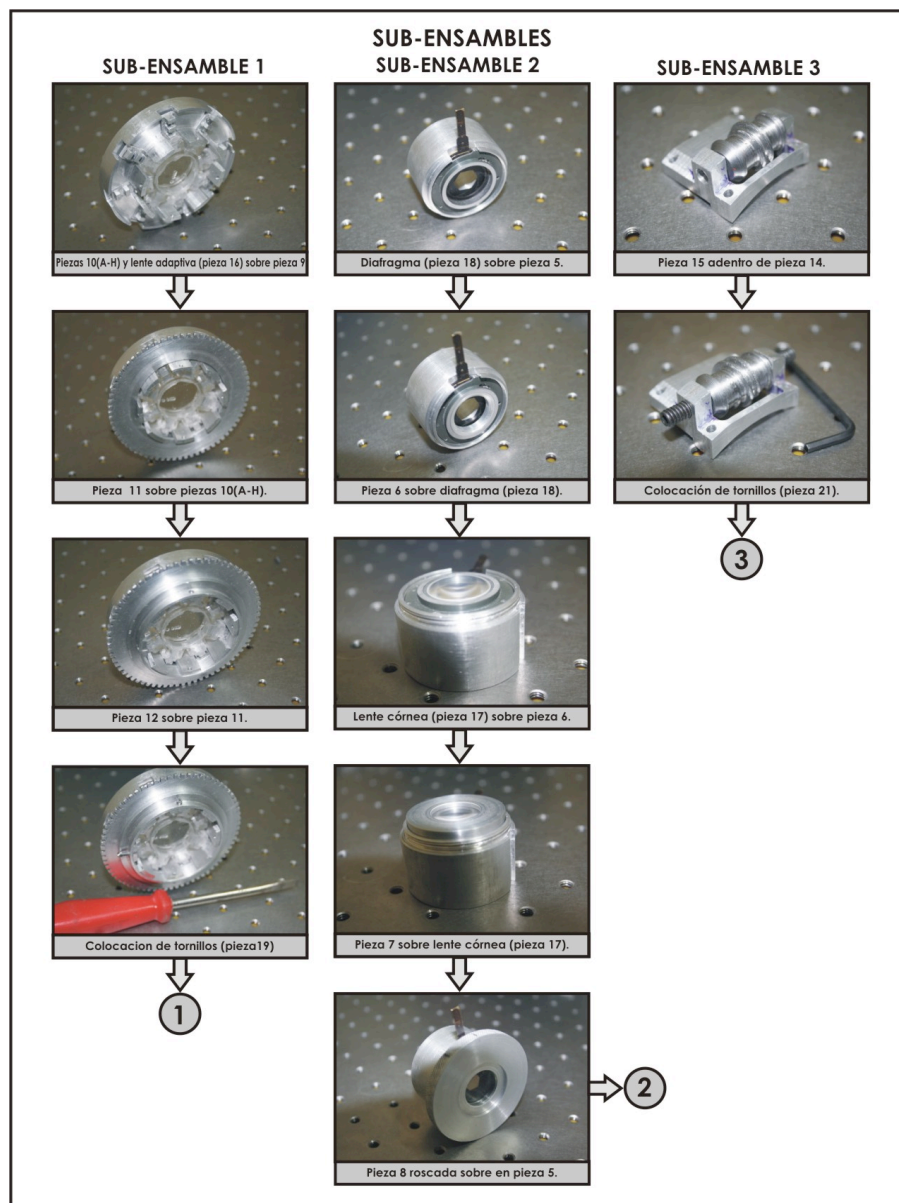


Figura 79. Diagrama de flujo de sub-ensambles.

5. 6. 2 ENSAMBLE FINAL.

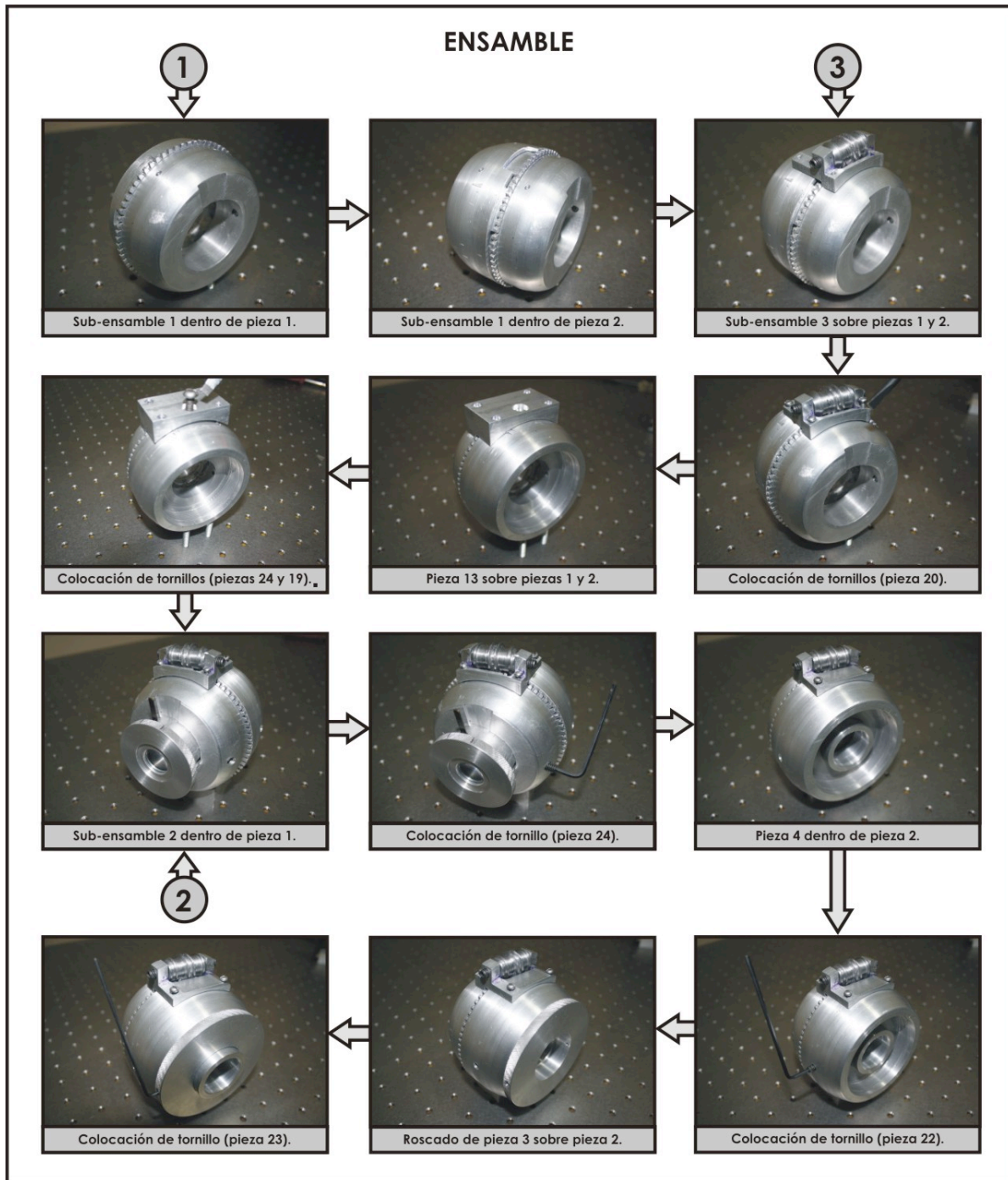
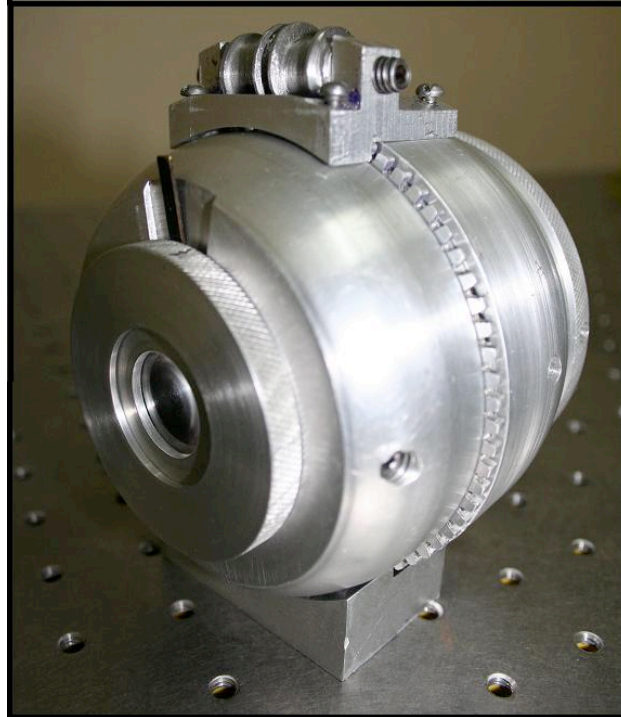


Figura 80. Diagrama de flujo de ensamble final.

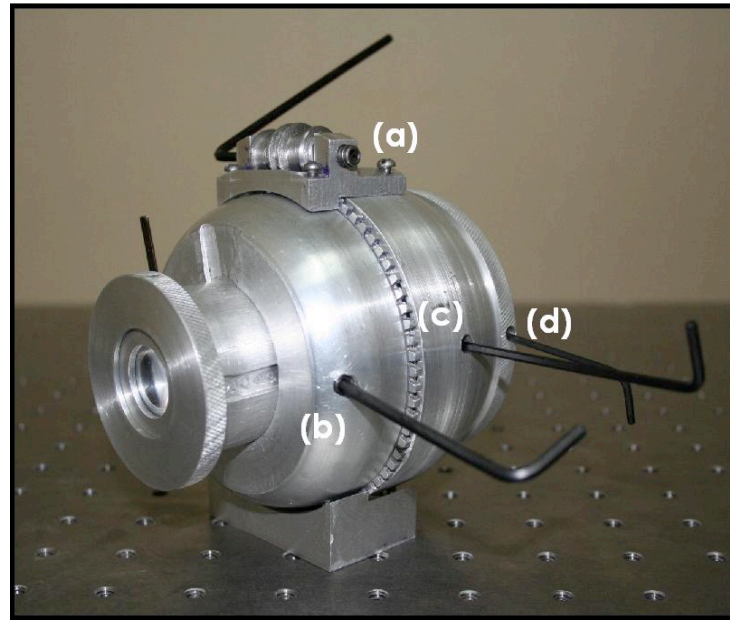
## 5. 7 MODELO A PRESENTAR.

En la figura 81 se presenta el modelo finalizado, al cual se le realizaron análisis de funcionamiento que son presentados en el siguiente capítulo.



**Figura 81.** Modelo opto-mecánico del ojo humano.

Para acoplar y hacer funcionar los distintos mecanismos por medio de los cuales funciona el modelo, es necesario contar con las herramientas necesarias para aflojar o apretar los tornillos opresores que presionan las distintas piezas que requieren movimiento o rigidez. Llaves allen son utilizadas para realizar el giro del engrane recto (Fig. 82a), dependiendo del lado al que se desea girar el engrane: para ejercer las fuerzas radiales sobre la lente flexible, el engrane debe girar en sentido de las manecillas del reloj, por lo tanto se debe apretar el tornillo del lado derecho, y si se quisiera aflojar el sistema, se debe apretar el tornillo del lado izquierdo. Los demás tornillos sirven para ajustar las distancias a las que se mueven los distintos elementos ópticos (respecto al eje óptico), uno para ajustar las monturas de la lente córnea y diafragma (Fig. 82b), y dos para ajustar la distancia de la cámara CCD hacia la lente: sin extensor (Fig. 82c) y con extensor (Fig. 82d). Las medidas de las llaves son las mismas de las que se usaron para los ensambles.



**Figura 82.** Modelo con las llaves allen para modificar sus parámetros ópticos, de 1/4 (a y b), 3/16 (c) y 1/8 (d) de plg.

# 6

# ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO.

En este capítulo se describe el análisis de funcionamiento del sistema, el cual está dividido en dos partes. En la primera parte se comprobó mediante mediciones experimentales y análisis matemáticos de los datos, el funcionamiento de la lente flexible. En la segunda parte se realizó el análisis de funcionamiento del modelo optomecánico completo mediante la obtención de imágenes y comparaciones visuales entre ellas. Para ello se compararon los enfoques de objetos reales a diferentes distancias que permitieron conocer los rangos de funcionamientos del sistema construido.

Se realizaron por completo en el laboratorio de óptica adaptativa de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Para lo cual, se hizo uso de herramientas (llaves, desarmadores, vernier), instrumentos (postes, monturas, láser) y del software OSLO® para encontrar todos los parámetros ópticos que intervienen en el funcionamiento de la lente propuesta.

Cabe resaltar que en el análisis de la lente, se llegó a los límites máximos de resistencia de fuerzas, por lo que esta fue destruida. Debido a esto, para el análisis del modelo completo se conformó una nueva lente, en la cual las características y mediciones obtenidas del primer análisis, permitieron trabajar sobre los rangos de funcionamiento que evitaron que la lente se sobrecargara, impidiendo así su rompimiento.

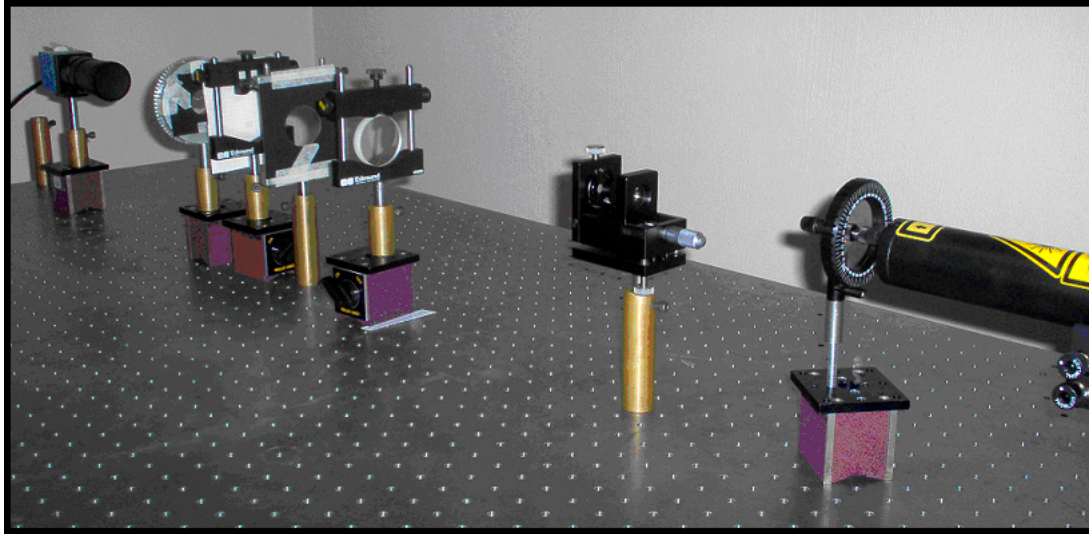
## **6.1 CARACTERIZACION DE LA LENTE.**

### **6.1.1 ANALISIS DE LA CURVATURA INICIAL DE LA LENTE FLEXIBLE.**

El análisis de la lente se inició con la medición de sus parámetros geométricos: espesor axial y marginal, índice de refracción, radios de curvatura y longitud focal. Para probar

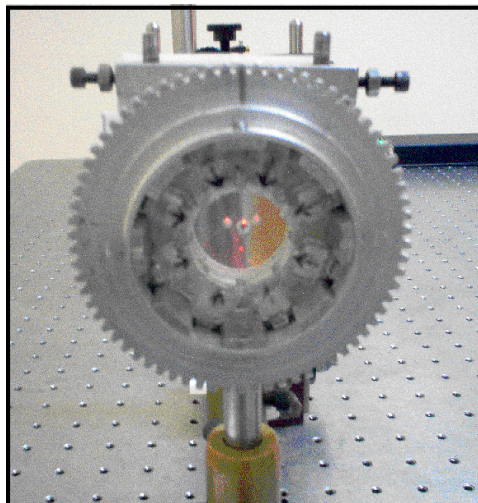


la lente elástica, se montó el arreglo experimental mostrado en la figura 83, en el cual se le hizo incidir un frente de onda plano a la lente, es decir, se consideró una fuente puntual al infinito sobre el eje óptico<sup>61</sup>.



**Figura 83.** Arreglo experimental montado para probar la lente elástica.

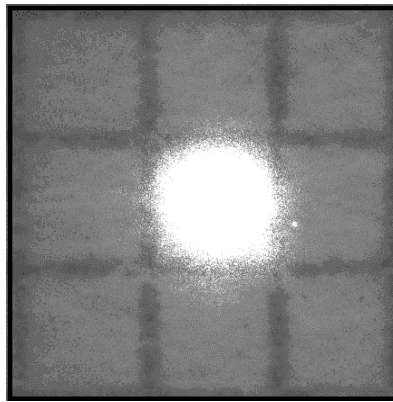
En la figura 84 se observa que la lente fue montada sobre un poste (roscado sobre la pieza 9) que a su vez se montó sobre una base magnética (de 150 lbs/fuerza) lo que se traduce en que la lente flexible permaneció estática, de modo que al girar los engranes de la montura de la lente; esta se mantuvo alineada al eje óptico del sistema, obteniendo así, resultados más precisos.



**Figura 84.** Montura montada sobre un poste.

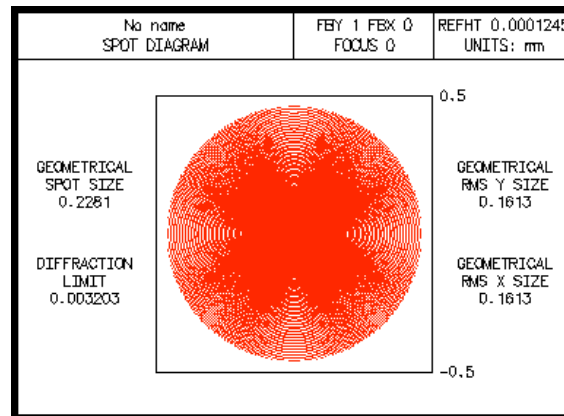
<sup>61</sup> A. Santiago-Alvarado, S. Vázquez-Montie, F. Iturbide-Jiménez, R. Arriaga-Martínez, and J. González-García, "The Design, Construction and Characterization of a Solid Elastic Lens", in *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IX*, Pantazis Z. Mouroulis, Warren J. Smith, R. Barry Johnson, eds., Proc. SPIE 7060, 706017 (2008). ISBN: 9780819472809.

Antes de haber aplicado algún esfuerzo radial a la lente elástica, se capturó (con una cámara CCD) la imagen que forma la lente de una fuente puntual colocada al infinito, conocida como mancha de mínima confusión, en donde la lente enfoca la imagen con mayor intensidad (punto focal). La mancha fue generada a una distancia de 121 mm del vértice posterior de la lente, en la figura 85 (hoja milimétrica) se puede observar que el tamaño de la mancha es de alrededor de un 1 mm de diámetro. Por otro lado, experimentalmente se midió el espesor axial ( $t = 4.22$  mm) y marginal ( $e = 2$  mm) e índice de refracción ( $n = 1.4157$ ), y a partir de ellos se encontraron los radios de curvatura de la lente biconvexa, dando un valor de  $r = 101.90635$  mm. Otro dato importante es el diámetro de la lente el cual es de 30 mm<sup>62</sup>.



**Figura 85.** Mancha de mínima confusión generada por la lente elástica.

Estos parámetros se introdujeron al programa OSLO® y se realizó un trazo de rayos a la lente colocando la fuente puntual al infinito, la mancha de mínima confusión que arroja el programa es mostrada en la figura 86, a una distancia del vértice de la superficie de 121.8258 mm, y con un tamaño de mancha menor a 1 mm de diámetro<sup>63</sup>.



**Figura 86.** Diagrama de mancha de la lente flexible generada con OSLO®.

<sup>62</sup> Ítem 61.

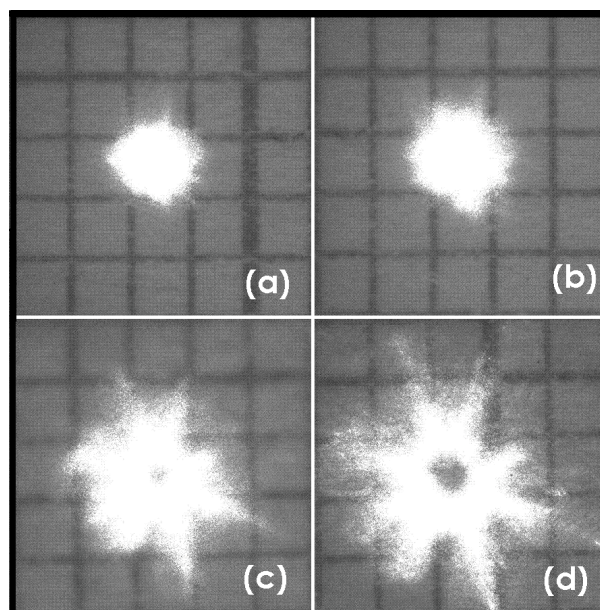
<sup>63</sup> Ítem 61.

El diseño evaluado en OSLO® arroja que la lente flexible tiene una longitud focal efectiva de 123.318 mm<sup>64</sup>. Al comparar ambas manchas (la imagen capturada y la generada por OSLO) se observa que la imagen real se ajusta a los valores medidos experimentalmente.

### 6. 1. 2 APLICACION DE FUERZAS RADIALES A LOS BORDES DE LA LENTE.

Se le aplicaron esfuerzos a la lente elástica mediante el desplazamiento radial del sistema de mordazas, esto se realizó por medio del giro del engrane recto. El desplazamiento máximo normal y opuesto al eje óptico del sistema fue calculado en 3.2 mm, esto por las dimensiones de la lente, ya que el sistema sin lente tiene un desplazamiento total de 7.8 mm.

En la figura 87 se muestran los diagramas de mancha generados por la lente elástica al girar el disco dentado: 6, 8, 14 y 19 dientes, la posición del plano imagen, con respecto a la lente se mantuvo constante en 121 mm. Por cada diente girado, el desplazamiento radial provocado en cada mordaza es de 0.0914 mm. Así que el desplazamiento lineal de las mordazas provocado por el giro de la espiral fue de: para 6 dientes 0.5484 mm (Fig. 87a), para 8 dientes 0.7312 mm (Fig. 87b), para 14 dientes 1.2796 mm (Fig. 87c) y para 19 dientes 1.7366 mm (Fig. 87d)<sup>65</sup>.

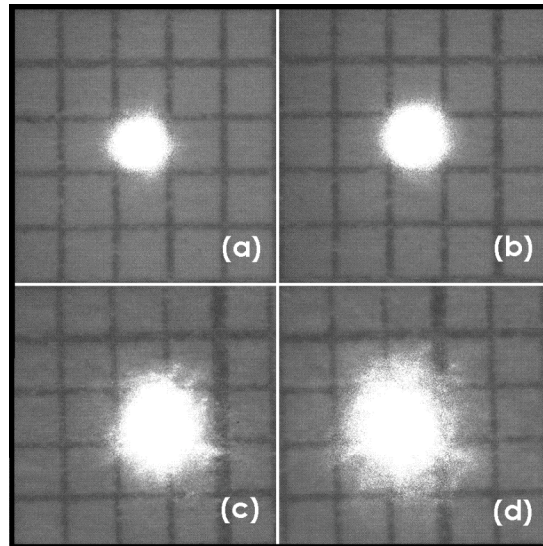


**Figura 87.** Diagramas de mancha al girar el engrane. Nótese la forma de la mancha, debida a las tensiones generadas en los extremos.

<sup>64</sup> Ítem 61.

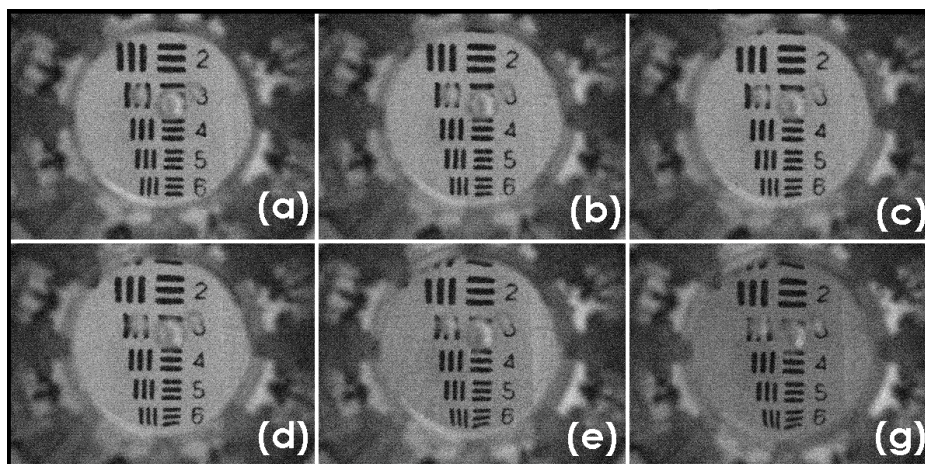
<sup>65</sup> Ítem 61.

