



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

**“RELACIÓN ENTRE EL ESFUERZO Y LA
DEFORMACIÓN DE UNALENTE SINTONIZABLE”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO EN FÍSICA APLICADA

PRESENTA:

BRAYAN RAFAEL LÓPEZ RAYMUNDO

DIRECTOR:

DR. AGUSTIN SANTIAGO ALVARADO

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2023

Dedicatoria

*Con cariño a mis padres Araceli y Rafael,
y hermana Salmi.*

Agradecimientos

A mis padres, Araceli y Rafael, les debo más de lo que las palabras pueden expresar. Su infinito apoyo y sacrificio a lo largo de mi carrera universitaria han sido la base de mi éxito. A mi madre, quien ha sido mi guía desde el principio, mi fuente constante de motivación; y a mi padre, por sus sabios consejos de vida y los valores que ha inculcado en mí. Les estoy eternamente agradecido.

A mi querida hermana Salmal, por su constante aliento, por animarme a seguir adelante y por estar siempre a mi lado. A toda mi familia, en especial a mis abuelas Hilarina y Elva, a Catalina (Catita) y a mi tío Leonardo, por su generosidad y cariño, y por cuidarme desde pequeño.

A mi director de tesis, el Dr. Agustín Santiago Alvarado. Su apoyo, paciencia y valiosas contribuciones han sido cruciales en este camino académico y culminación de este trabajo.

Al Dr. Arturo Hernández Méndez, agradezco no solo su papel como revisor, sino también sus ideas y consejos fundamentales para el desarrollo de esta tesis. A mis sinodales, el Dr. Jorge González García y el M.C. Víctor Manuel Cruz García, les agradezco sinceramente su tiempo y sus valiosos comentarios para mejorar este trabajo.

A mis compañeros de clases y, más que eso, amigos, en especial a Meritxell (Meri), Frida, Iris y Cristian, les agradezco por su apoyo y por honrarme con su valiosa amistad a lo largo de toda la carrera.

A Julieta (Chuls), por estar a lado mío en esta etapa de mi vida y a quien le agradezco por su apoyo y cariño incondicional. A mis mejores amigos: Jesús Canseco y Jorge Olivera, agradezco su entrañable amistad, apoyo y motivación en esta vida.

A todos mis profesores que me impartieron clases en la carrera, muchas gracias por haber contribuido en mi formación compartiéndome de sus conocimientos y por transmitirme su amor por la Física. Especial agradecimiento al Dr. Ángel S. Cruz Félix, quien no solo formó parte del desarrollo de este proyecto, sino que también me brindó su valiosa amistad y enseñanzas que guiaron mi desarrollo académico. También le agradezco al Dr. Alexis Vázquez Villa, por su amistad y por compartirme de sus conocimientos en el área de la óptica.

A todas las personas que colaboraron y fueron cimiento de este trabajo, les agradezco, recordando las palabras de Newton: *“Si he visto más, ha sido porque he subido a hombros de gigantes”*.

Finalmente, a la Universidad Tecnológica de la Mixteca, mi sincero agradecimiento por brindarme la oportunidad durante todos estos años de formarme tanto académica como profesionalmente.

A todos, ¡gracias totales!

Abstract

This present thesis investigated the relationship between stress and deformation in a tunable lens made of PDMS, which emulates the human eye's crystalline lens. The study focused on changes in the radii of curvature, conic constants, and the posterior focal distance of the lens, as well as the present aberrations, which were influenced by the application of linear forces at the lens edges. These linear forces were generated using an opto-mechatronic mount, and their magnitudes were also measured.

Understanding how applied forces affect the optical properties of the tunable lens could have significant implications for optical applications and system design. The study provided detailed information on how radial forces can alter the lens's characteristics, including its focusing and curvature properties.

The results contribute to a better understanding of how mechanical forces can influence the properties of variable-focus lenses and, therefore, significantly impact the field of adaptive optics, especially in the context of tunable lenses. This knowledge can be applied in technologies related to computer vision, imaging, and, more broadly, in the field of visual sciences.

Resumen

En el presente trabajo, se investigó la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación en una lente sintonizable hecha de PDMS que emula el cristalino del ojo humano. El estudio se centró en los cambios en los radios de curvatura, las constantes de conicidad y la distancia focal posterior de la lente, así como las aberraciones presentes, los cuales fueron influenciados por la aplicación de fuerzas lineales en los bordes de la lente. Estas fuerzas lineales se generaron utilizando una montura optomecatrónica, cuyas magnitudes también se midieron.

Comprender cómo las fuerzas aplicadas afectan las propiedades ópticas de la lente sintonizable podría tener importantes implicaciones en aplicaciones ópticas y de diseño de sistemas. El estudio proporcionó información detallada sobre cómo las fuerzas radiales pueden modificar las características de la lente, incluyendo sus propiedades de enfoque y curvatura.