Con el objetivo de comprobar si la lente elástica enfocaba al aplicarle fuerzas radiales, el plano imagen fue movido para cada uno de los respectivos desplazamientos de mordaza generados, esto con la intención de encontrar la mancha de mínima confusión. Las manchas mínimas de confusión fueron encontradas a: 125 (Fig. 88a), 127 (Fig. 88b), 131 (Fig. 88c) y 135 mm (Fig. 88d) de distancia con respecto al vértice de la lente.



**Figura 88.** Manchas de mínima confusión generadas al girar el engrane y mover el plano imagen.

En la figura 89 se muestra la calidad de las imágenes generadas por la lente elástica al ser usada como lupa y mover el engrane de la montura: 0 (Fig. 89a), 6 (Fig. 89b), 8 (Fig. 89c), 10 (Fig. 89d), 12 (Fig. 89e) y 14 (Fig. 89f) dientes. El objeto fue posicionado a 6.1 cm de la lente y la lente a 23 cm de la cámara CCD<sup>66</sup>.



**Figura 89.** Imágenes generadas por la lente elástica al ser usada como lupa.

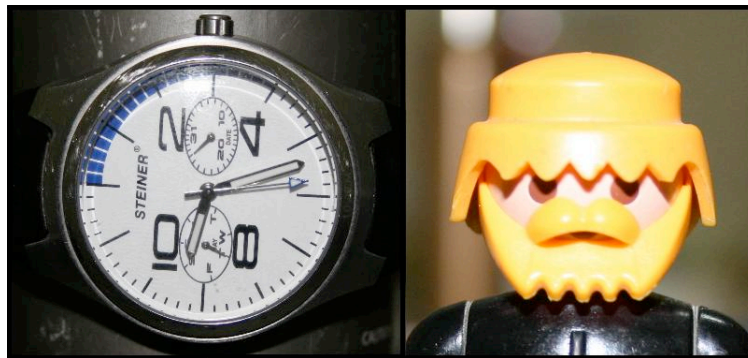
<sup>66</sup> Ítem 61.

Del análisis anterior se concluye que la lente elástica se comporta como se esperaba: cambiando sus parámetros ópticos al aplicarle fuerzas radiales sobre los bordes.

## 6. 2 PRUEBAS DEL MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO.

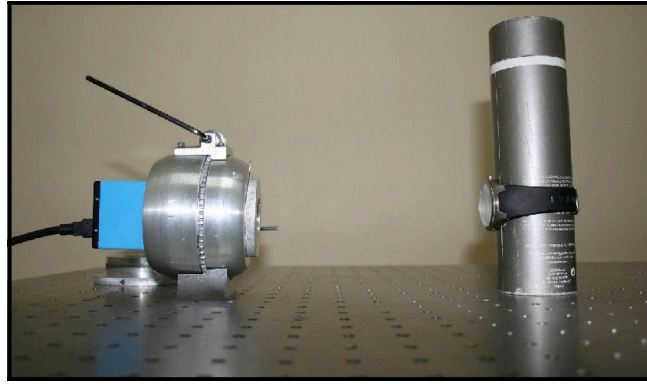
### 6. 2. 1 CALCULOS DE LOS RANGOS DE FUNCIONAMIENTO.

Para este análisis se ocuparon dos objetos de estudio (Fig. 90): Un reloj de manecillas (para delimitar los rangos de funcionamiento) y un muñeco de plástico (para el enfoque mediante el giro del engrane). El movimiento de los elementos ópticos (en sentido del eje óptico) para enfocar el reloj a diferentes distancias, permitió conocer los rangos máximos y mínimos en los que se puede enfocar el sistema, además de que permitió visualizar la amplificación de las imágenes a través de las varias combinaciones de distancias. El muñeco se utilizó para el enfoque de objetos a diferentes distancias, esto mediante la aplicación de fuerzas radiales sobre la lente flexible, cambiando de esta forma sus parámetros ópticos. El muñeco fue escogido debido al buen contraste que presentó en las imágenes al utilizar una luz direccional.



**Figura 90.** Objetos a enfocar: reloj de manecillas y muñeco de plástico.

En la figura 91 se muestra el arreglo experimental implementado para hacer la captura de las imágenes, el cual consistió en el reloj montado sobre un poste y el modelo opto-mecánico. Se observa el detector (cámara CCD) en la parte izquierda de la fotografía, la cual se conectó directamente a la computadora en donde por medio de un software se capturaron las imágenes.



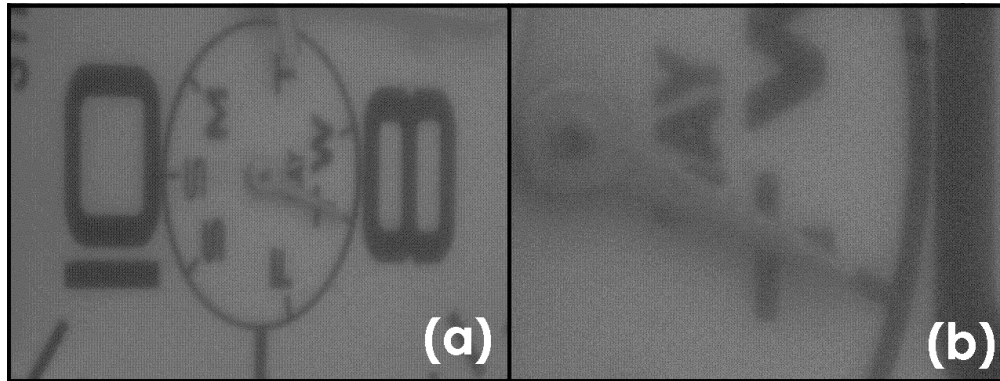
**Figura 91.** Disposición de elementos para encontrar los rangos máximos de funcionamiento.

Se calcularon las distancias máximas y mínimas entre los componentes que integran el modelo, las combinaciones (apéndice B) se efectuaron de tal forma que se encontraron las distancias (entre la lente córnea y el objeto) que delimitan el funcionamiento del modelo sin la aplicación de fuerzas radiales sobre la lente flexible. Estas distancias y el rango de trabajo son presentados en la tabla 25.

<b>DISTANCIAS MAXIMAS Y MINIMAS (mm)</b>	
Distancia mínima lente córnea a la lente elástica	34.3
Distancia máxima lente córnea a la lente elástica	46.8
Distancia mínima lente elástica al detector (sin extensor)	27.9
Distancia máxima lente elástica al detector (sin extensor)	33.1
Distancia mínima lente elástica al detector (con extensor)	50.6
Distancia máxima lente elástica al detector (con extensor)	60.9

**Tabla 25.** Distancias máximas y mínimas entre los distintos elementos ópticos.

Moviendo los elementos a las distancias mínimas lente córnea-lente elástica-detector se encontró que la distancia objeto-lente córnea máxima para enfoque es de 175 mm (Fig. 92a). Y cambiando los elementos a las distancia máximas lente cornea-lente elástica-detector se encontró que la distancia objeto-lente córnea mínima para enfoque es de 75 mm (Fig. 92b). Por lo tanto el rango para realizar el enfoque con la lente elástica en reposo va de 75 a 175 mm. De estos valores se dedujo que para realizar el análisis de enfoque del objeto mediante la aplicación de fuerzas sobre la lente flexible, el objeto debe estar a una distancia mayor de 75 mm (haciendo el arreglo de distancias máximas) o bien una distancias mayor a 175 (haciendo los arreglos de distancias mínimas).

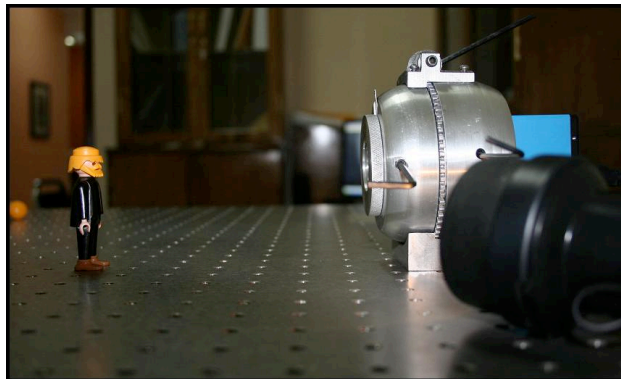


**Figura 92.** Arreglos de enfoque: mínimas distancias (a) y máximas distancias (b).

De los valores establecidos se establecieron combinaciones que permitieran hacer un análisis de enfocamiento.

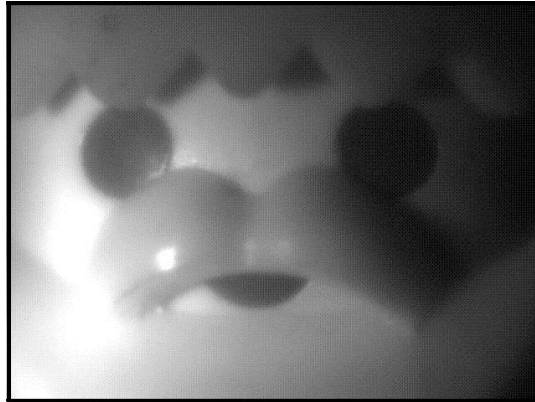
### 6. 2. 2 ENFOQUE DE UN OBJETO MEDIANTE LA APLICACION DE FUERZAS RADIALES.

Se eligió la máxima distancia de la lente córnea-objeto de enfoque en reposo. Para ello se usó la configuración de mínimas de distancias. El objeto se situó a una distancia aproximada de 175 mm del modelo (Fig. 93). Se hizo uso de una lámpara de mano para contrastar la imagen capturada por la computadora. También se utilizó el diafragma del modelo para contrastar aún más la imagen y eliminar el brillo excesivo por el reflejo de la luz de la lámpara sobre la superficie del objeto.



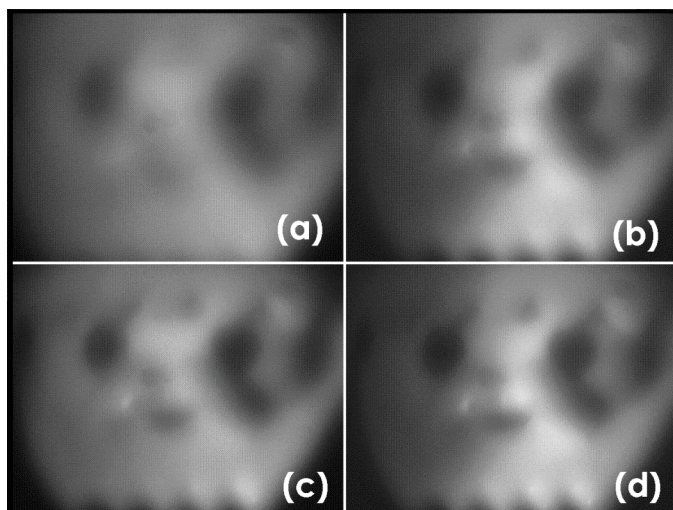
**Figura 93.** Disposición del objeto a estudio, del modelo y una luz direccional para crear contraste sobre el objeto.

La imagen capturada por el detector en la que se logró el mayor enfoque y buen contraste es mostrada en la figura 94.



**Figura 94.** Muñeco de plástico a enfoque máximo.

Para realizar el enfoque con la lente elástica, se movió el objeto a una distancia (alejada del modelo) de 25 mm, dando una distancia total hasta el modelo de 200 mm (Fig. 95a). El número de dientes girados se determinó mediante el análisis de funcionamiento previo que se le realizó a la lente, fundamentado en el hecho de que la lente no se tenía que sobrecargar a un punto donde la fractura fuera inminente. El número de dientes girados fueron 8 (Fig. 95b), 14 (Fig. 95c) y 19 (Fig. 95d) respectivamente. Se observa cierto enfoque al girar los engranes, enfoque que no es al cien por ciento como el de la figura 94, pero como es una prueba experimental, este se podría mejorar modificando la lente: cambiando sus propiedades mecánicas (variando el porcentaje de catalizador) y sus parámetros ópticos en reposo. Finalmente se movió el objeto hacia el modelo, con la intención de que se llegara a un enfoque máximo, de tal forma que el objeto quedo enfocado a una distancia de 187 mm. El resultado es verificable y comparable con el análisis que se le hizo a la montura sola (tomando en cuenta que se realizaron dos vaciados).



**Figura 95.** Muñeco de plástico 25 mm atrás del enfoque máximo: engrane sin girar (a), a 8 (b), a 14 (c) y a 19 (d) dientes girados.



# CONCLUSIONES GENERALES.

En primera instancia se cumplieron con los objetivos primordiales de: diseñar, construir y analizar un modelo opto-mecánico del ojo humano que simulara el funcionamiento real, y el cual incluyó el desarrollo de una lente adaptativa. Como parte inicial del proyecto, se hizo énfasis en el funcionamiento del cristalino, la parte del ojo que se encarga del enfoque. Para ello se diseñó una lente que cumpliera con esta función, hecha de un elastómero especial (por las características ópticas que presenta) para que se le aplicaran fuerzas en los bordes y se pudiera llevar a cabo una deformación que permitiera hacer los enfoques como lo hace el cristalino en el ojo humano. Se propuso un modelo teórico que permitió describir y calcular las distancias a las que se tenían que ubicar los elementos ópticos para el correcto funcionamiento del modelo. Posteriormente tras la construcción del modelo se hicieron análisis para comprobar su funcionamiento, estos arrojaron resultados satisfactorios ya que la lente flexible si cambia sus parámetros geométricos al aplicarle fuerzas radiales sobre sus bordes.

Se siguieron todos los pasos elegidos de la metodología de Bruno Munari, así como las sub-metodologías que fueron ocupadas para la evaluación y solución del problema. Para la etapa de creatividad se utilizó la metodología de diseño opto-mecánico proporcionada por Yoder, lo que permitió involucrarnos en los factores que intervienen para el desarrollo de monturas ópticas para diferentes tipos de requerimientos, también se conocieron los factores que intervienen al momento de evaluar un buen diseño opto-mecánico. Por otra parte, se hizo uso de la metodología QFD (despliegue de función de la calidad), que sirvió para evaluar las propuestas de montura y elegir la que mejor cumplía con las especificaciones de diseño y requerimientos constructivos, para ello se utilizó la matriz de calidad. Finalmente se aplicó la planeación de procesos, que permitió (mediante una serie de pasos) elegir la secuencia que se seguiría para la construcción de cada pieza haciendo uso de las herramientas con las que dispone el taller de metalmecánica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Fue indispensable la utilización de software durante el desarrollo del proyecto. Se usó Maple® para el planteamiento teórico con el fin de situar las distancias entre los elementos ópticos, posteriormente la utilización de herramientas CAD/CAM permitieron realizar diseños preliminares, AutoCAD® y Rhino® para el desarrollo de los diseños, 3d Max® para renderización, Solidworks® para análisis de diseño mecánico y la aplicación Cosmosworks® para los análisis de elemento finito mediante el cual se comprobó el funcionamiento de los mecanismos y la propuesta de lente adaptativa. Así también como VISI-Series® para crear los archivos NC que se usaron para el maquinado de piezas complejas. Y finalmente de OSLO® para simular el comportamiento óptico del sistema, el cual permitió el cálculo exacto de los parámetros ópticos del sistema que permitieron comprobar los datos experimentales obtenidos. La utilización de estas herramientas ahorró tiempo, optimizó el diseño y mejoró la productividad dentro del taller.

Como parte importante del proyecto fue la simulación de las deformaciones mediante FEA que ayudaron a visualizar el comportamiento de los elementos principales y encontrar los límites sobre los cuales trabajar. El desarrollo de estos análisis condujo a datos significativos: la carga máxima que aguanta el sistema, los factores de seguridad con los que trabaja el sistema, la tensión máxima generada por la aplicación de la carga, los probables puntos de fractura de la pieza y los desplazamientos máximos en cada punto, entre muchos otros. Con la obtención de estos datos, se puede optimizar el diseño: cambiando dimensiones, replanteando la forma, eliminando material, modificando el sistema e incluso seleccionando otro material con distintas propiedades mecánicas. La implementación de este análisis permitió medir los parámetros que intervendrían en la deformación de la lente, y el proceso de obtención de resultados (apéndice A) se deja como precedente para la aplicación de futuros análisis mediante FEA.

El desarrollo del modelo también permitirá estudiar propiedades mecánicas de distintos materiales elásticos. En concreto para seguir haciendo pruebas con el elastómero Sylgard 184® que es el material con el que se ha trabajado para fabricar membranas elásticas. Este modelo está diseñado para realizarle modificaciones que permitan mejoras y diferentes aplicaciones. Otro beneficio implícito en el desarrollo del proyecto

es el precedente para la fabricación de monturas mediante el aprovechamiento de la maquinaria en la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Así también el desarrollo de la lente flexible sirvió para la presentación y publicación de un artículo<sup>67</sup> en la Sociedad Internacional de Ingeniería Óptica (SPIE). En trabajos futuros se espera exponer más adelantos respecto a la aplicación de esta lente en instrumentos ópticos.

Finalmente se espera desarrollar monturas más pequeñas y delgadas (con mecanismos más complejos) que permitan aplicaciones diversas, y que por sus dimensiones podrán ser transportables. Esto porque el tamaño mínimo de herramienta ocupado fue de 1/16 de plg, y se comprobó que es posible trabajar con herramientas más pequeñas empleando la fresadora de control numérico, por lo que se podría trabajar en proyectos futuros con herramientas (disponibles en catálogos) de hasta 1/64 de plg, disminuyendo de esta forma en tres cuartas partes las dimensiones de las monturas.

Las metodologías, procesos, análisis y pruebas efectuadas a lo largo de la tesis, dejaron como experiencia el entendimiento del trabajo multidisciplinario que se emplea en el desarrollo de proyectos, cuya complejidad necesita de distintas ramas del conocimiento para ser aplicadas en problemas particulares que surgen durante el desarrollo del mismo. También se pudo comprobar la importancia de los conocimientos adquiridos como Ingeniero en Diseño que permiten su aplicación en distintas ramas de la ciencia y la investigación, particularmente para este proyecto el conocimiento de procesos para distintos tipos materiales permitió llegar a resultados aceptables.

---

<sup>67</sup> Item 61.

# BIBLIOGRAFIA.

## LIBROS.

- Hecht, Eugene. "Óptica". Ed. Addison Wesley Iberoamericana, 3era. Edición, Madrid (2000).
- Amar, Agarwal, "Presbicia – Texto Quirúrgico", Highlights of Ophthalmology International (2002).
- Munari, Bruno. "Cómo nacen los objetos". Ed. Gustavo Gili. 8ava. Edición. Barcelona (2000).
- Yoder, Paul R. "Opto-mechanical systems desig", Marcel Deskker, Inc. Second Edition, New York (1993).
- Smith, Warren J. "Image Formation: Geometrical and Physical Optics", in W. Driscoll (ed.), Handbook of Optics, New York (1978).
- Lesko, Jim. "Diseño Industrial, guía de materiales y procesos de manufactura". Ed. Limusa-Wiley, México (2004).
- Vukobratovich, Daniel," 1º Curso de diseño opto-mecánico", notas del curso, Arizona (Abril 1991).
- Mott, Robert L., "Diseño de elementos de máquinas", Ed. Prentice Hall, 2da ed., México (1992).
- Krar F., Steve, "Tecnología de las máquinas-herramienta", Ed. AlfaOmega, México (2002).
- Aguirre Esponda, Guillermo, "Diseño de Elementos de Máquinas", Ed. Trillas, México (1992).
- Askeland, Donald R., "Ciencia e ingeniería de los materiales", Ed. International Thompson Editores, 3ra ed. México (1982).
- Mark, A. Curtis, "Planeación de procesos", Ed. Limusa Noriega Editores, 1era. Edición. México (1996).
- Singh, Nahua, "Systems aproach to computer-integrated design and manufacuring", Ed. John Wiley and Sons, USA (1996).

## ARTICULOS.

- Santiago-Alvarado, R. Arriaga-Martínez, S. Vázquez-Montiel, J. González-García, V. M. Cruz-Martínez, F. Iturbide-Jiménez, A. Alcala-Vallejo and B. I. G. Licona-Moran, "Opto-mechanical design of human eye models using lenses with variable focal length", Sociedad Mexicana de Instrumentación SOMI, XXI Congreso de Instrumentación 1-5 (2006). ISBN: 970-32-2673-6.
- Santiago-Alvarado, S. Vázquez-Montiel, J. González-García, B. I. G Licona-Moran, J. A. Rayas-Álvarez, y G. Castro-González, "Fabricación y caracterización de membranas elásticas de PDMS para lentes líquidas con longitud focal variable (LLLFV)", Opt. Pura Apl. 41 (4) 381-388 (2008).
- Santiago-Alvarado, S. Vázquez-Montie, F. Iturbide-Jiménez, R. Arriaga-Martínez, and J. González-García, "The Design, Construction and Characterization of a Solid Elastic Lens," in Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IX, Pantazis Z. Mouroulis, Warren J. Smith, R. Barry Johnson, eds., Proc. SPIE 7060, 706017 (2008). ISBN: 9780819472809.

## WEB.

- Artículo. Enrique Yacuzzi, Fernando Martin.-QFD: Conceptos, Aplicaciones y nuevos desarrollos. Universidad del CEMA, Aventis Pharma-  
<http://www.cema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/234.pdf> (2006).
- [http://aegi.euitig.uniovi.es/ficheros/21\\_m/teo/resortes.pdf](http://aegi.euitig.uniovi.es/ficheros/21_m/teo/resortes.pdf) (2008)

# GLOSARIO.

**Acrílico o Polimetilmetacrilato:** También conocido por sus siglas PMMA. El acrílico se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y la presentación más frecuente que se encuentra en la industria del plástico es en gránulos ('pellets' en inglés) o en láminas.

**Adaptativa o Adaptiva:** Es llamada a la tecnología para corregir las aberraciones ópticas de un sistema óptico con la finalidad de obtener imágenes con mejor resolución en tiempo real.

**Cataratas:** La catarata es la pérdida de transparencia del cristalino.

**CCD:** charge-coupled device, el CCD es el sensor con diminutas células fotoeléctricas que registran la imagen.

**CNC:** Computer Numerical Control, Se considera de Control Numérico por Computador a todo dispositivo capaz de dirigir el posicionamiento de un órgano mecánico móvil mediante órdenes elaboradas de forma totalmente automática a partir de informaciones numéricas en tiempo real.

**Código g:** Serie de funciones y operaciones en archivos de texto para el posicionamiento de la herramienta para el maquinado de piezas.

**Diagrama de flujo:** Un diagrama de flujo es la forma más tradicional de especificar los detalles algorítmicos de un proceso y constituye la representación gráfica de un proceso multifactorial.

**Difracción:** Desviación de la propagación rectilínea que ocurre cuando la luz avanza más allá de una obstrucción.

**Distancia focal:** Es la distancia de la lente al foco.

**Eje óptico:** Es una línea recta imaginaria que pasa por el vértice y el centro de curvatura de cada uno de los componentes.

**Elemento refractor:** Aquellos que cambian la dirección de la luz absorbiéndola y desviarla determinado ángulo.

**Fotones:** Partículas sin masa cuya energía depende de la frecuencia de la onda.

**Fotorreceptor:** Es toda célula o mecanismo capaz de captar la luz.

**Índice de refracción:** Se define como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en un medio.

**Longitud de onda:** Distancia entre cresta y la siguiente cresta de las ondas.

**Longitud focal:** Distancia focal.

**Plano imagen:** Es el plano perpendicular al eje que pasa por el foco imagen.

**Polímero:** Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas.

**Presbicia:** Trastorno conocido comúnmente como "vista cansada", es la dificultad de leer o escribir debido al proceso del envejecimiento. Cuando el cristalino comienza a perder flexibilidad.

**QFD:** Quality Function Deployment, Es un sistema que busca focalizar el diseño de los productos y servicios en dar respuesta a las necesidades de los clientes.

**Render:** Imagen fotorrealista realizada en softwares 3d.

**Sistema óptico:** Es el arreglo de superficies reflectoras y refractoras, su función es coleccionar y cambiar la forma de una porción del frente de onda incidente, con la intención de formar una imagen de un objeto. En un sistema óptico ideal, cada punto de una región tridimensional tendrá su imagen perfecta en otra región.

# APENDICE A.

## ANALISIS DE ELEMENTO FINITO (FEA).

### ANALISIS DE LA MONTURA.

Para calcular las cargas máximas que la montura puede soportar, primero se debe de conocer cual es la resistencia máxima que aguantaría el material a deformar. Puesto que la transmisión de fuerzas se lleva a cabo entre dos tipos distintos de materiales, fue necesario identificar cuales son las caras que entran en contacto y la dirección de las fuerzas aplicadas a cada material (Fig. 1). En este caso los ganchos de las mordazas (aluminio 6061) son los que soportan las fuerzas de resistencia de la lente flexible a deformar (Sylgard 184®).

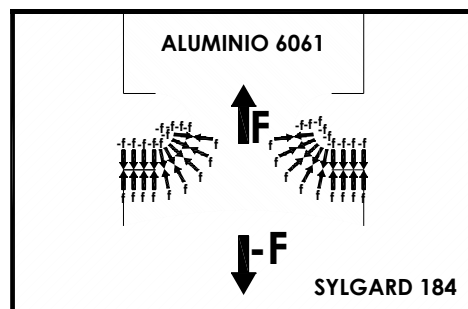


Figura 1. Transmisión de fuerzas.

Para comprobar que los componentes de la montura soportaran la resistencia del material Sylgard 184® al aplicarle esfuerzos radiales, fue indispensable designar la carga inicial que sería transmitida a todos los componentes. En esta etapa del análisis aun no estaba definida la geometría de la lente, por lo que se consideró utilizar un bloque del material a deformar dentro del cual se encuentra inmersa una de las mordazas. Mediante la aplicación de una fuerza normal se determinó cual sería la carga máxima que soporta el material considerando la geometría de la mordaza (Fig. 2).

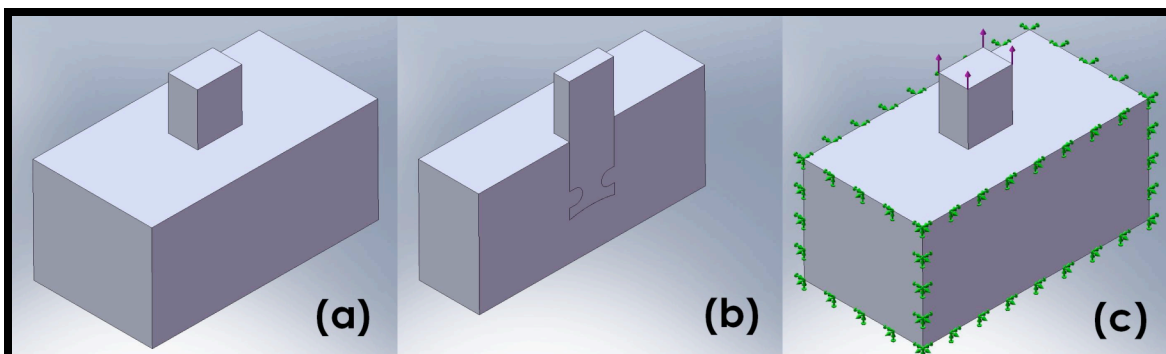
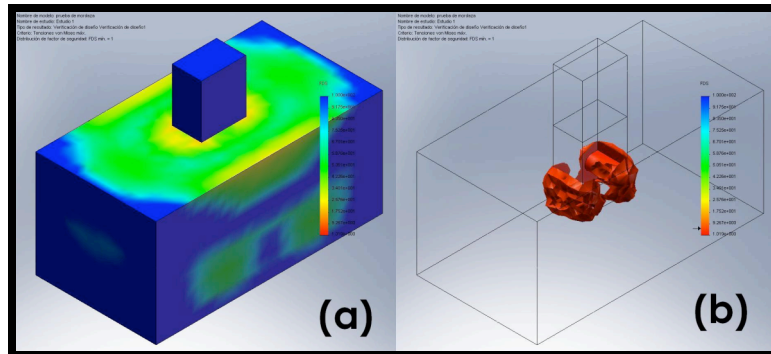


Figura 2. Modelado en isométrico del bloque y al mordaza (a), corte en isométrico (b) y, restricciones (en verde) y carga (en rosa) aplicada a la mordaza.

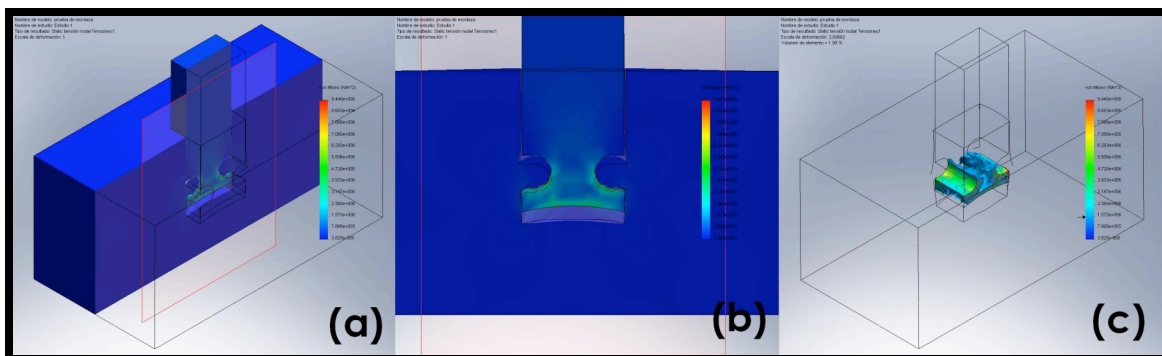


El factor de seguridad (Fig. 3) mínimo (FDS=1) se alcanzó con una carga máxima de 29 N (2956 g), y considerando que son 8 mordazas la carga total máxima a la que estaría sometido todo el sistema es de 232 N (23649 g). Hay que considerar que la carga total sobre el bloque es igual a la resistencia que soportaría la lente flexible después de diseñada (en una sola mordaza) multiplicada por un FDS, el cual estaría determinado por el tipo de geometría de la lente a diseñar.



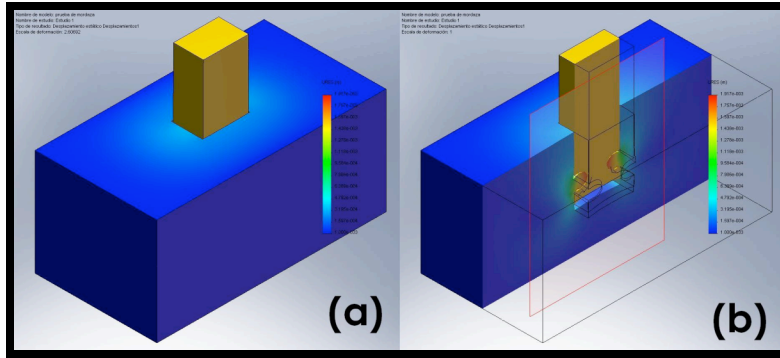
**Figura 3.** Resultado del factor de seguridad sobre el bloque (a) y partes rojas que indican los FDS mínimos sobre el bloque (b).

La tensión máxima (Fig. 4) ejercida sobre la mordaza fue de  $9.44 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>, lo que se transmite en un FDS máximo sobre los ganchos de las mordazas fue de 5.84.



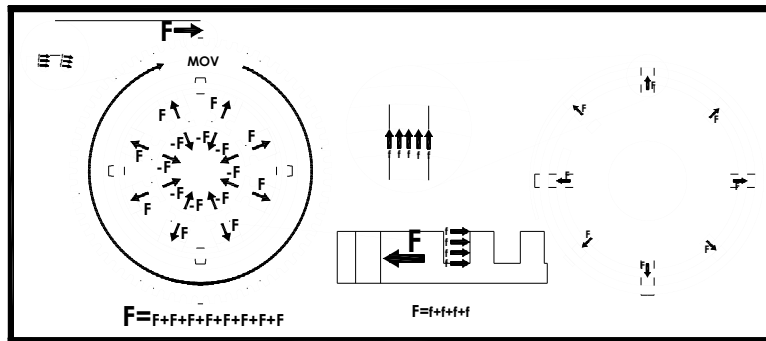
**Figura 4.** Tensiones ejercidas sobre las mordazas por la resistencia del material (a), vista frontal (b) y tensiones que sobrepasan los  $1.5 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> (c). Tensiones máximas en tonalidad verde.

Y el desplazamiento máximo de la mordaza (Fig. 5) en el sentido de la aplicación de la fuerza fue de 1.5 mm y el desplazamiento del material que se encuentra en la parte posterior de los ganchos fue de 1.92 mm.



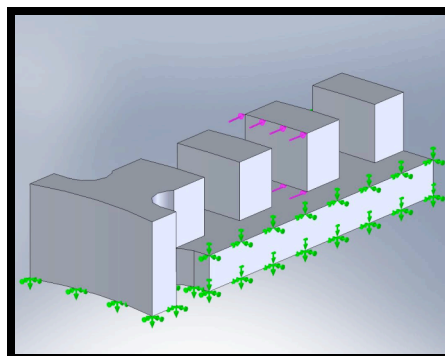
**Figura 5.** Desplazamientos en el exterior (a) y desplazamientos en el interior (b). De azul a rojo, de menor a mayor desplazamiento.

Para saber si las demás piezas iban a soportar la carga total, se determinaron las superficies en contacto y las direcciones en las que se transmitirían las cargas de pieza en pieza (Fig. 6).



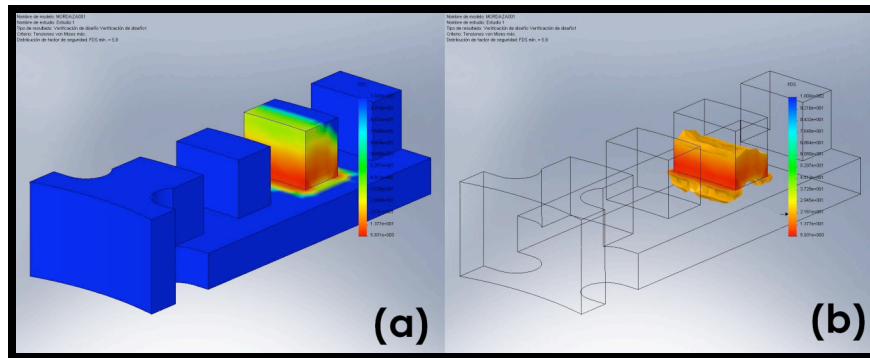
**Figura 6.** Transmisión de fuerzas por todo el sistema.

El análisis del bloque proporcionó un coeficiente de seguridad para la parte de los ganchos de las mordazas. Por lo que el siguiente análisis se enfocó a la parte que está en contacto directo con la espiral y que es la que transmite la resistencia de la lente hacia la espiral. La fuerza aplicada es la obtenida del límite de ruptura del bloque del elastómero: 29 N, y se aplicó a una de las caras en contacto con la espiral (Fig. 7).



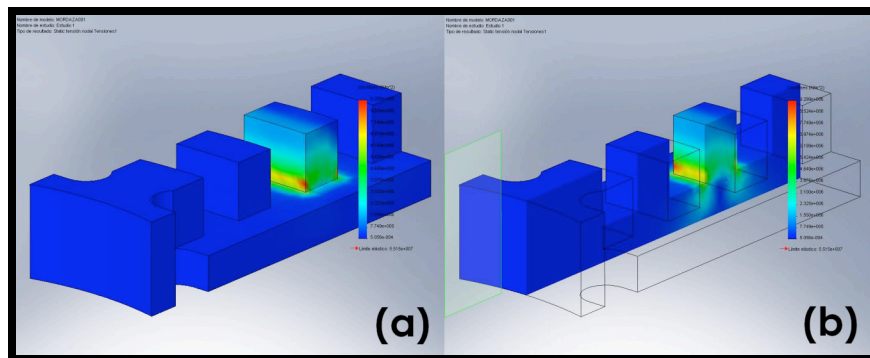
**Figura 7.** Asignación de cargas y restricciones para una mordaza.

El FDS obtenido por la aplicación de la fuerza fue de 5.93 (Fig. 8).



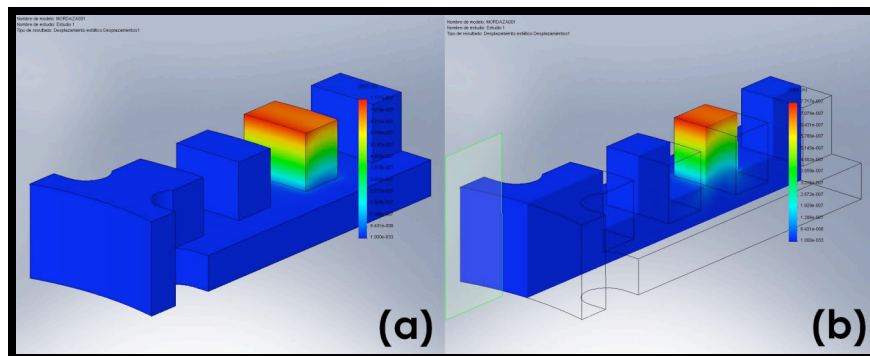
**Figura 8.** FDS totales (a) y FDS por debajo de 2 (b).

Se obtuvo una tensión máxima de  $9.29 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> (Fig. 9).



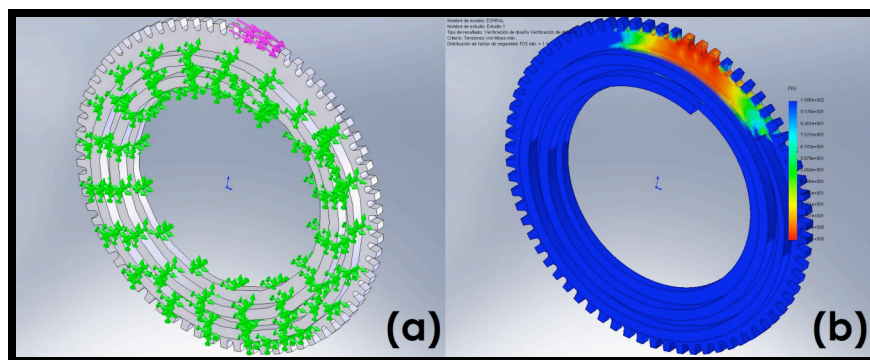
**Figura 9.** Tensiones externas (a) y tensiones internas (b).

Las áreas rojas cuentan con un desplazamiento máximo (imperceptible) de 0.00071 mm. Esto por la amplia diferencia de propiedades elásticas entre el aluminio y el elastómero (Fig. 10).



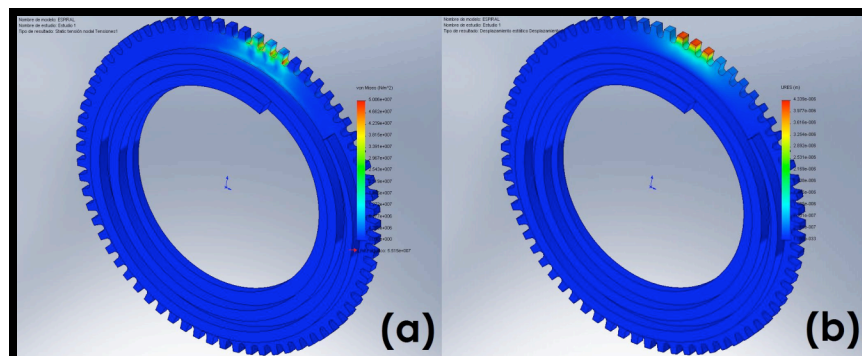
**Figura 10.** Tensiones externas (a) y tensiones internas (b).

Para la espiral se tomaron en cuenta el total de cargas aplicadas sobre la lente a diseñar. El límite de resistencia asignado para cada unión con las mordazas es el límite de carga obtenido por el bloque. La carga se aplicó a los dientes del engrane que entran en contacto con el gusano del tornillo sinfín, y esta se dividió equitativamente en ese número de superficies. La restricción se asignó a la superficie en contacto con las mordazas y el eje sobre el cual gira el engrane (Fig. 11a). El FDS obtenido a partir de la carga de 232 N (77.3 N) fue de 1.1 (Fig. 11b). Un FDS tomando en consideración que la resistencia de la lente a diseñar será menor que la carga aplicada a la espiral para este análisis.



**Figura 11.** Cargas y restricciones (a), Tensiones (b). En tonalidad roja aparecen los minios FDS.

La tensión máxima ejercida sobre la mordaza es de  $5.086 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  (Fig. 12a), y se obtuvo un desplazamiento máximo obtenido fue de 0.00439 mm (Fig. 12b).

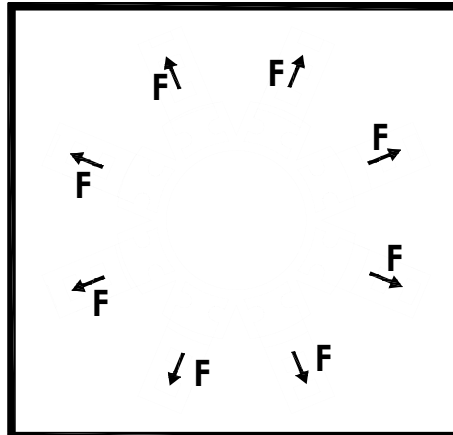


**Figura 12.** Tensiones sobre la espiral (a) y desplazamientos máximos en rojo (b).

Para los demás componentes del sistema de la montura no fue necesario hacer análisis ya que estos se encargan únicamente de guiar y contener las demás piezas, por lo que las fuerzas sobre estos no son considerables como para modificar sus dimensiones o geometría.

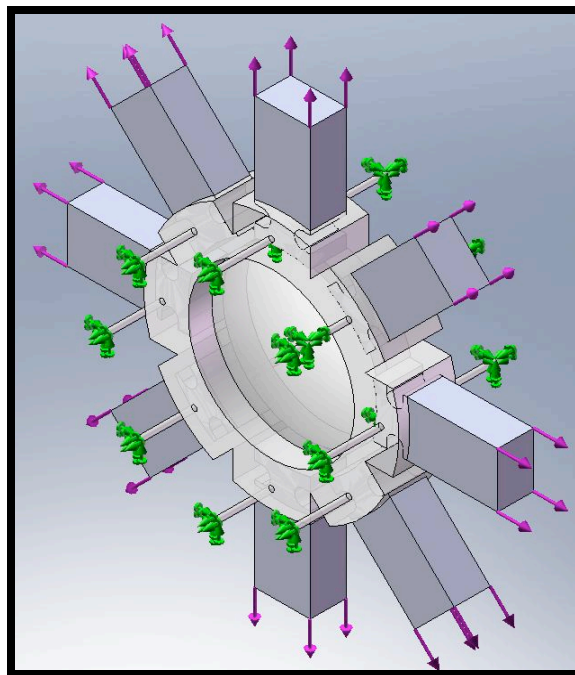
## ANÁLISIS DE LALENTE.

Para el análisis de la lente se tomaron en cuenta la dirección de las fuerzas aplicadas (Fig. 13).



**Figura 13.** Tensiones externas (a) y tensiones internas (b).

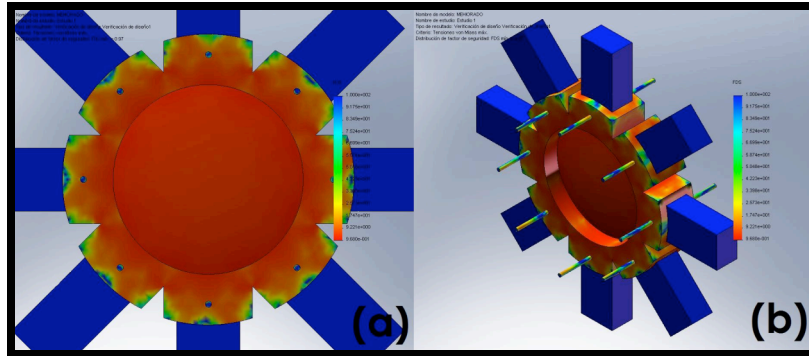
Para asignar las cargas y restricciones, fueron anexados soportes sobre la geometría de la lente que permitieran deformarla lo más cercano a la realidad. Estos soportes se modelaron de tal forma que no afectarían los resultados del análisis FEA (Fig. 14).



**Figura 14.** Cargas y restricciones.

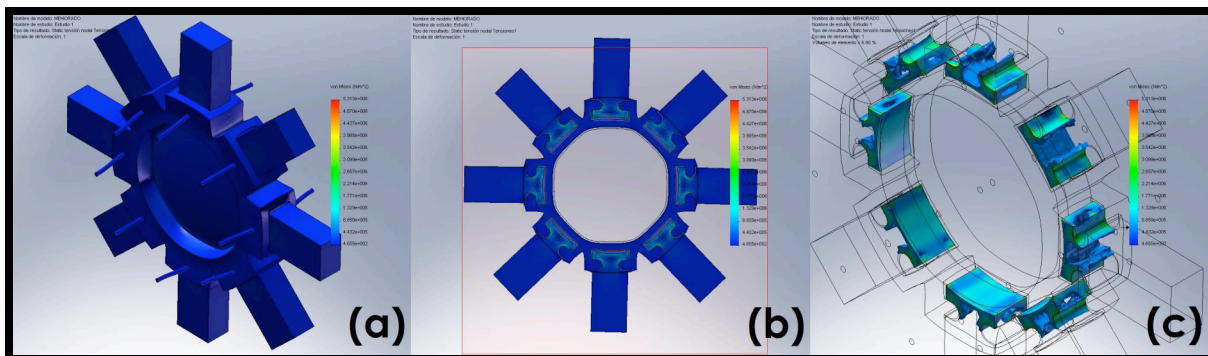
La máxima carga aplicada a la lente por cada extremo de la mordaza fue de 9.68 N (986 g), por lo tanto la fuerza total aplicada que resistió fue 77.4 N (7893 g). Esto es 1/3

de la carga aplicada para el análisis de la montura. Al sobrepasar la carga límite la ruptura se puede dar en cualquier parte de la lente (Fig. 15), pero los puntos más vulnerables están sobre la circunferencia de lente efectiva (30 mm de diámetro).



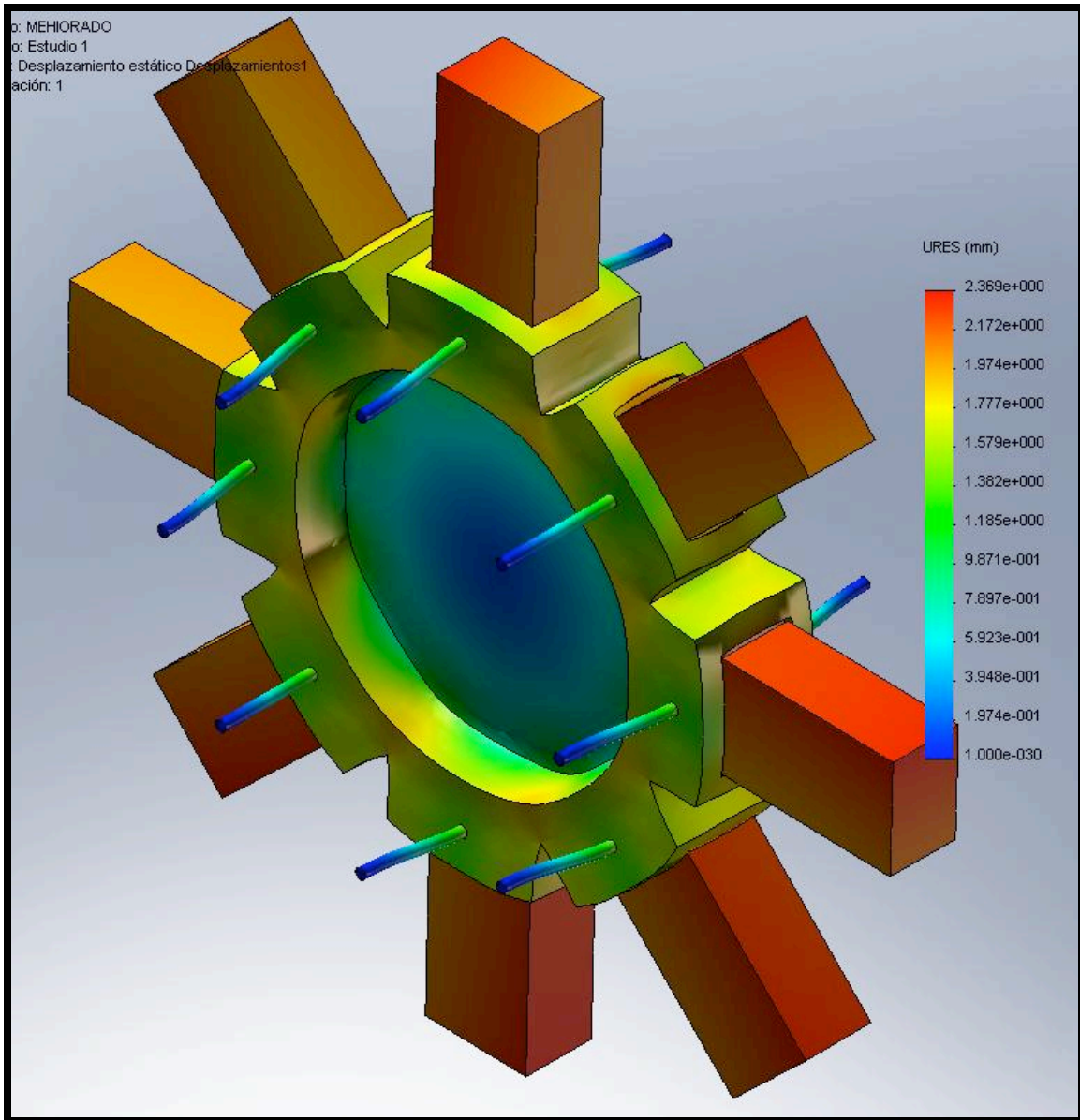
**Figura 15.** FDS vista frontal (a) y FDS vista isométrica (b).  
Zonas rojas: FDS mínimos.