Los resultados contribuyen a una mejor comprensión de cómo las fuerzas mecánicas pueden influir en las propiedades de las lentes de enfoque variable, lo que tiene un impacto significativo al área de la investigación de óptica adaptiva, particularmente en el contexto de lentes sintonizables, para que pueda ser aplicado en tecnologías relacionadas con la visión artificial, la formación de imágenes y, en general, en el área de ciencias visuales.

Índice

Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XIII
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación.....	2
1.3. Hipótesis.....	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.4.3. Metas	3
Capítulo 2. Marco teórico.....	4
2.1. Óptica geométrica.....	4
2.1.1. Conceptos básicos en óptica geométrica.....	4
2.1.2. Sistema Óptico	6
2.1.3. Lentes	6
2.1.4. Lentes esféricas	12
2.2. El ojo humano como sistema óptico	13
2.2.1. Estructura del ojo humano	13
2.2.2. Proceso de acomodación.....	15
2.3. Lentes hechas de polímero	16
2.3.1. Polidimetilsiloxano (PDMS).....	16
2.3.2. Propiedades del PDMS	18
2.4. Lentes sólidas de PDMS.....	19
2.5. Antecedentes	20
2.6. Teoría de aberraciones.....	23
2.6.1. Tipos de aberraciones	23
2.6.2. Aberración en los frentes de onda.....	27
2.6.3. Polinomios de Zernike.....	28
2.7. Desempeño y caracterización óptica.....	31

2.8.	Mecanismo de motores a pasos y engranes	32
2.8.1.	Sistema de engranajes.....	32
2.8.2.	Mecanismo de los motores CD a pasos.....	34
2.9.	Medición y aplicación de fuerzas lineales de tensión y compresión	37
Capítulo 3.	Caracterización de la montura opto-mecatrónica	39
3.1.	Diseño de la montura opto-mecatrónica y descripción de su funcionamiento	39
3.2.	Funcionamiento de los motores a pasos de la montura opto-mecatrónica.....	42
3.3.	Caracterización del funcionamiento de los engranes de la montura opto-mecatrónica	43
3.3.1.	Análisis de la configuración del engranaje de la montura opto-mecatrónica	43
3.3.2.	Medición del par de torsión entregada por la montura opto-mecatrónica	46
3.3.3.	Par de torsión introducido por el sistema opto-mecatrónico en función de la corriente consumida	57
3.4.	Cálculo de las fuerzas lineales de tensión y compresión ejercidas en los brazos de la lente sólida de PDMS	60
Capítulo 4.	Resultados	65
4.1.	Simulación del comportamiento mecánico de la lente sólida de PDMS	65
4.1.1.	Relación entre los cambios de curvatura de la lente sólida de PDMS con los esfuerzos aplicados.....	72
4.2.	Simulación del comportamiento óptico de la lente sólida de PDMS	76
4.3.	Mediciones de la distancia focal posterior (<i>d. f. p</i>) de la lente sólida de PDMS al aplicarle estímulos mecánicos de compresión y tensión	78
4.4.	Desempeño y caracterización óptica.....	84
4.5.	Adquisición de imágenes.....	88
Capítulo 5.	Discusión y conclusiones.....	91
5.1.	Discusión de los resultados obtenidos	91
5.2.	Conclusiones	100
Referencias.....		102

Índice de figuras

Figura 2.1. Reflexión de un rayo en la superficie de un espejo curvo [6].	5
Figura 2.2. Diagrama de refracción de un rayo de luz.	6
Figura 2.3. Rayo de luz que entra en un sistema óptico [6].	6
Figura 2.4. Lente formada por dos superficies esféricas refractoras [6].	7
Figura 2.5. a) Tipos de lentes convergentes y b) tipos de lentes divergentes[7].	7
Figura 2.6. Superficie esférica refractora.	8
Figura 2.7. Diagrama geométrico de rayos de luz principales que atraviesa una lente delgada.	8
Figura 2.8. Diagrama geométrico de los principales puntos cardinales de una lente gruesa [7].	9
Figura 2.9. Puntos nodales en una lente gruesa.	10
Figura 2.10. Diagrama del análisis geométrico de la trayectoria de un rayo en una lente gruesa.	11
Figura 2.11. Representación de una superficie esférica [13].	12
Figura 2.12. Esquema anatómico del ojo humano [7].	14
Figura 2.13. Acomodación del ojo humano [7].	16
Figura 2.14. Proceso de polimerización para obtener el polidimetilsiloxano (PDMS) [1,16].	17
Figura 2.15. Variación del índice de refracción del PDMS [17].	18
Figura 2.16. Módulo de compresión del PDMS para cada razón de concentración [17].	18
Figura 2.17. Módulo de tensión del PDMS para cada razón de concentración [17].	19
Figura 2.18. Proceso de fabricación de una lente sólida de PDMS [1].	20
Figura 2.19. Modelo propuesto por Federico C. et al. (2011) [3].	21
Figura 2.20. Rendimiento de la lente sintonizable bioinspirada por Federico C. et al. [3].	21
Figura 2.21. a) Diagrama del sistema óptico biomimético y b) gráficas de relaciones encontradas.	22
Figura 2.22. Diagramas para ejercer fuerzas sobre una lente sólida elástica (SEL) de PDMS.	22
Figura 2.23. Variación de la distancia focal efectiva con respecto a la fuerza aplicada.	23
Figura 2.24. Aberración esférica de una lente biconvexa [7].	24
Figura 2.25. Imagen comática de una fuente puntual [6].	24
Figura 2.26. Posición de focos sagitales y tangenciales en una imagen con astigmatismo.	25
Figura 2.27. Imagen de una rueda que sufre aberración de astigmatismo [8].	25
Figura 2.28. Imagen de un objeto con y sin distorsión, con distorsión positiva y negativa.	26
Figura 2.29. Frente de onda esférico desenfocado y frente de onda de referencia de radio.	27
Figura 2.30. Rayos normales al frente de onda.	27
Figura 2.31. Aberración del frente de onda [20].	28
Figura 2.32. Mapa de colores y gráfica tridimensional de los polinomios de Zernike [24].	30
Figura 2.33. Vista lateral del sensor de tipo Shack-Hartmann.	31