La tensión máxima generada sobre los ganchos de las mordazas por la aplicación de las fuerzas fue de  $5.313 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  lo que se transmite en un FDS de 10.38 (Fig. 16).



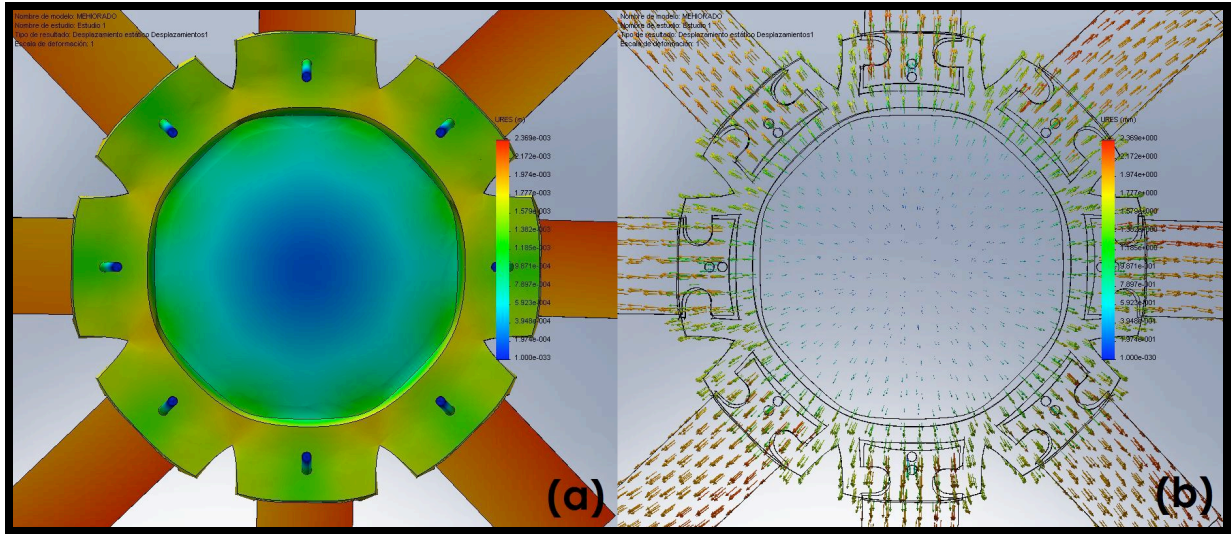
**Figura 16.** Tensiones exteriores en isométrico (a), tensiones internas en corte frontal (b) y volumen de las tensiones máximas (c).

Hay un desplazamiento aproximado de 2.172 mm en cada mordaza, en dirección de la aplicación de las fuerzas radiales. En la figura 17 se presentan los desplazamientos ejercidos en toda la lente, en una escala de deformación de 1. Partiendo de un punto para las mediciones de deformación, se puede considerar como origen al centro de la lente: un punto en el eje óptico y a la mitad de la distancia entre vértices. Así que al desplazamiento puede considerársele como la distancia del punto sin aplicación de fuerza al punto con aplicación de fuerza, mostrado en distintas tonalidades de color la distancia total de desplazamiento de cada punto de la lente. Nótese que los menores desplazamientos se llevan a cabo en el centro de la lente, y que aumentan conforme crece la distancia del eje óptico a su circunferencia.



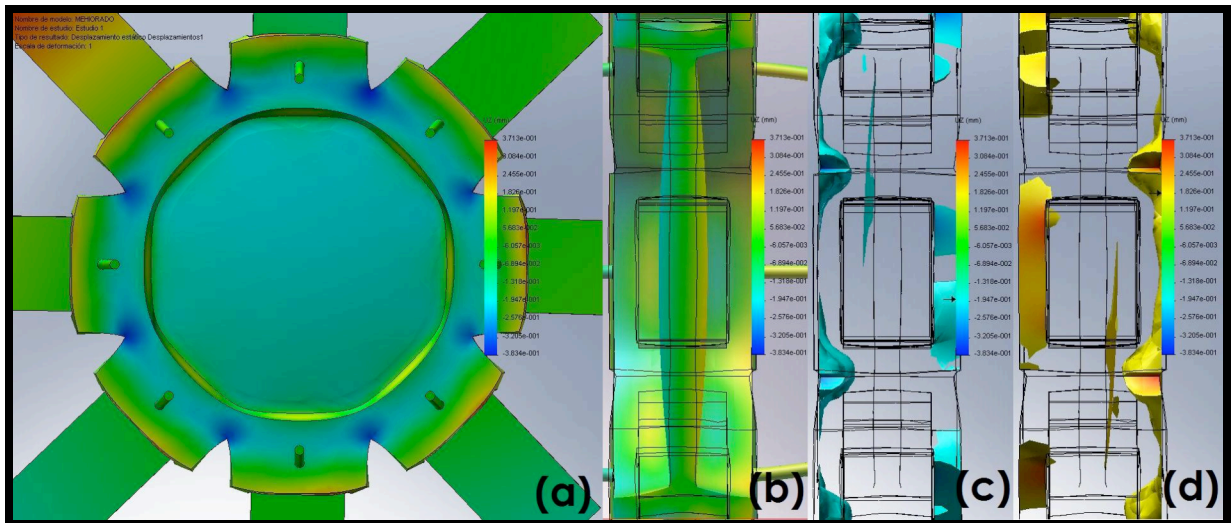
**Figura 17.**Desplazamientos totales resultante.

Los mayores desplazamientos se efectúan en las partes que contienen a los ganchos, en donde las direcciones de desplazamiento son normales y opuestas al eje óptico (Fig.18).



**Figura 18.** Desplazamientos totales resultantes (a), entre más tonalidad roja, mayor desplazamiento. Vectores de desplazamientos resultantes, la dirección de la flecha indica la dirección del desplazamiento, y el tamaño de la flecha indica la magnitud del desplazamiento.

El desplazamiento en el vértice de la lente en sentido del eje óptico, es de 0.187 mm en cada vértice, y el espesor de la lente (aproximado) en el centro es de 3.626 mm (Fig. 19).



**Figura 19.** Desplazamientos respecto a Z. Vista frontal (a), corte a la mitad (b), desplazamientos negativos menores a -0.187 mm (c) y desplazamientos positivos mayores a 0.187 mm (d)



De todos los datos anteriores se pueden deducir todos los parámetros que intervienen para la deformación de la lente (Fig. 20) y los límites de estos, en los que la lente puede trabajar.

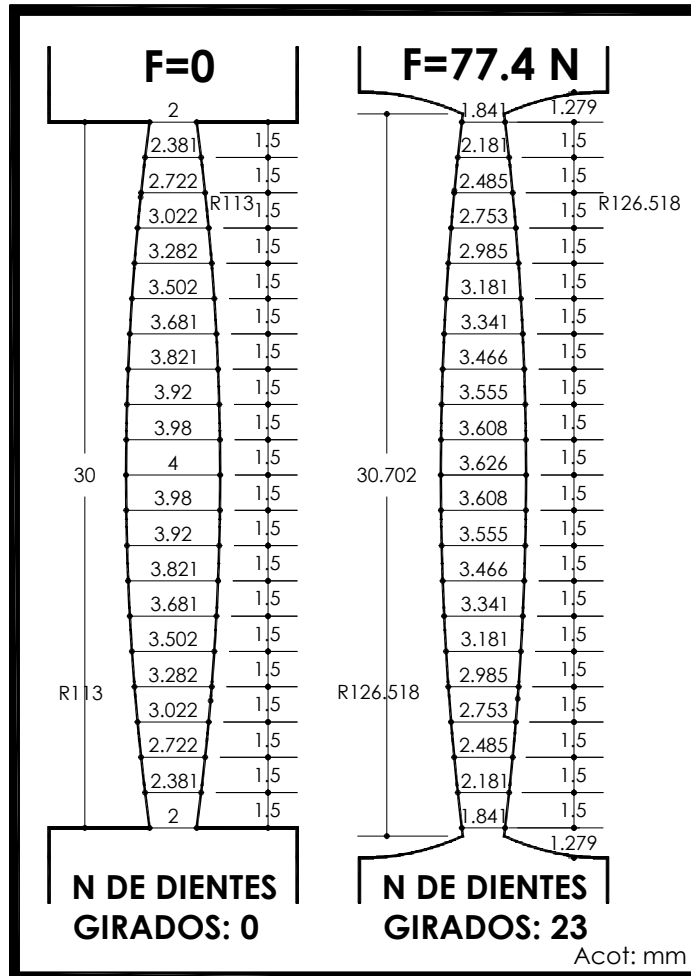
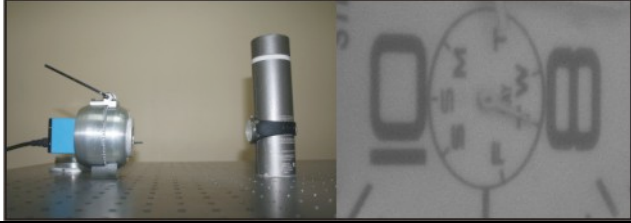
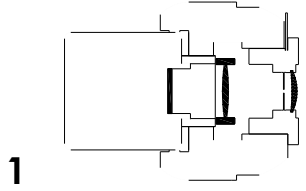

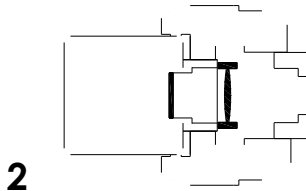

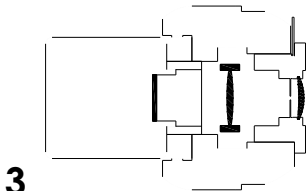

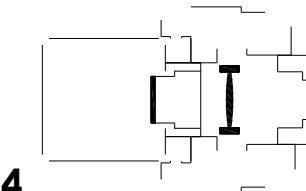

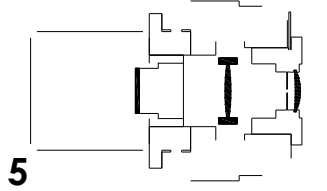
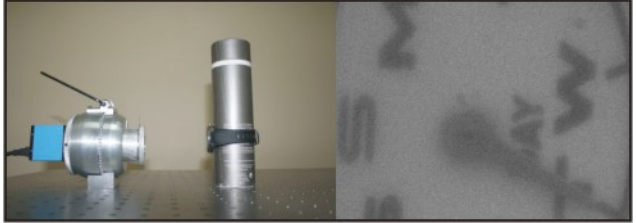
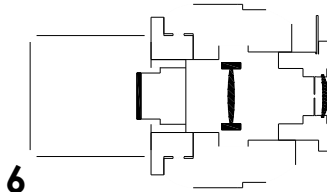

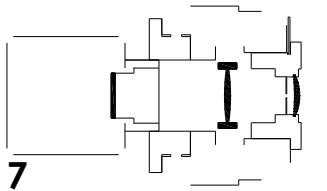
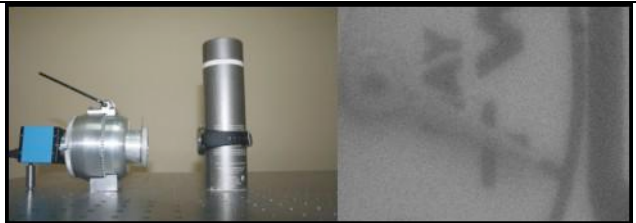
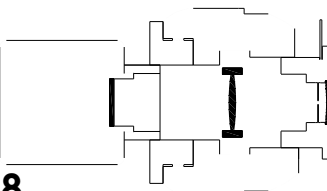


Figura 20. Datos aproximados para la deformación de la lente flexible.

## APENDICE B. COMBINACIONES DE ENFOQUE.

COMPOSICION Y MAGNIFICACION	ARREGLO
	 <b>1</b>
Distancia objeto a la lente córnea	175 mm
Distancia lente córnea a la lente elástica	34.3 mm
Distancia lente elástica al detector	27.9 mm
	 <b>2</b>
Distancia objeto a la lente córnea	131 mm
Distancia lente córnea a la lente elástica	46.8 mm
Distancia lente elástica al detector	27.9 mm
	 <b>3</b>
Distancia objeto a la lente córnea	140 mm
Distancia lente córnea a la lente elástica	34.3 mm
Distancia lente elástica al detector	33.1 mm
	 <b>4</b>
Distancia objeto a la lente córnea	111 mm
Distancia lente córnea a la lente elástica	46.8 mm
Distancia lente elástica al detector	33.1 mm

COMPOSICION Y MAGNIFICACION	ARREGLO
	
Distancia objeto a la lente córnea	102 mm
Distancia lente córnea a la lente elástica	34.3 mm
Distancia lente elástica al detector	50.6 mm
	
Distancia objeto a la lente córnea	93 mm
Distancia lente córnea a la lente elástica	46.8 mm
Distancia lente elástica al detector	50.6 mm
	
Distancia objeto a la lente córnea	78 mm
Distancia lente córnea a la lente elástica	34.3 mm
Distancia lente elástica al detector	60.9 mm
	
Distancia objeto a la lente córnea	71 mm
Distancia lente córnea a la lente elástica	46.8 mm
Distancia lente elástica al detector	60.9 mm

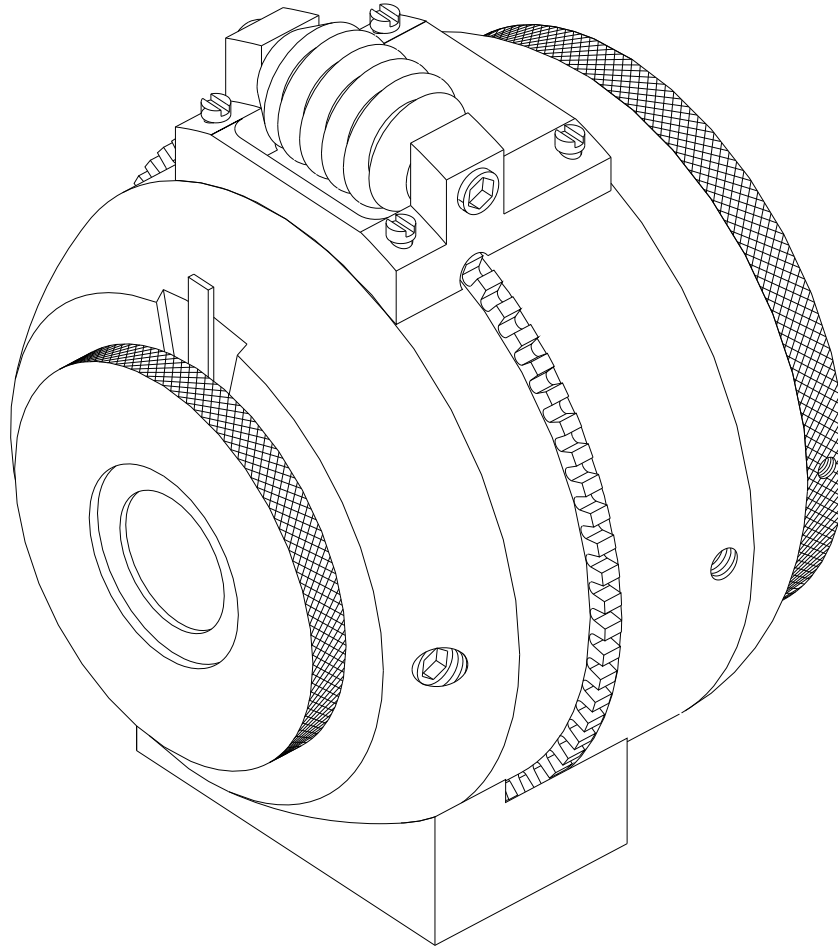
**APENDICE C.  
PLANOS CONSTRUCTIVOS.**

### \*\*\* NOTAS GENERALES \*\*\*

- ELIMINAR FILOS CORTANTES Y REBABAS.
- LAS DIMENSIONES DE ESTE PLANO SON NOMINALES.
- TODAS LAS PIEZAS TORNEADAS CON CILINDRADO INTERIOR ANTES DEBEN DE SER PREPARADAS TALADRANDO EN EL TORNO CON UNA BROCA DE CENTRO Y DESPUES CON UNA BROCA DE 3/4 PLG O 1PLG SEGUN SEA EL CASO. LAS REV DEBEN SER DE 1500 PARA BROCA DE 1/2 PLG Y 700 PARA BROCA DE 3/4 PLG. Y UN AVANCE DE 270 - 500 MM/MIN (1/2) Y 126 - 266 MM/MIN (3/4). PARA EL USO DEL TORNO ILSA TR1000-EX.

- TOLERANCIAS:

LONGITUD	ANGULO
.0 +/- 0.1	x +/- 0.5
.00 +/- 0.05	x.x +/- 0.1



ISOMETRICO

No. COMP.	DESCRIPCION	MATERIAL	CANT	DIMENSION 1 MILIMETROS	DIMENSION 2 MILIMETROS
1	TAPA IZQUIERDA	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	1	94.1	28.9
2	TAPA DERECHA	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	1	100.1	40
3	EXTENSOR TAPA DERECHA	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	1	68	23
4	ADAPTADOR PARA CCD	AL 6061 T6 DIAM 2 PLG	1	39.8	19
5	MONTURA DIAFRAGMA	AL 6061 T6 DIAM 2 PLG	1	48	25.9
6	MONTURA LENTE CORNEA	AL 6061 T6 DIAM 2 PLG	1	26	4
7	SOPORTE LENTE CORNEA	AL 6061 T6 DIAM 2 PLG	1	38	4
8	PRESIONADOR LENTE CORNEA	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	1	60	6
9	BASE GUIA PARA MORDAZAS	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	1	94	27
10[A-H]	MORDAZAS LENTE ADAPTIVA	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	8	26.69	10
11	ENGRANE CON ESPIRAL	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	1	100	7
12	ARO CONTENEDOR SISTEMA	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	1	74.3	11
13	BASE DEL MODELO	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	1	60	34.8
14	COJINETE PARA SINFIN	AL 6061 T6 DIAM 4 PLG	1	44.4	34.7
15	GUSANO DE TORNILLO SINFIN	ACERO INOX AISI 410 DIAM 2 PLG	1	30	20
16	LENTE ADAPTIVA	SILICON ELASTOMERO SYLGARD 184	1	51.4	10.5
17	LENTE CORNEA	VIDRIO OPTICO DIAM 32 MM	1	ACCESORIO	
18	DIAFRAGMA OPTICO	AL ANODIZADO CAM OLYMPUS	1	ACCESORIO	
19	TORNILLO ARO - BASE GUIA	TOR PLANO NC 1/8 PLG X 1/4 PLG	4	ACCESORIO	
20	TORNILLO TAPA DER - TAPA IZQ	TOR PLANO NC 1/8 PLG X 3/4 PLG	8	ACCESORIO	
21	TORNILLO OPRESOR EJE - TAPA	TOR OPR ALLEN NC 1/4 PLG X 3/4 PLG	3	ACCESORIO	
22	TORNILLO OPRESOR TAPA DER	TOR OPR ALLEN NC 3/16 PLG X 3/4 PLG	1	ACCESORIO	
23	TORNILLO OPRESOR EXTENSOR	TOR OPR ALLEN NC 1/8 PLG X 1/2 PLG	1	ACCESORIO	
24	TORNILLO BASE MOD - BASE GUIA	TOR HEX NC 1/4 PLG X 3/4 PLG	1	ACCESORIO	

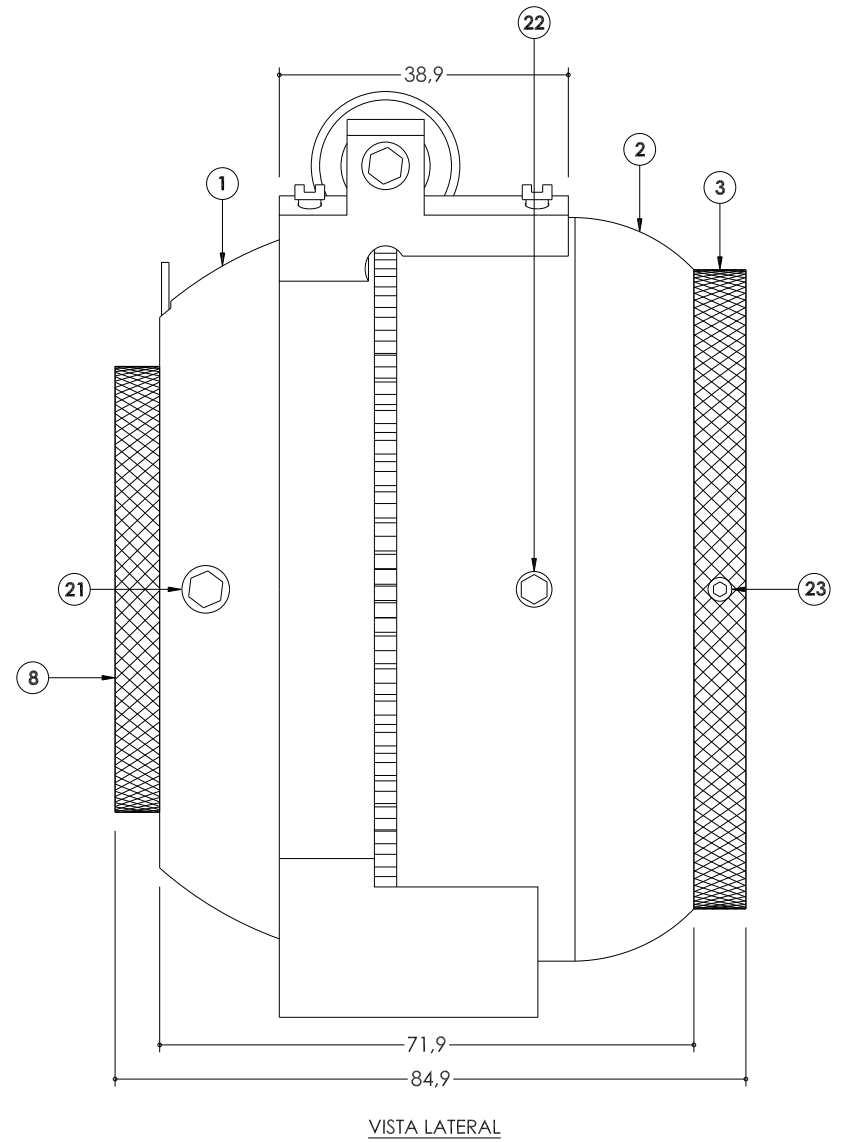
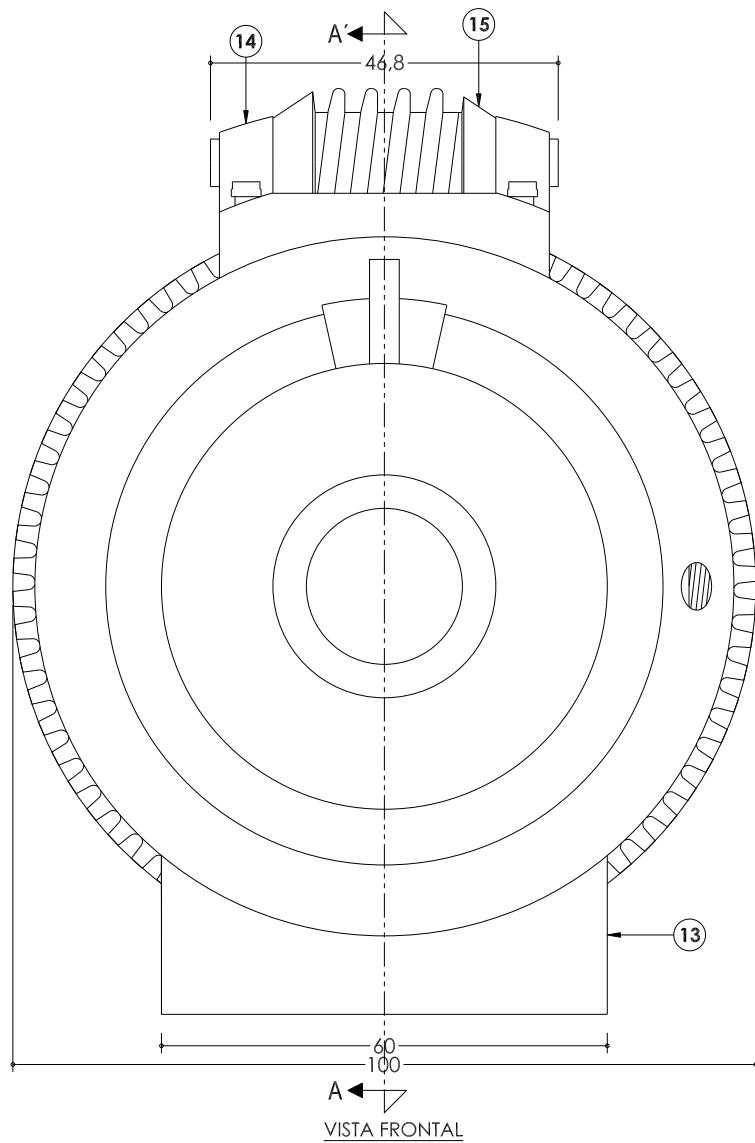


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

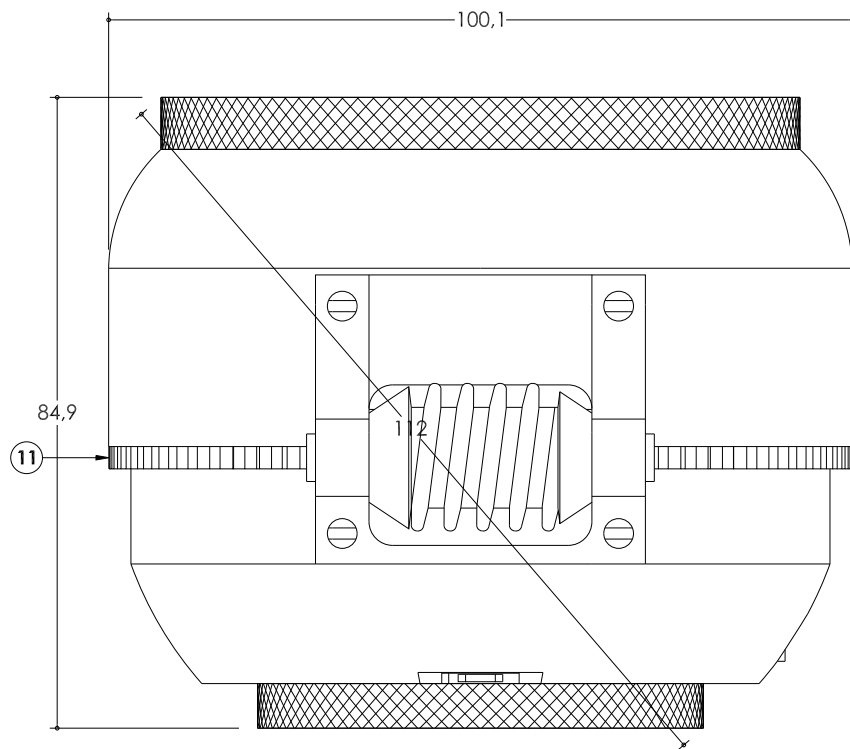
PLANO No.

PL-01

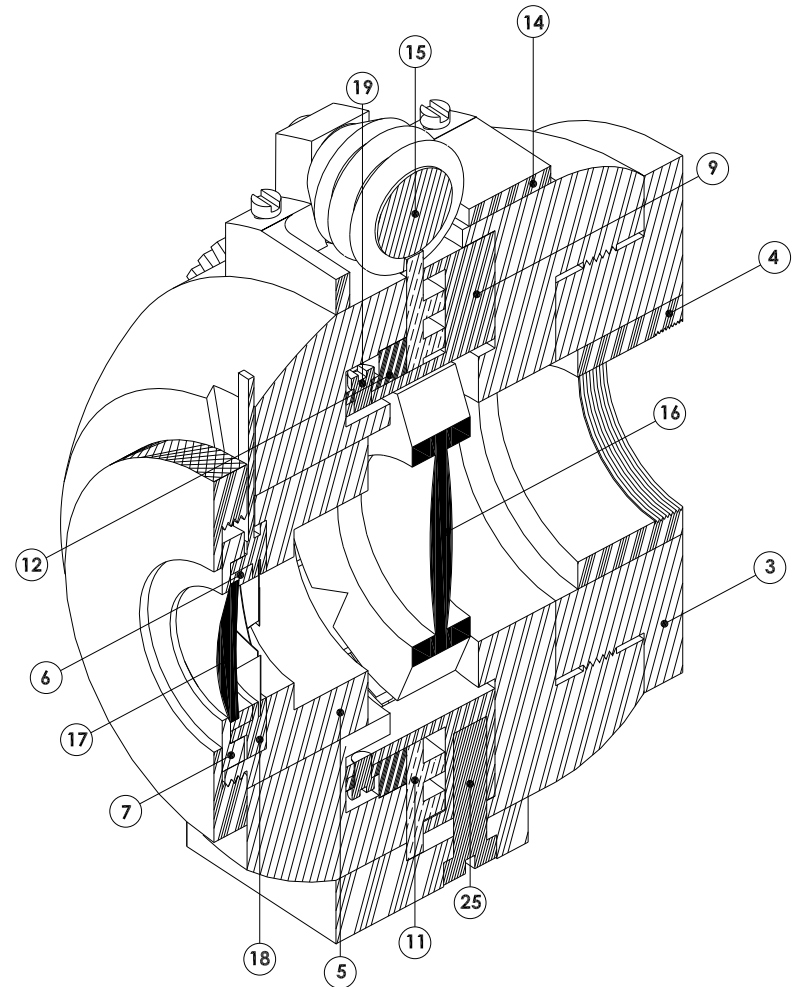
PROYECTO		TITULO: MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO			
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 1 DE 21
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.			



		UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA		PLANO No. <b>PL-02</b>	
<b>PROYECTO</b> MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO					
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +/- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 2 DE 21
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.		REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.		APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.	



VISTA SUPERIOR



SECCION A-A' ISOMETRICA

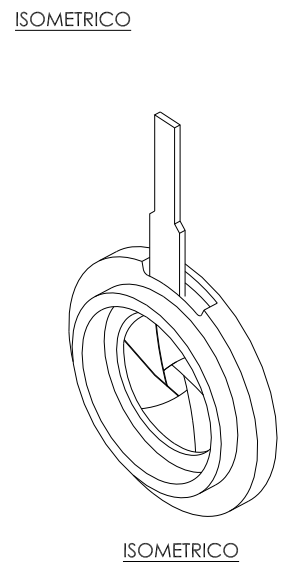
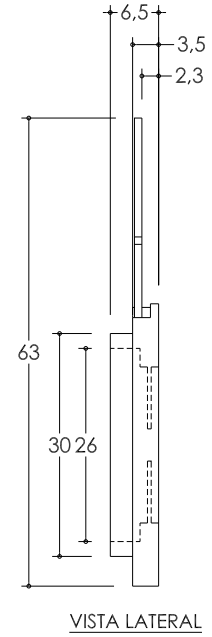
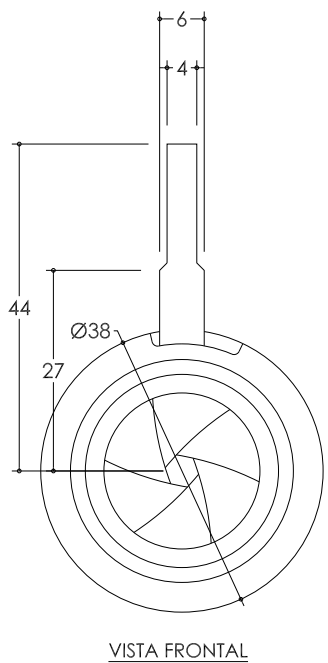
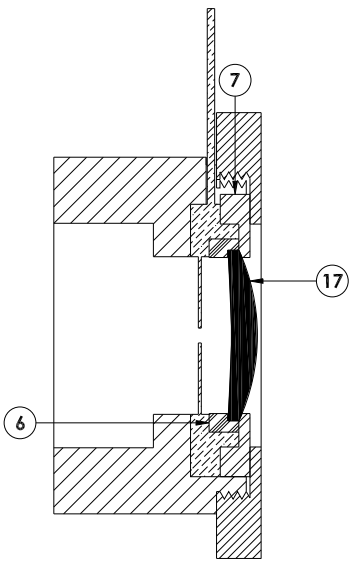
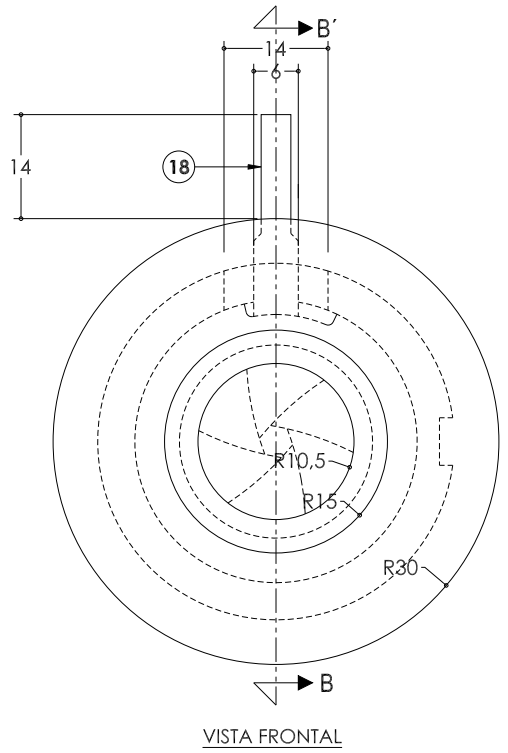
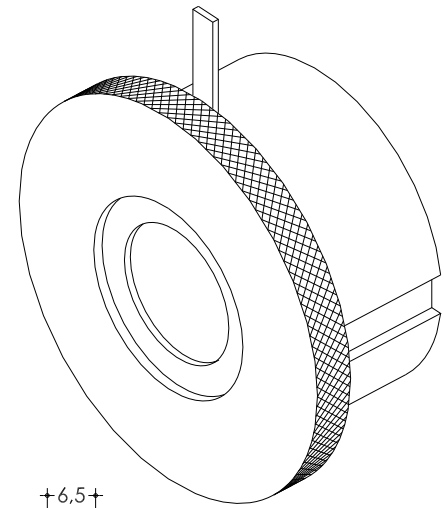
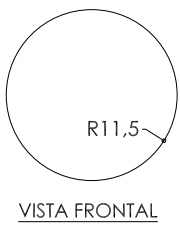
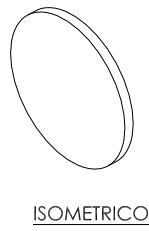
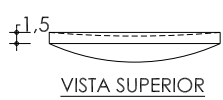
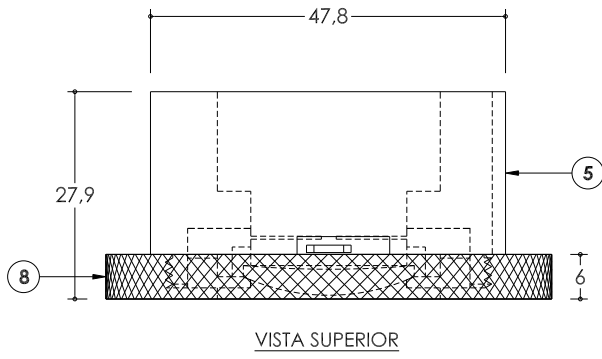




UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

PLANO No.

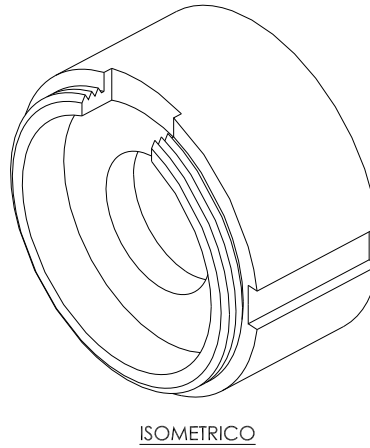
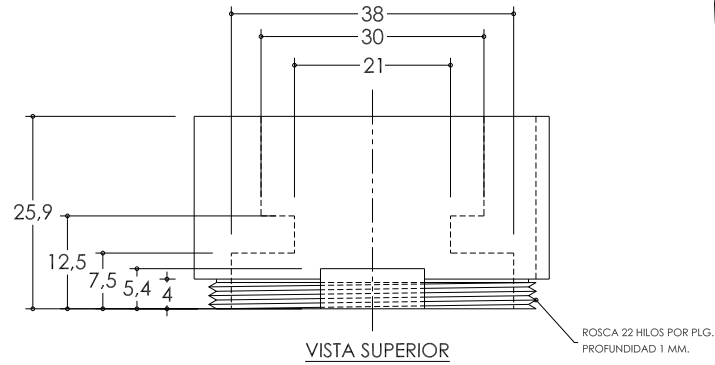
PL-03

PROYECTO		TÍTULO: MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO				
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 3 DE 21	
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.				



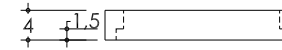
		<b>UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA</b>		PLANO No. <b>PL-04</b>	
<b>PROYECTO</b>		<b>TÍTULO:</b> MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO			
<b>FECHA DE ELABORACION:</b> 28/05/07	<b>ACOTACION:</b> MM	<b>ESCALA:</b> SIN ESCALA	<b>TOLERANCIA:</b> +- 0.05	<b>SISTEMA:</b> 	<b>HOJA:</b> 4 DE 21
<b>DIBUJO:</b> RUBEN ARRIAGA MTZ.	<b>REVISO:</b> VICTOR M. CRUZ MTZ.	<b>APROBO:</b> AGUSTIN SANTIAGO A.			



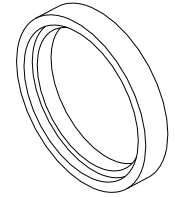


**PIEZA 6**

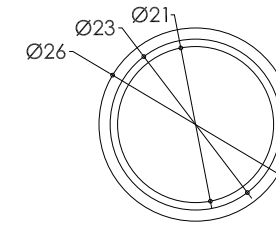
No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO (INTERIOR Y EXTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1	700	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CILINDRADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1	700	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	375		VAR



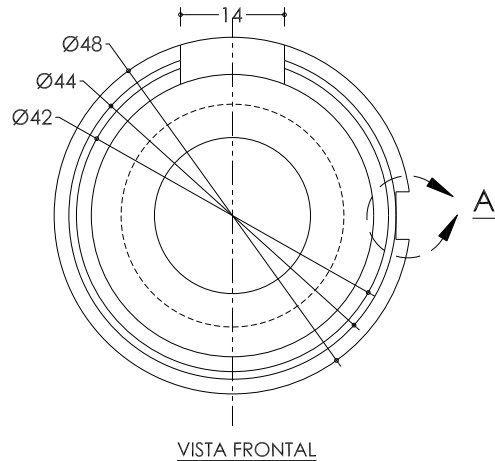
VISTA SUPERIOR



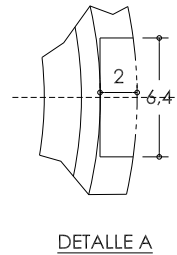
ISOMETRICO



VISTA FRONTAL



VISTA FRONTAL



DETALLE A

**BURILES DE CORTE PARA OPERACIONES EN EL TORNO (ACOT: PLG)**

BURIL 1 (HSS)	BURIL 2 (HSS)	BURIL 3 (HSS)	BURIL 4 (HSS)	BURIL 5 (CARBURO)

**PIEZA 5**

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO (INTERIOR Y EXTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1 Y 2	700	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CILINDRADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1, 2 Y 5	700	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	ROSCADO EXTERIOR	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1	125	PASO	
4	RANURADO	TAL FRE OTMT OT25020	CORT VERT HSS 4G 1/4 PLG	2640	aprox 5850	min 0.4



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

PLANO No.

**PL-05**

PROYECTO MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO

FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +/- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 5 DE 21
-----------------------------------	------------------	-----------------------	-------------------------	--------------	------------------

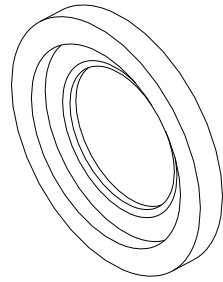
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

### PIEZA 8

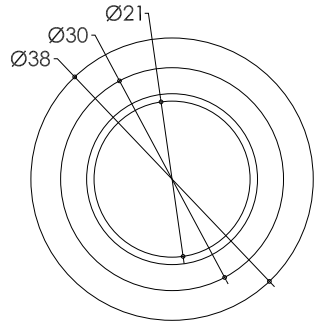
No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO (INTERIOR Y EXTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1 Y 2	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CILINDRADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1 Y 2	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	ROSCADO INTERIOR	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 5	125	PASO	
4	MOLETEADO	TORNO ILSA TR1000-EX	MOL 4 JUE ROD CAB GIR	70		
5	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	187.5		VAR



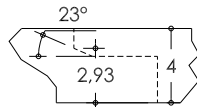
VISTA SUPERIOR



ISOMETRICO



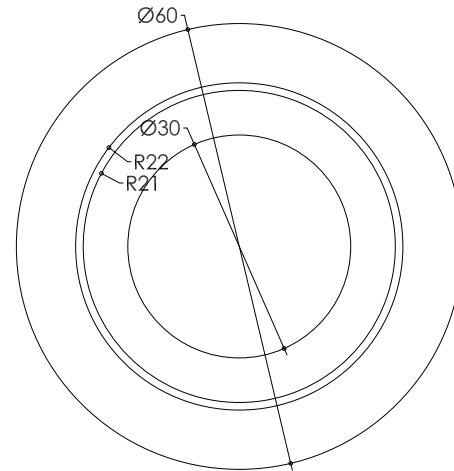
VISTA FRONTAL



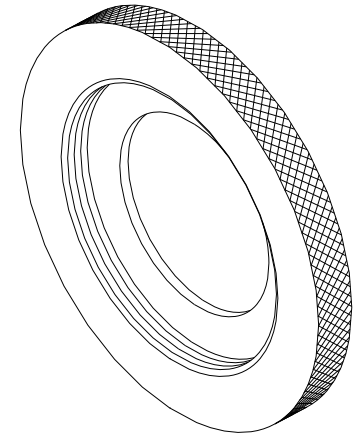
DETALLE B



VISTA SUPERIOR





VISTA FRONTAL

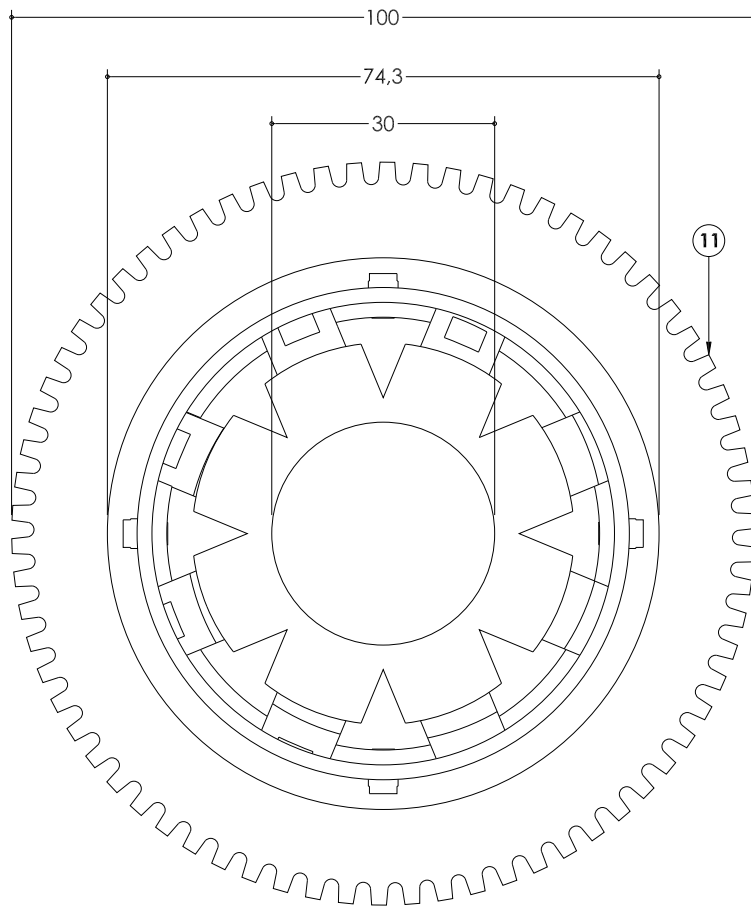


ISOMETRICO

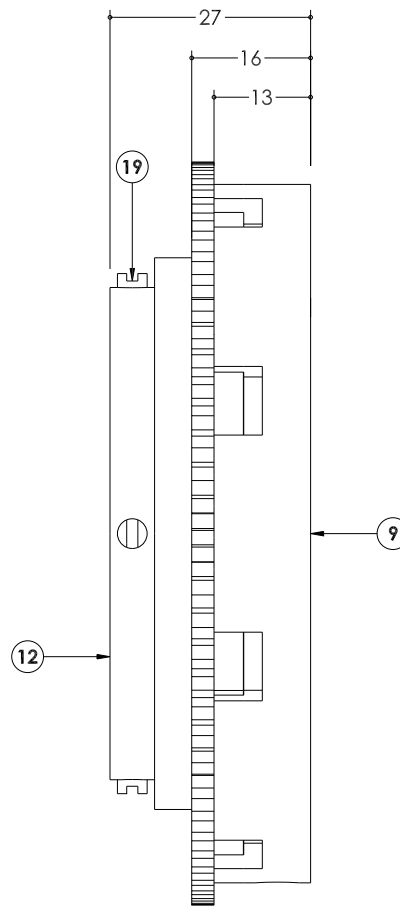
### PIEZA 7

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO (INTERIOR Y EXTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1	700	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CILINDRADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1	700	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	PERFILADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 2	700	0.13 - 0.3	0.13 - 1
4	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	350		VAR

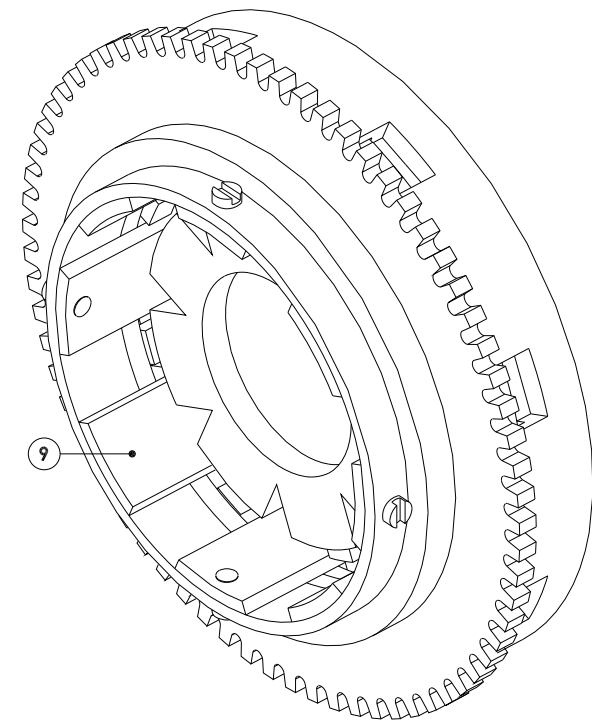
 <b>UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA</b>		PLANO No.	<b>PL-06</b>
<b>PROYECTO</b> MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO		TITULO:	
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: + - 0.05
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.		SISTEMA: 	HOJA: 6 DE 21
REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.		APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.	



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



ISOMETRICO

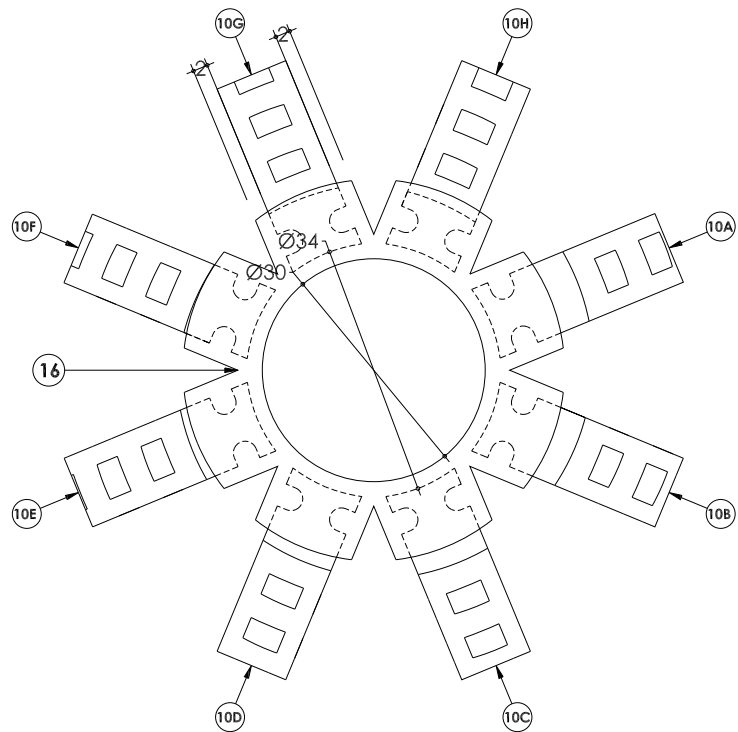


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

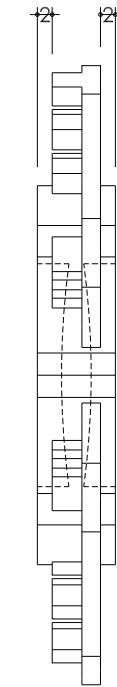
PLANO No.

PL-07

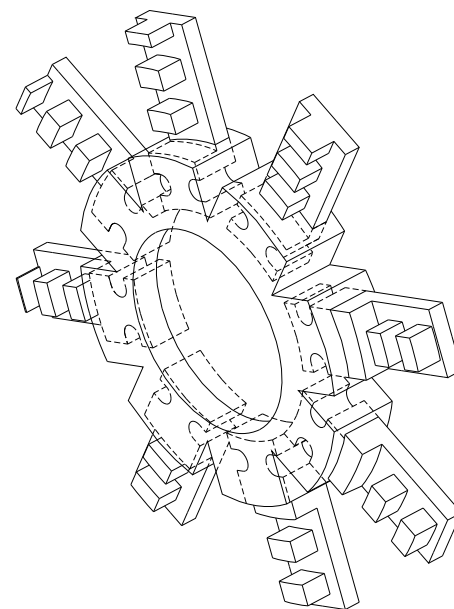
PROYECTO		TITULO: MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO			
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 7 DE 21
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.			



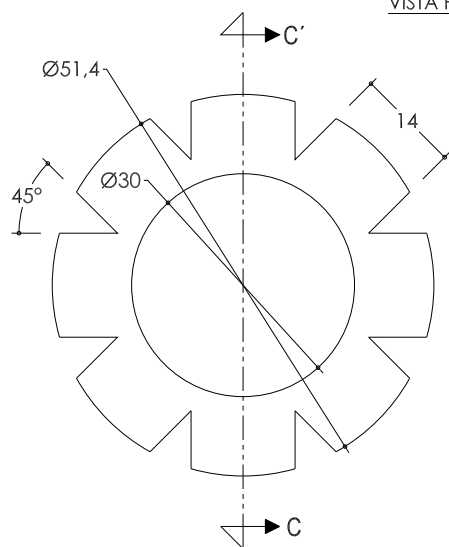
VISTA FRONTAL



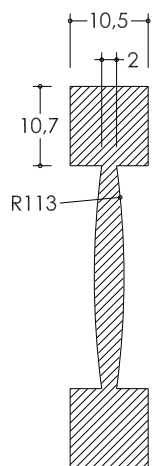
VISTA LATERAL



ISOMETRICO



VISTA FRONTAL



SECCION C-C'



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

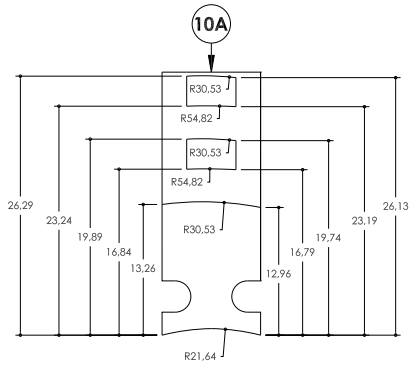
PLANO No.

PL-08

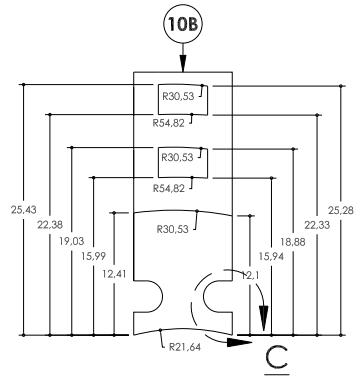
PROYECTO: MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO

FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: ± 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 8 DE 21
-----------------------------------	------------------	-----------------------	-----------------------	--------------	------------------

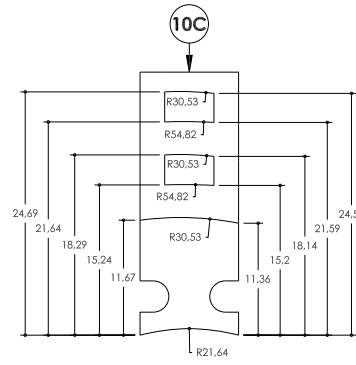
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------



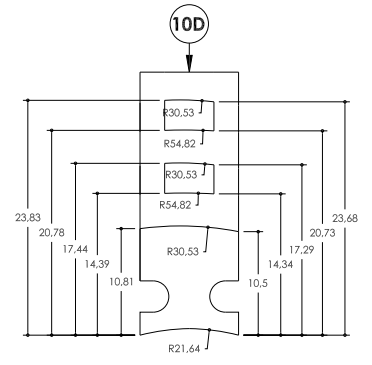
VISTA SUPERIOR



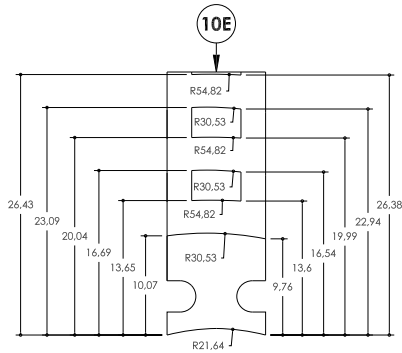
VISTA SUPERIOR



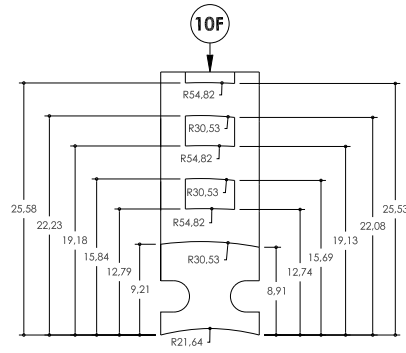
VISTA SUPERIOR



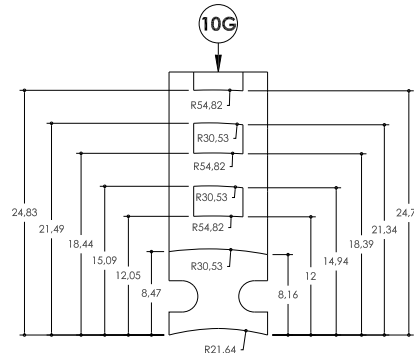
VISTA SUPERIOR



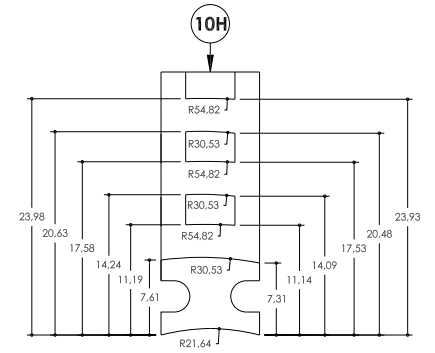
VISTA SUPERIOR



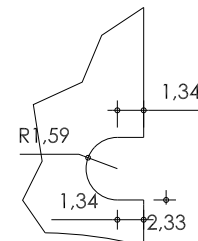
VISTA SUPERIOR



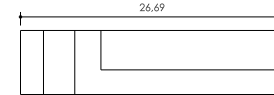
VISTA SUPERIOR



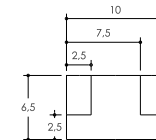
VISTA SUPERIOR



DETALLE C



VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL

MISMAS DIMENSIONES DE VISTA SUPERIOR EN LAS EN LAS PIEZAS 10A, 10B, 10C, 10D, 10E, 10F, 10G, 10H.

PIEZA 10 (A-H)

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	PLANEADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT HSS 4G 1/2 PLG	2500	aprox 6300	min 0.4
2	ESCUADRADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT CARB 2G 1/8PLG	2500	aprox 22500	min 0.4
3	RANURADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT CARB 2G 1/16 PLG	2500	aprox 45000	min 0.4
4	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	125		VAR



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

PLANO No.

PL-09

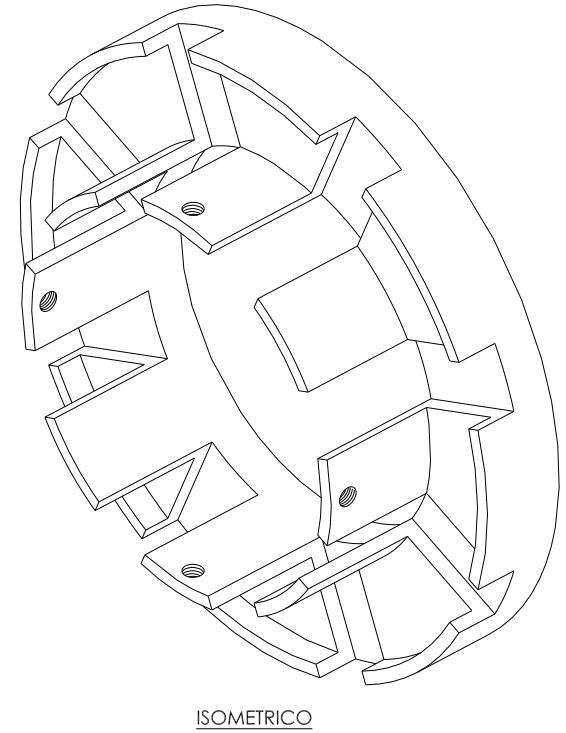
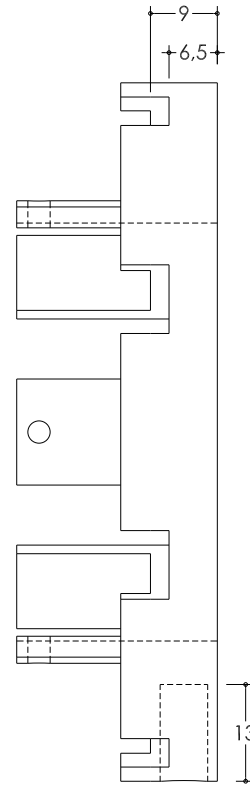
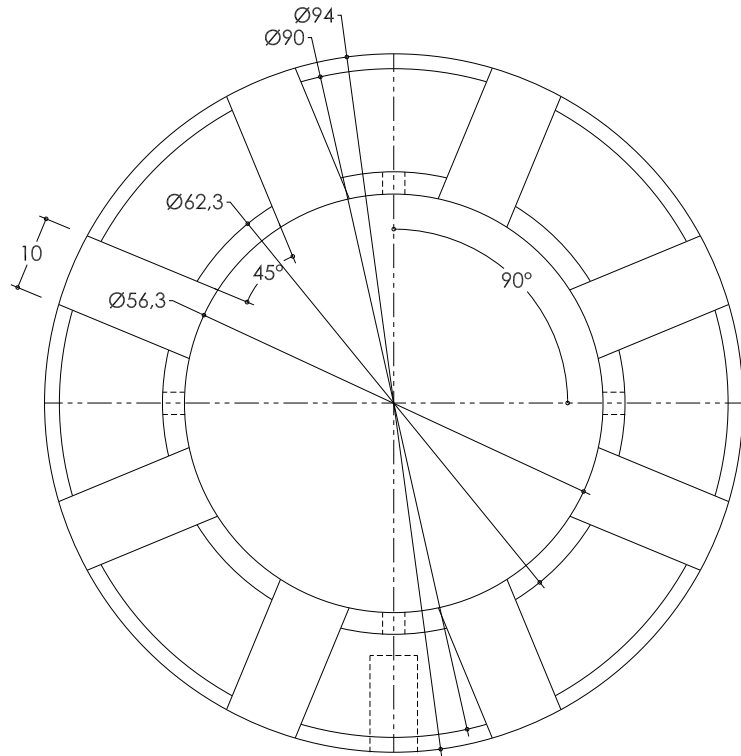
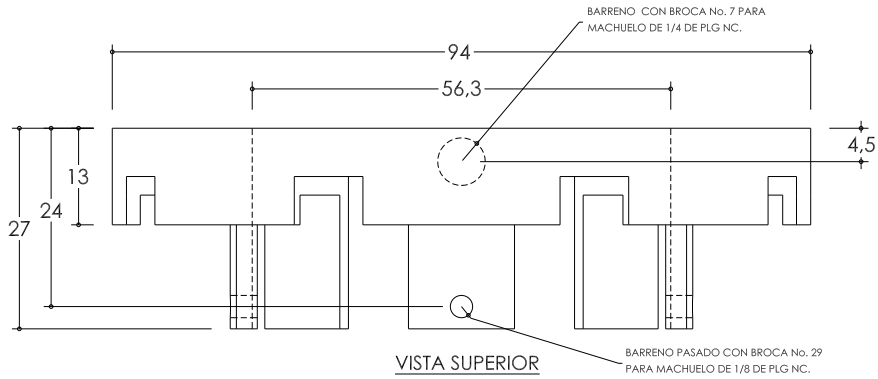
PROYECTO MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO

FECHA DE ELABORACION: 28/05/07 ACOTACION: MM ESCALA: SIN ESCALA TOLERANCIA: +- 0.05 SISTEMA: HOJA: 9 DE 21

DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ. REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ. APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.

# PIEZA 9

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	PLANEADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT HSS 4G 1/2 PLG	2500	aprox 6300	min 0.4
2	RANURADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT HSS 4G 3/8PLG	2500	aprox 7800	min 0.4
3	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	125	VAR	VAR
4	TALADRADO EN MACIZO	TALADRO VIMALERT M-15	BROCA HSS 13/64 Y 3/32 PLG	4650	197 - 393	13/64
5	MACHUELADO	MANERAL AJUSTABLE	MACH HSS NC 1/4 Y 1/8 NC	4650	170 - 425	3/32



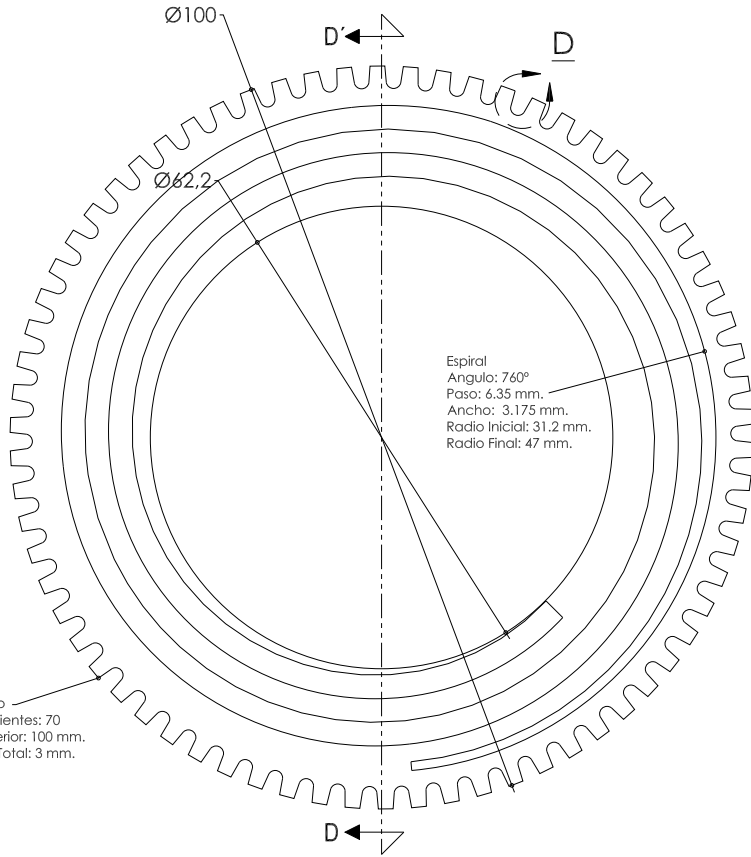
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

PLANO No.  
**PL-10**

PROYECTO		TITULO: MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO			
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 10 DE 21
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.			

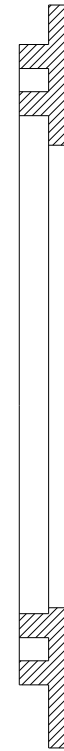


VISTA SUPERIOR

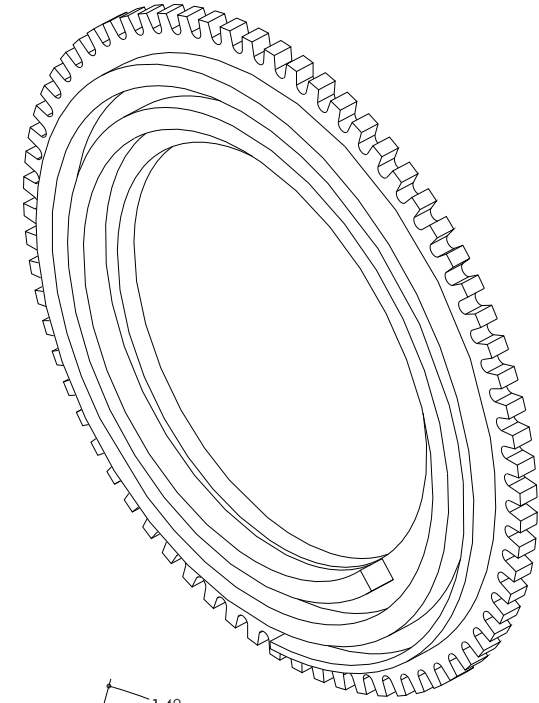


Engrane recto  
 Número de Dientes: 70  
 Diámetro Exterior: 100 mm.  
 Profundidad Total: 3 mm.

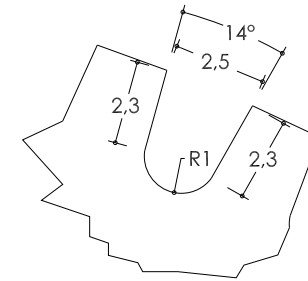
VISTA FRONTAL



SECCION D-D'



ISOMETRICO

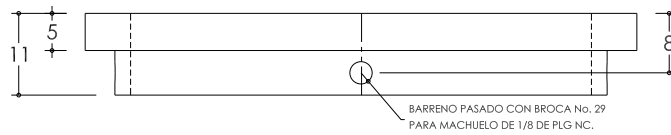


DETALLE D

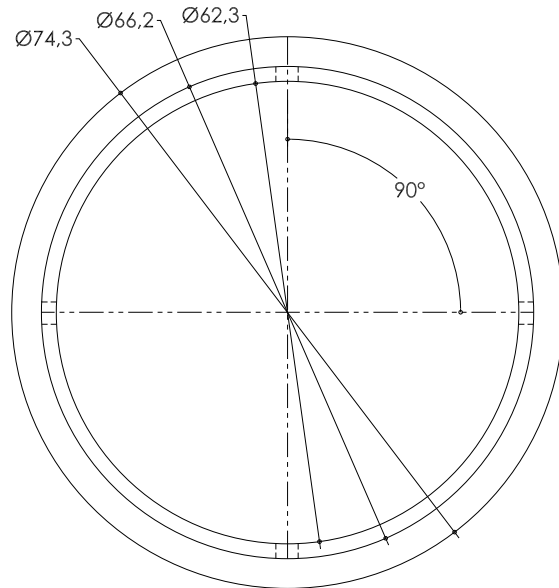
**PIEZA 11**

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	PLANEADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT HSS G4 1/2 PLG	2500	aprox 6300	min 0.4
2	ESCUADRADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT CARB 2G 1/16 PLG	2500	aprox 45000	min 0.4
3	RANURADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT CARB 2G 1/8 PLG	2500	aprox 22500	min 0.4
4	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	125		VAR

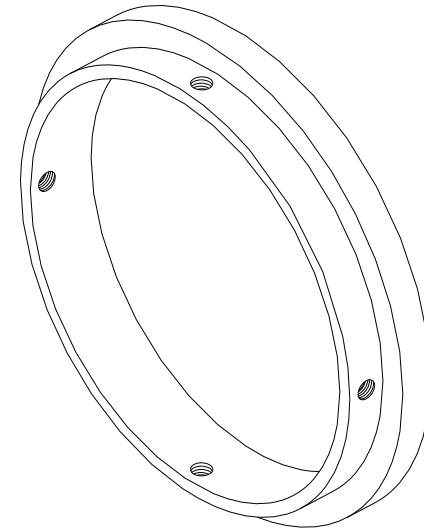
		UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA		PLANO No. <h1>PL-11</h1>	
<b>PROYECTO</b>			<b>TÍTULO:</b>		
MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO					
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 11 DE 21
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.		REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.		APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.	



VISTA SUPERIOR





VISTA FRONTAL



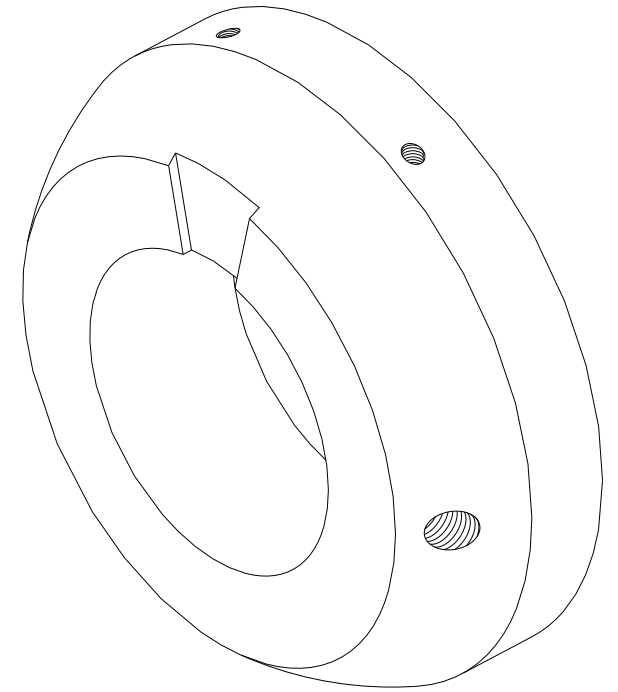
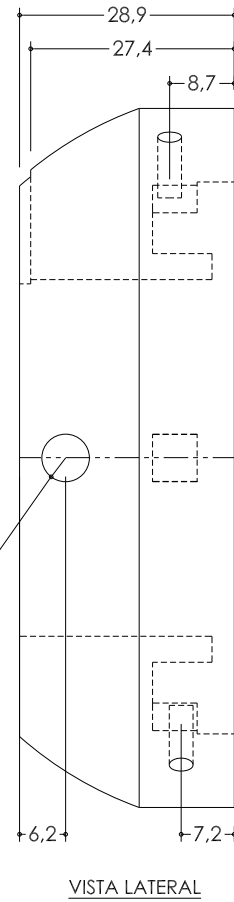
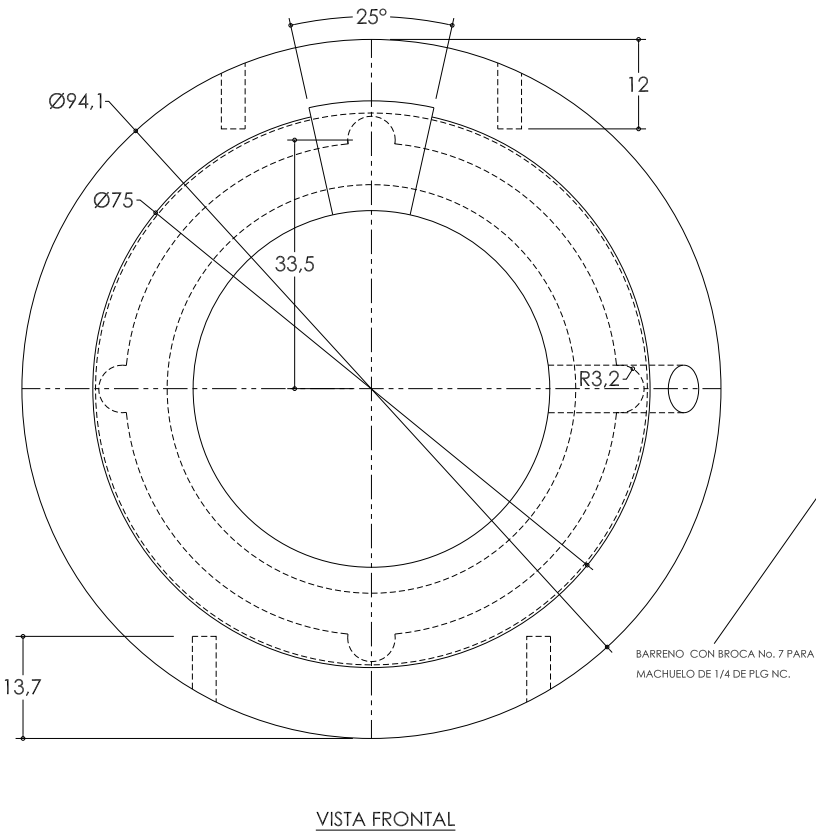
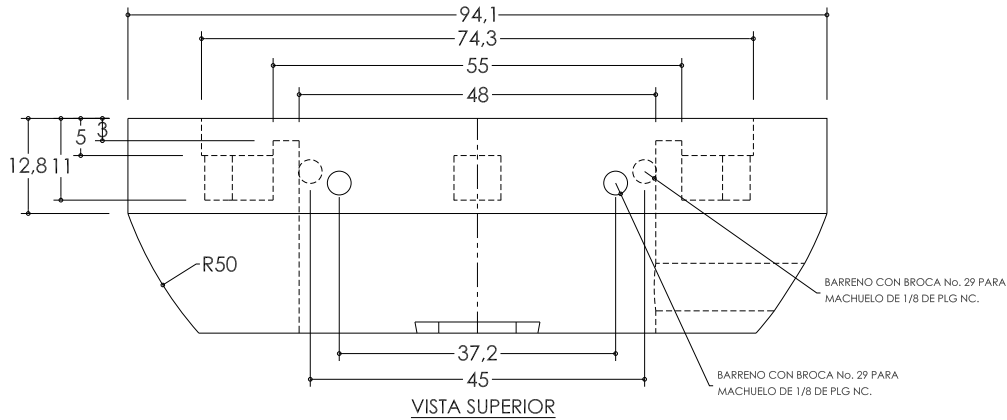
ISOMETRICO

**PIEZA 12**

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/vmin o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CILINDRADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	125		VAR
4	TALADRADO EN MACIZO	TALADRO VIMALERT M-15	BROCA HSS 3/32 PLG	4650	197 - 393	
5	MACHUELADO	MANERAL AJUSTABLE	MACHUELO HSS1/8 NC			

	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA		PLANO No.	<h1>PL-12</h1>
	<b>PROYECTO</b> MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO			
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.		





**PIEZA 1**

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1 Y 2	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CILINDRADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1, 2 Y 5	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	COPIADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 3	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
4	RANURADO	TAL FRE OTMT OT25020	CORT VERT HSS 4G 1/4 PLG	2640	aprox. 5850	min 0.4
5	TALADRO EN MACIZO	TALADRO VIMALERT M-15	BROCA HSS 13/64 Y 3/32 PLG	4650	197 - 393	13/64
6	MACHUELADO	MANERAL AJUSTABLE	MACH HSS NC 1/4 Y 1/8 PLG	170 - 425		3/32

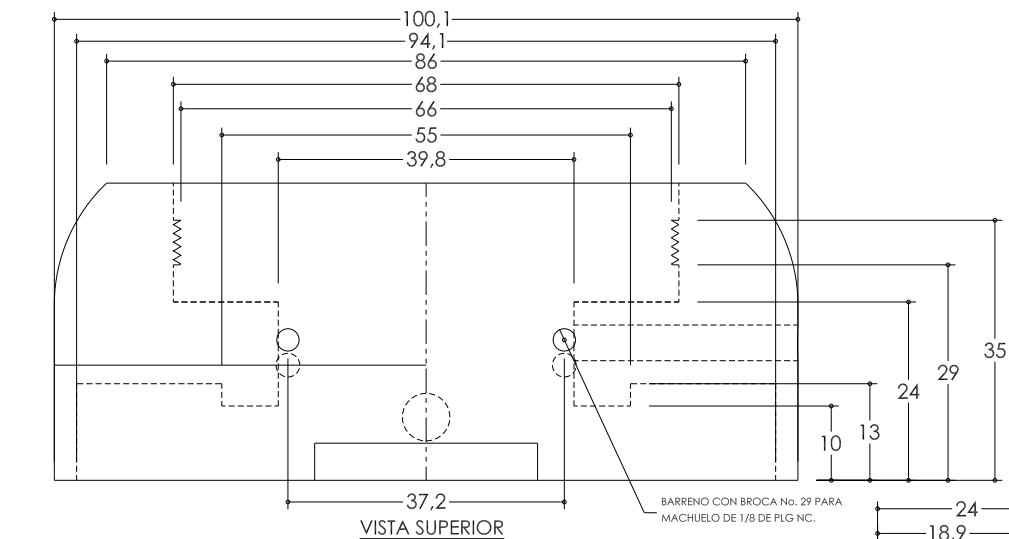


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

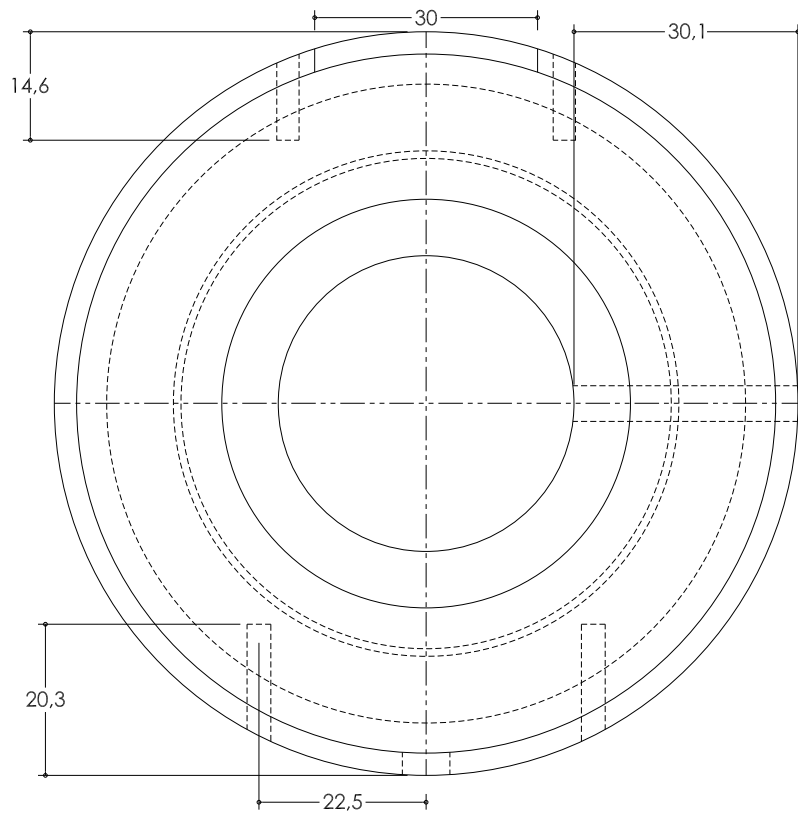
PLANO No.

**PL-13**

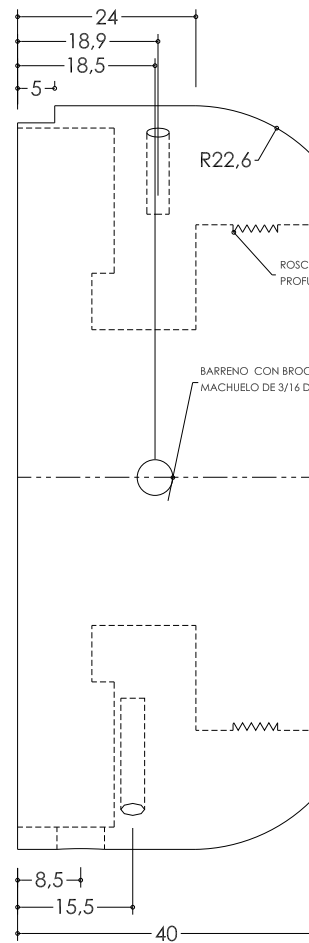
PROYECTO		TÍTULO: MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO				
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: ± 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 13 DE 21	
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.				



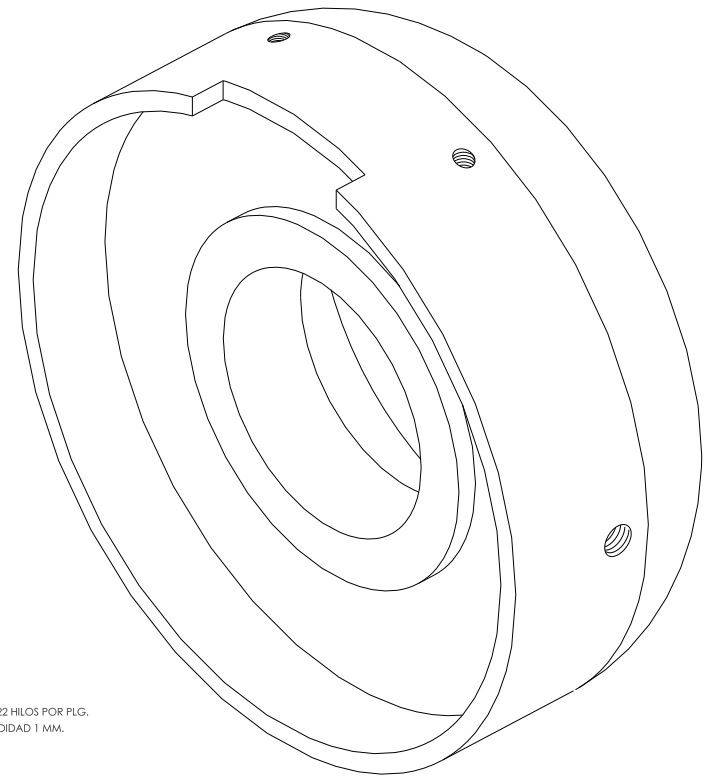
VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



ISOMETRICO

PIEZA 2

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1 Y 2	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CIJDRADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1, 2 Y 5	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	COPIADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 3	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
4	ROSCADO INTERIOR	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 5	70	PASO	
5	RANURADO	TAL FRE OTMT OT25020	CORT VERT HSS 4G 1/4 PLG	2640	aprox 5850	min 0.4
6	TALADRADO EN MACIZO	TALADRO VIMALERT M-15	BROCA HSS 5/32 Y 13/64 PLG	4650	238 - 477	5/32
	MACHUELADO	MANERAL AJUSTABLE	MACH HSS NC 3/16 Y 1/4 PLG	4650	197 - 393	13/64

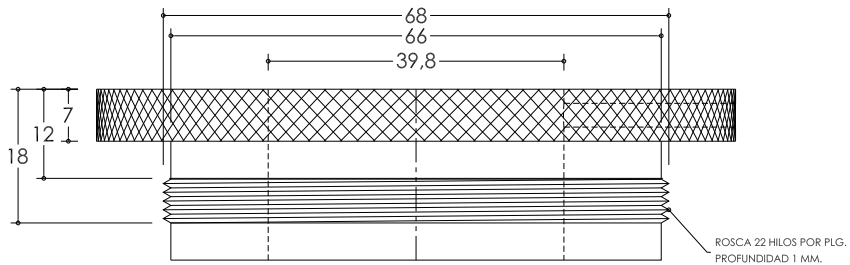


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

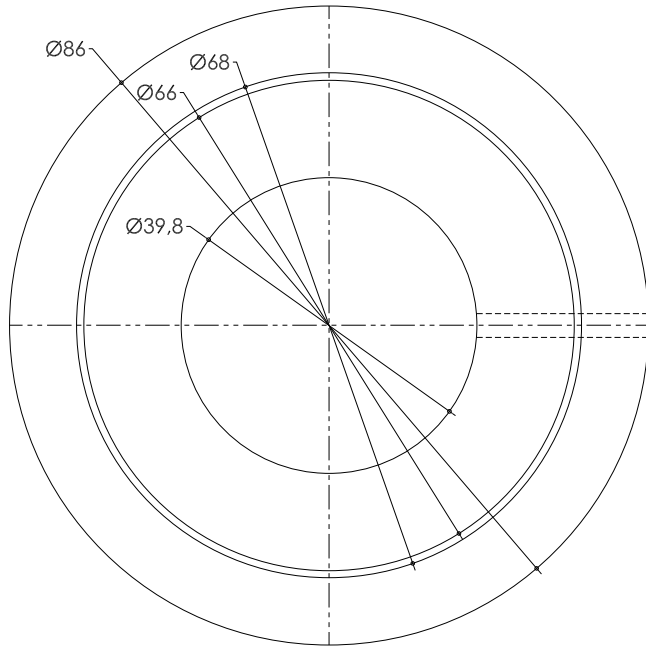
PLANO No.

PL-14

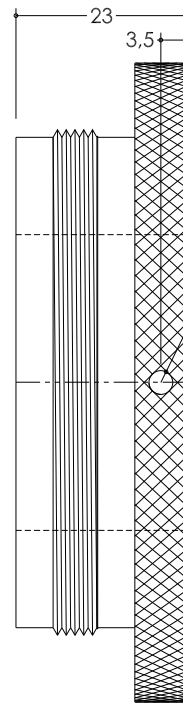
PROYECTO		TÍTULO: MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO				
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 14 DE 21	
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.				



VISTA SUPERIOR

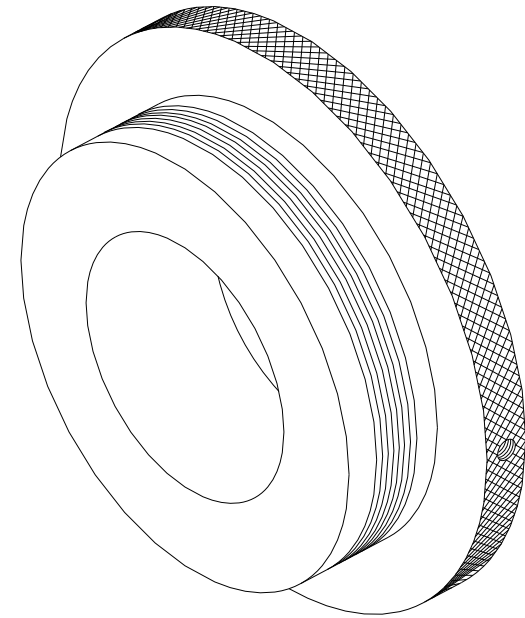


VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

BARRENO PASADO CON  
BROCA No. 29 PARA  
MACHUELO DE 1/8 DE PLG NC.



ISOMETRICO

PIEZA 3

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1 Y 2	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CILINDRADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1 Y 5	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	ROSCADO EXTERIOR	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1	70	PASO	
4	MOLETEADO	TORNO ILSA TR1000-EX	MOL 4 JUE ROD CAB GIR	70		
5	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	125		VAR
6	TALADRO EN MACIZO	TALADRO VIMALERT M-15	BROCA HSS 3/32 PLG	4650	170 - 425	
7	MACHUELADO	MANERAL AJUSTABLE	MACH HSS NC 1/8 PLG			



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

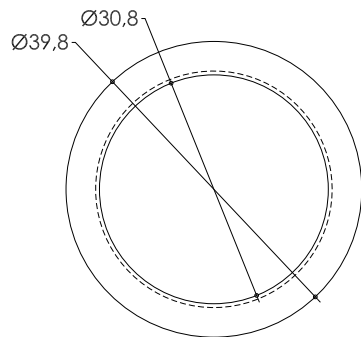
PLANO No.

PL-15

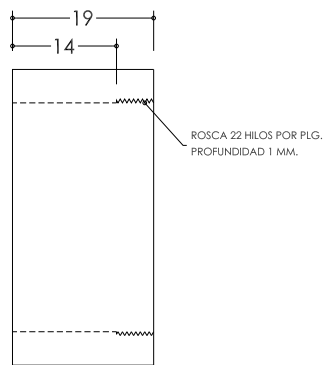
PROYECTO TÍTULO:  
MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO

FECHA DE ELABORACION: 28/05/07 ACOTACION: MM ESCALA: SIN ESCALA TOLERANCIA: +- 0.05 SISTEMA: HOJA: 15 DE 21

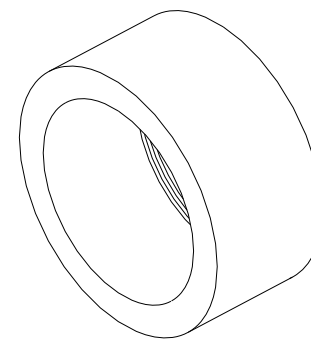
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ. REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ. APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.



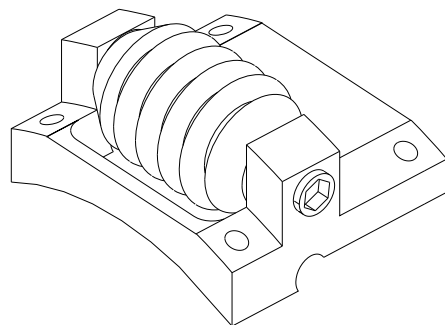
VISTA FRONTAL



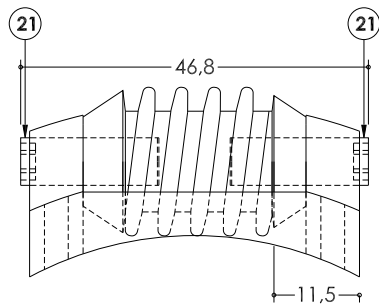
VISTA LATERAL



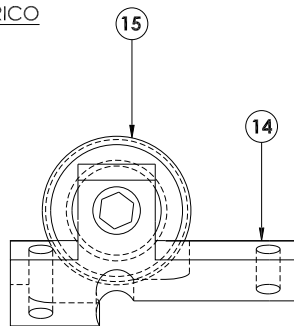
ISOMETRICO



ISOMETRICO



VISTA FRONTAL

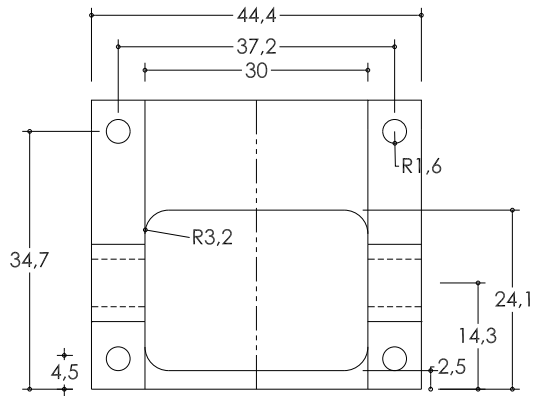


VISTA LATERAL

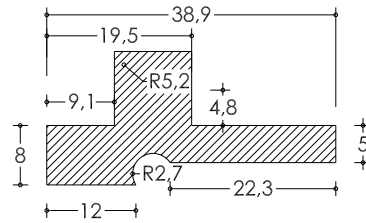
PIEZA 4

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1	700	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CILDRADO (EXTERIOR E INTERIOR)	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 1 Y 5	700	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	ROSCADO INTERIOR	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 5	125	PASO	
4	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	350		VAR

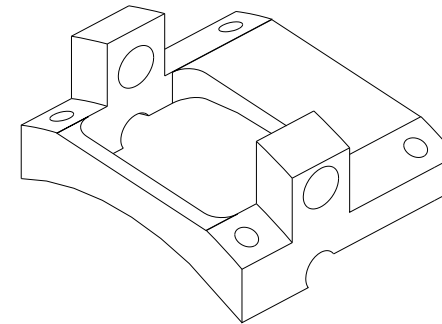
				UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA		PLANO No. <b>PL-16</b>	
<b>PROYECTO</b>		<b>TÍTULO:</b> MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO					
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 16 DE 21		
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.		REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.		APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.			



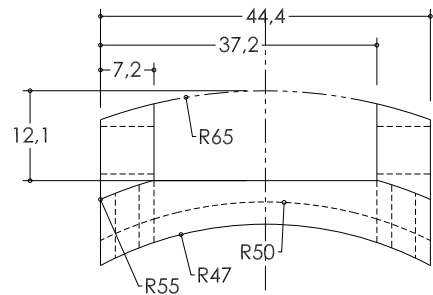
VISTA SUPERIOR



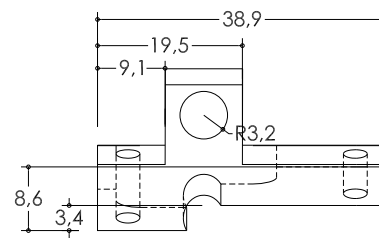
SECCION DE TORNEADO



ISOMETRICO



VISTA FRONTAL



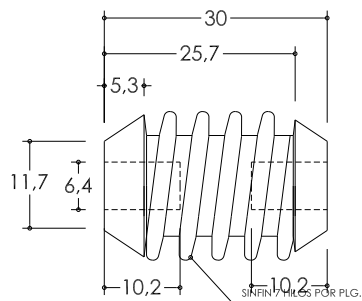
VISTA LATERAL

PIEZA 13

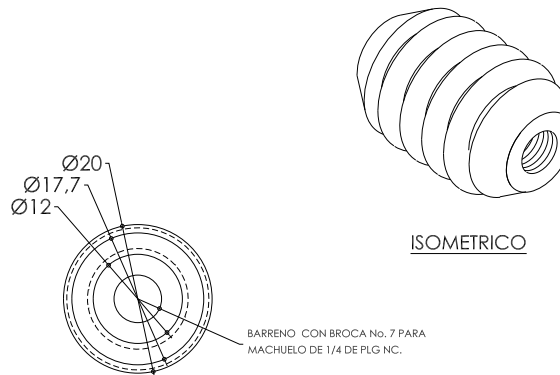
No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	PLANEADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT HSS G4 1/2 PLG	2500	aprox 6300	min 0.4
2	ESCUADRADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT HSS 4G 1/4 PLG	2500	aprox 22500	min 0.4
3	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	350		VAR
4	RANURADO	FRESADORA AHMSA UE	CORT VERT HSS 4G 3/8 PLG	2640	aprox 7800	min 0.4
5	TALADRADO EN MACIZO	TALADRO VIMALERT M-15	BROCA HSS 1/8 Y 1/4 PLG	4650	122 - 305	1/8
				2500	306 - 550	1/4

PIEZA 15

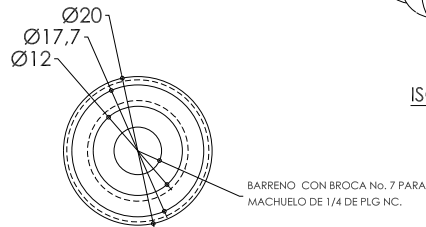
No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	REFRENTADO	TORNO	BURIL 1	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
2	CILINDRADO	TORNO	BURIL 1	375	0.13 - 0.3	0.13 - 1
3	ROSCADO EXTERIOR	TORNO	BURIL 1	270	PASO	
4	TRONZADO	TORNO	BURIL 4	50		VAR
5	TALADRADO EN MACIZO	TALADRO	BROCA HSS 13/64 PLG	4650	197 - 393	
6	MACHUELADO	MANERAL AJUSTABLE	MACHUELO HSS NC 1/4 PLG			




VISTA FRONTAL



ISOMETRICO



VISTA LATERAL



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

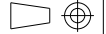
PLANO No.

# PL-17

---

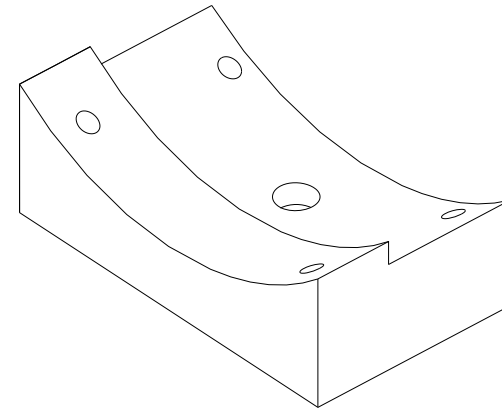
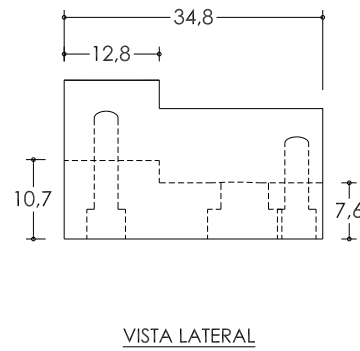
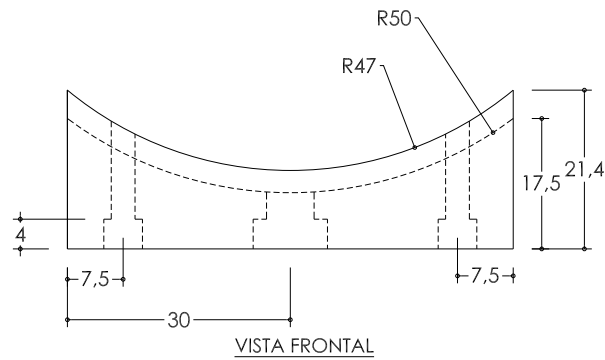
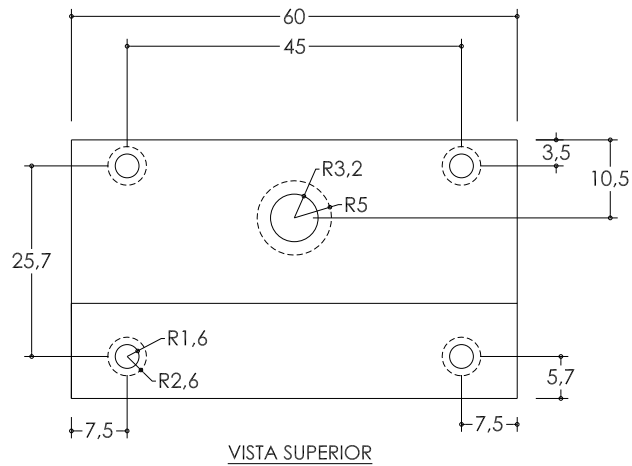
**PROYECTO** MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO

FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: ± 0.05
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.		REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	

SISTEMA: 

HOJA: 17 DE 21

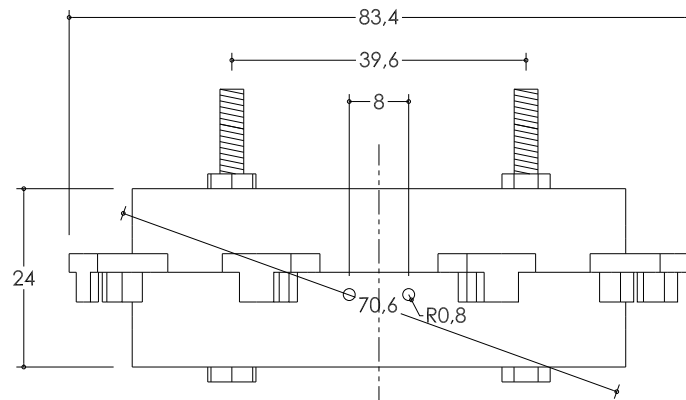
APROBO:  
AGUSTIN SANTIAGO A.



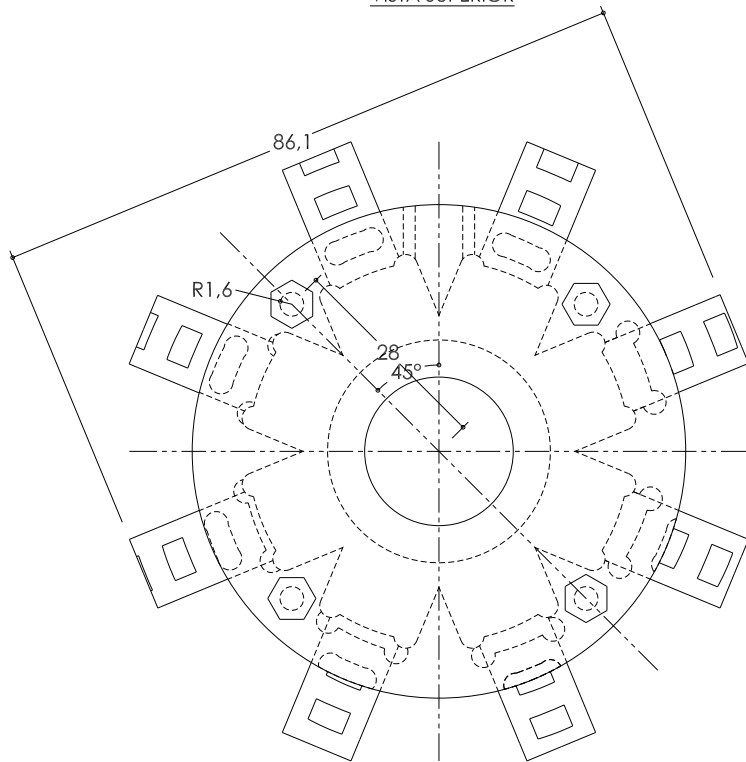
**PIEZA 14**

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	PLANEADO	FRES CNC DYNA EM 3114	CORT VERT HSS G4 1/2 PLG	2500	aprox 6300	min 0.4
2	ESCUADRADO	FRES CNC DYNA EM 3114	CORT VERT HSS 4G 1/4 PLG	2500	aprox 22500	min 0.4
3	TRONZADO	TORNO ILSA TR1000-EX	BURIL 4	350		VAR
4	TALADRADO	TALADRO VIMALERT M-15	BROCA HSS 1/8 Y 1/4 PLG	4650	122 - 305 306 - 550	1/8 1/4
5	RETALADRADO	TALADRO VIMALERT M-15	BROCA HSS 13/64 Y 25/64 PLG	4650	197 - 393	13/64
				2500	196 - 353	25/64

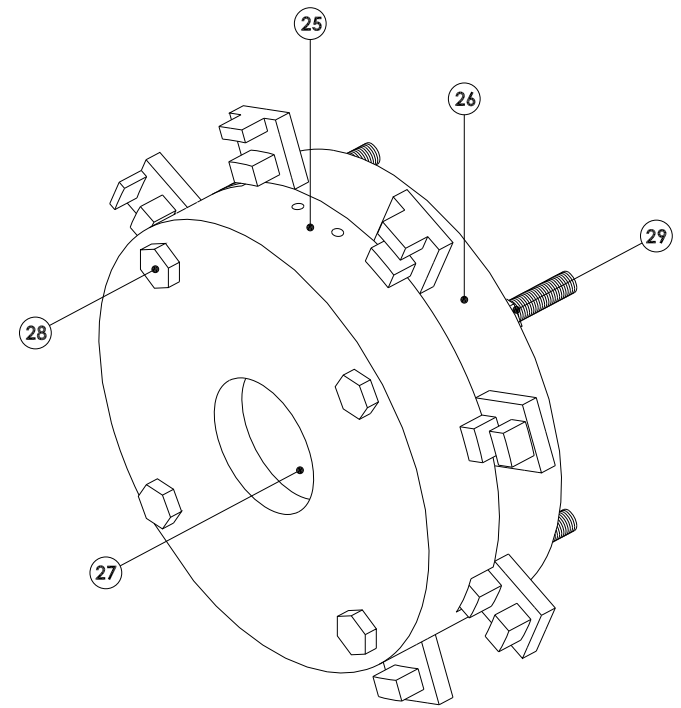
<p>UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA</p>				PLANO No. <h1>PL-18</h1>	
<b>PROYECTO</b>		<b>TÍTULO:</b>			
MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO		MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO			
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 18 DE 21
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.			



VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



ISOMETRICO

No. COMP.	DESCRIPCION	MATERIAL	CANT	DIMENSION 1 MILIMETROS	DIMENSION 2 MILIMETROS
25	MOLDE IZQUIERDO	ACRILICO 3/4 PLG 1.22X2.44	1	66.42	12.75
26	MOLDE DERECHO	ACRILICO 3/4 PLG 1.22X2.44	1	66.42	11.25
27	LENTE SUPERFICIE ADAPTIVA	VIDRIO OPTICO	2	ACCESORIO	
28	TORNILLO GUIA	TOR HEX NC 1/8 PLG X 1 1/2 PLG	4	ACCESORIO	
29	TUERCA TORNILLO GUIA	TUER HEX NC 1/8	4	ACCESORIO	

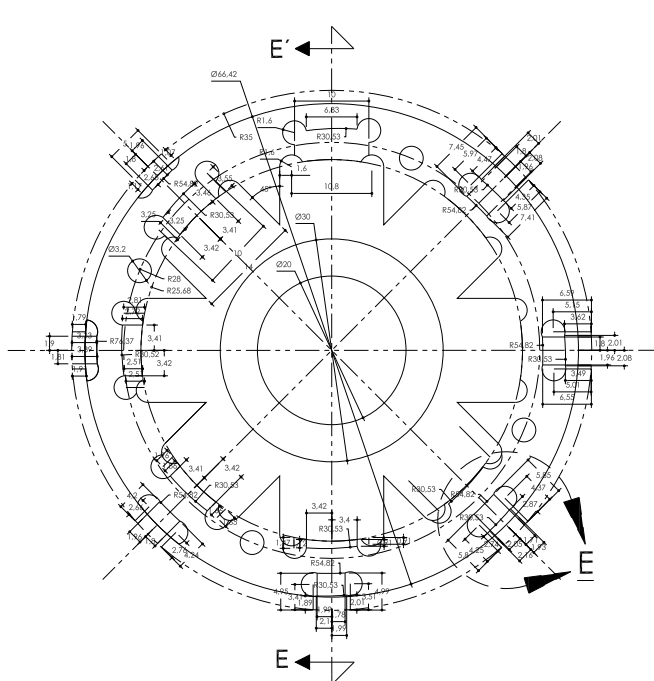


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

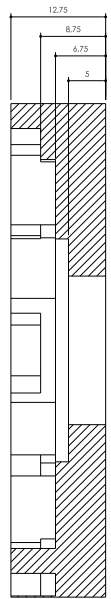
PLANO No.

PL-19

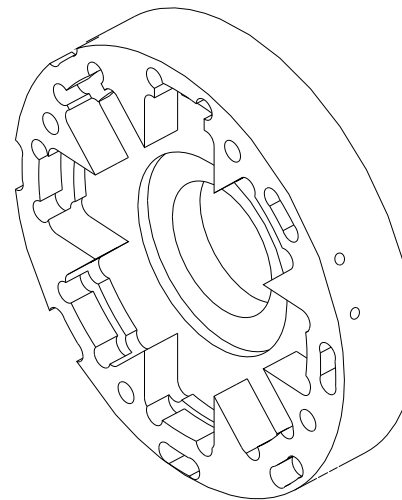
PROYECTO		TITULO: MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO			
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: +- 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 19 DE 21
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.	REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.	APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.			



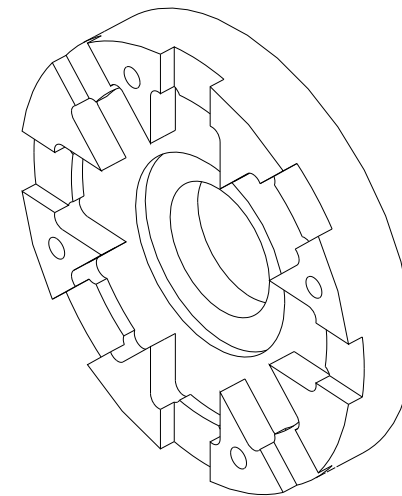
VISTA FRONTAL



SECCION E-E'

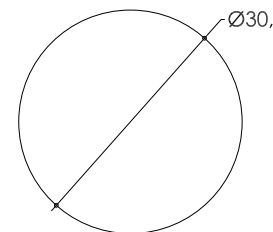


ISOMETRICO

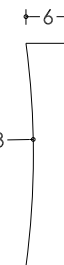


ISOMETRICO

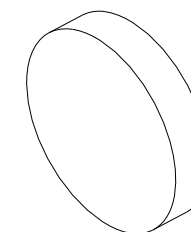
NOTA:  
 - TODOS LOS RADIOS Y DIAMETROS DENTRO DEL RADIO MAXIMO Y EL RADIO MINIMO DEL MOLDE SON DE 3.2 MM.  
 - COMO REFERENCIA PARA LAS ACOTACIONES DE LOS EXTREMOS SE TOMA UN CIRCULO AUXILIAR DE RADIO 35 MM.  
 - EL EJEMPLO DE ACOTACIONES SE MUESTRA EN EL DETALLE E.



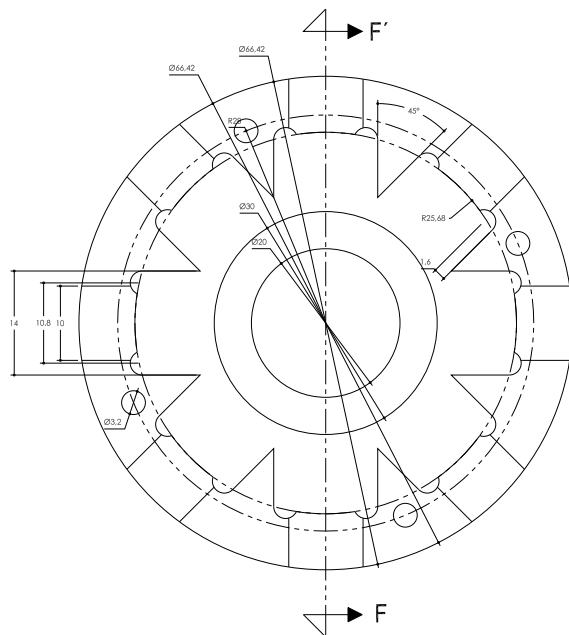
VISTA FRONTAL



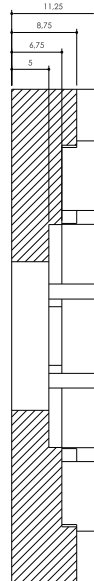
VISTA LATERAL



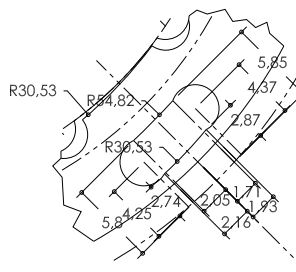
ISOMETRICO



VISTA FRONTAL



SECCION E-F'



DETALLE E

PIEZA 25 | PIEZA 26

No.	OPERACION	MAQUINA	HERRAMIENTA	RPM	AVA (mm/min o mm)	PROF (mm)
1	PLANEADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT CARB G2 1/8 PLG	2500	100	min 0.4
2	PLANEADO EN ESCUADRA	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT CARB G2 1/8 PLG	2500	100	min 0.4
3	RANURADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT CARB G2 1/8 PLG	2500	100	min 0.4
4	CORTADO	FRES CNC DYNA EM 3116	CORT VERT CARB G2 1/8 PLG	2500	100	min 0.4
5	TALADRO EN MACIZO	TALADRO VIMALERT M-15	BROCA HSS 1/16 PLG	4650	VAR	



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

PLANO No.

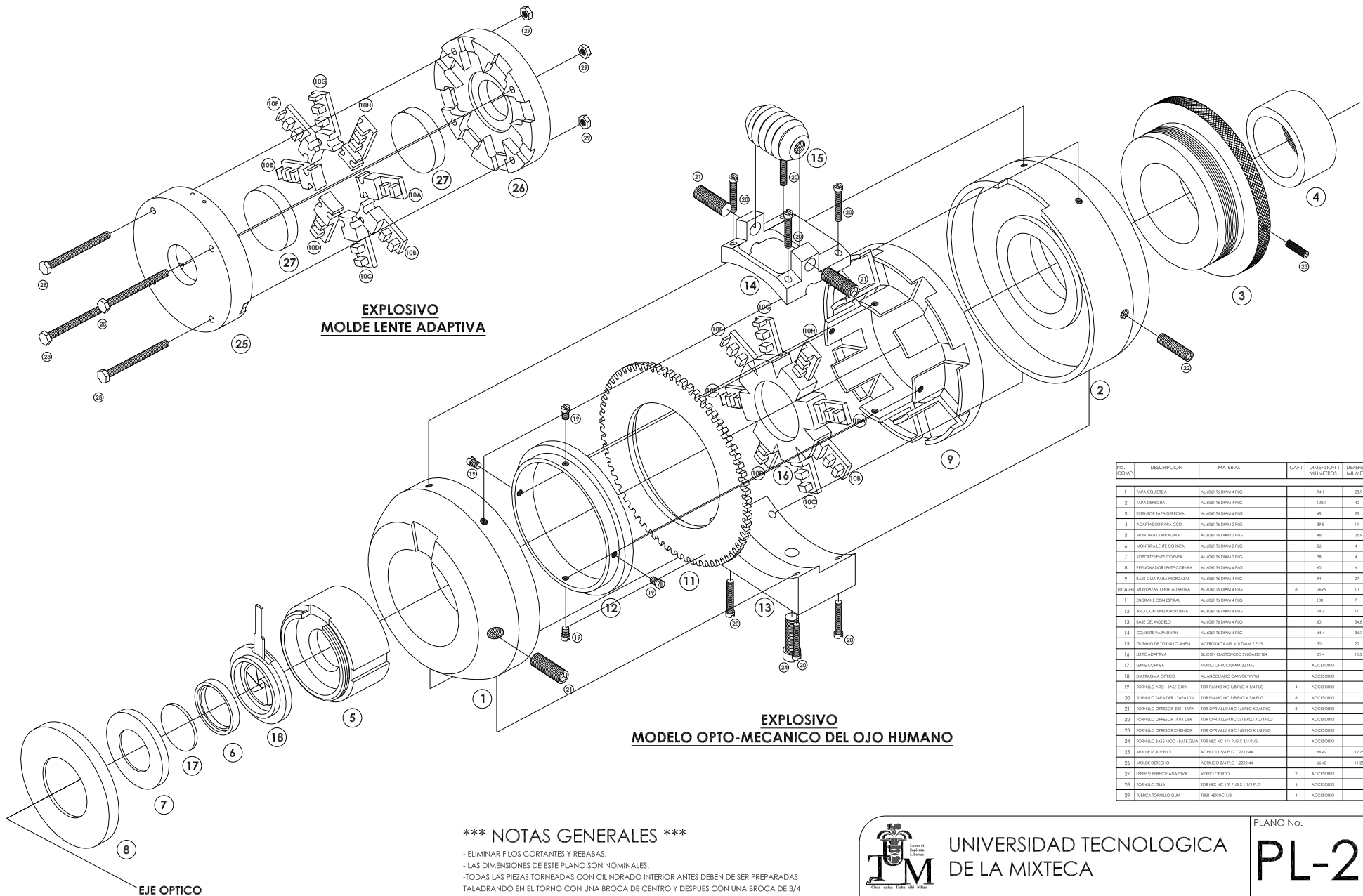
PL-20

PROYECTO: MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO

FECHA DE ELABORACION: 28/05/07 ACOTACION: MM ESCALA: SIN ESCALA TOLERANCIA: +- 0.05 SISTEMA: HOJA: 20 DE 21

DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ. REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ. APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.





**EXPLOSIVO  
MOLDE LENTE ADAPTIVA**

**EXPLOSIVO  
MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO**

NO. C/COMP.	DESCRIPCION	MATERIAL	CANT.	DIMENSION 1 MILIMETROS	DIMENSION 2 MILIMETROS
1	TAPA DERECHA	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	1	94.1	38.8
2	TAPA IZQUIERDA	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	1	100.1	40
3	EXTENSOR TAPA DERECHA	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	1	48	33
4	ADAPTADOR PARA CCD	AL 6061 T6 DMM 2 PUG	1	37.8	19
5	MONITORIA DIAPHRAGMA	AL 6061 T6 DMM 2 PUG	1	48	33.8
6	MONITORIA LENTE CORNEA	AL 6061 T6 DMM 2 PUG	1	36	4
7	SOPORTE LENTE CORNEA	AL 6061 T6 DMM 2 PUG	1	38	4
8	FRENADOR LENTE CORNEA	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	1	40	6
9	BASE GUIA PARA MORDASAS	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	1	74	27
10	MORDASAS LENTE ADAPTIVA	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	8	28.67	10
11	ENGRAÑE CON ESPIRAL	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	1	100	7
12	ARO CONTENEDOR SISTEMA	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	1	74.3	11
13	BASE DEL MODELO	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	1	80	34.8
14	CUBIERTA PARA SHIM	AL 6061 T6 DMM 4 PUG	1	44.4	24.7
15	GUANO DE TORNILLO SHIM	ACERO INOX A82 410 DMM 2 PUG	1	30	20
16	LENTE ADAPTIVA	SILICON BAKKONORRO 0784800 1M	1	31.4	10.8
17	LENTE CORNEA	VIDRIO OPTICO DMM 030MM	1	ACCESORIO	
18	DIAPHRAGMA OPTICO	AL INOXIDADO DMM 030MM	1	ACCESORIO	
19	TORNILLO ARO BASE GUIA	TORHEX MC 1.8 PUG 3 1/4 PUG	4	ACCESORIO	
20	TORNILLO TAPA DER TAPA IZD	TORFLANCO MC 1.8 PUG 3 1/4 PUG	8	ACCESORIO	
21	TORNILLO OBRADOR LEB TAPA	TOR OPI ALUMIN 1.8 PUG 3 1/4 PUG	3	ACCESORIO	
22	TORNILLO OBRADOR TAPA DER	TOR OPI ALUMIN 1.8 PUG 3 1/4 PUG	1	ACCESORIO	
23	TORNILLO OBRADOR EXTENSOR	TOR OPI ALUMIN 1.8 PUG 3 1/2 PUG	1	ACCESORIO	
24	TORNILLO BASE IZD - BASE GUIA	TORHEX MC 1.8 PUG 4 1/4 PUG	1	ACCESORIO	
25	MOLDE IZQUIERDO	ACRILICO 3/4 PUG 1.230244	1	44.42	10.75
26	MOLDE DERECHO	ACRILICO 3/4 PUG 1.230244	1	44.42	10.25
27	LENTE SUPRINCE ADAPTIVA	VIDRIO OPTICO	3	ACCESORIO	
28	TORNILLO GUIA	TORHEX MC 1.8 PUG 4 1/2 PUG	4	ACCESORIO	
29	BIERCA TORNILLO GUIA	TORHEX MC 1.8	4	ACCESORIO	

**\*\*\* NOTAS GENERALES \*\*\***

- ELIMINAR FILOS CORTANTES Y REBABAS.  
 - LAS DIMENSIONES DE ESTE PLANO SON NOMINALES.  
 - TODAS LAS PIEZAS TORNEADAS CON CLINDRADO INTERIOR ANTES DEBEN DE SER PREPARADAS TALADRANDO EN EL TORNO CON UNA BROCA DE CENTRO Y DESPUES CON UNA BROCA DE 3/4 PUG O 1 PUG SEGUN SEA EL CASO. LAS REV DEBEN SER DE 1500 PARA BROCA DE 1/2 PUG Y 700 PARA BROCA DE 3/4 PUG. Y UN AVANCE DE 270 - 500 MM/MIN (1/2) Y 126 - 266 MM/MIN (3/4). PARA EL USO DEL TORNO ILSA TR1000-EX.

- TOLERANCIAS:

LONGITUD	ANGULO
.0 +0.1	x +0.5
.00 +- 0.05	x.x +- 0.1



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE LA MIXTECA

PLANO No.

**PL-21**

<b>PROYECTO</b>		<b>TITULO:</b> MODELO OPTO-MECANICO DEL OJO HUMANO				
FECHA DE ELABORACION: 28/05/07	ACOTACION: MM	ESCALA: SIN ESCALA	TOLERANCIA: + 0.05	SISTEMA: 	HOJA: 21 DE 21	
DIBUJO: RUBEN ARRIAGA MTZ.		REVISO: VICTOR M. CRUZ MTZ.		APROBO: AGUSTIN SANTIAGO A.		