Figura 2.34. Diagrama de los puntos de enfoque de una onda plana y una onda distorsionada [29].	32
Figura 2.35. Par de engranes [31].	33
Figura 2.36. Nomenclatura del diente de engrane [30].	33
Figura 2.37. Tren de engranes simple.	34
Figura 2.38. a) Principales elementos de un motor a paso. b) Giro del rotor del motor a paso [33].	35
Figura 2.39. Fases de un motor a paso unipolar [33].	36
Figura 2.40. Curvas características de un motor a paso [34].	37
Figura 2.41. a) Diagrama del circuito inductivo-resistivo de uno de los motores a paso	37
Figura 3.1. a) Pieza que contiene al SEL y b) diseño original hechos en SOLIDWORKS®.	39
Figura 3.2. a) Pieza hecha de PDMS y b) comparación del SEL y los moldes utilizados.	40
Figura 3.3. a) Vista del lado inverso de la montura opto-mecatrónica, b) vista detallada del lado inverso y c) vista del lado anverso de la montura opto-mecatrónica.	41
Figura 3.4. Ventana de la interfaz que controla el número de pasos y la dirección de giro de los tres motores implementados en la montura.	42
Figura 3.5. Esquema del tren engranes simple de la montura opto-mecatrónica	43
Figura 3.6. Diagrama del mecanismo del sistema biela-manivela que convierte el par de torsión	44
Figura 3.7. Diagrama de los dos subsistemas del mecanismo de tren de engranes de montura	45
Figura 3.8. Diagrama del arreglo experimental para medir las fuerzas tangenciales.	46
Figura 3.9. Fotografía de vista superior de la montura.	47
Figura 3.10. a) Diagrama geométrico para medir fuerzas y b) fotografía del sensor de carga	47
Figura 3.11. Fotografía del arreglo experimental para la medición de las fuerzas tangenciales.	48
Figura 3.12. Medición de los diámetros del SEL en ImageJ®.	49
Figura 3.13. Diámetro de abertura posterior del SEL para fuerzas de tensión sobre el SEL.	51
Figura 3.14. Diámetro de abertura del SEL para el caso de fuerzas de compresión sobre el SEL	51
Figura 3.15. Variación en el diámetro de abertura de la superficie posterior con respecto al par de torsión cuando el sistema ejerce una fuerza de tensión sobre el SEL.	52
Figura 3.16. Variación en el diámetro de abertura de la superficie posterior con respecto al par de torsión cuando el sistema ejerce una fuerza de compresión sobre el SEL.	52
Figura 3.17. Curva que mejor se ajusta a los puntos de la tabla 3.6.	53
Figura 3.18. Curva que mejor se ajusta a los puntos de la tabla 3.7.	53
Figura 3.19. Variación de: a) el par de torsión del engrane principal 1 (τ_1) y b) el par de torsión en los engranes secundarios (τ_{ST}).	55
Figura 3.20. Variación de: a) el par de torsión del engrane principal y b) secundario	56
Figura 3.21. Diagrama de control del sistema y esquema del circuito de los dos motores a paso	57
Figura 3.22. Gráfica de la variación del consumo de corriente de motores a paso para tensión	57
Figura 3.23. Gráfica de la variación de corriente de motores a paso para compresión.	58

Figura 3.24. Variación del par de torsión con respecto a la corriente consumida en tensión	59
Figura 3.25. Variación del par de torsión con respecto a la corriente consumida en compresión	59
Figura 3.26. Aplicación de las fuerzas lineales de: a) tensión máxima y b) compresión máxima.....	60
Figura 3.27. Diagrama de fuerzas actuantes en cada una de las bielas con la rotación	60
Figura 3.28. a) Engrane principal 1 con el conjunto de sistemas biela-manivela. b) Distribución de esfuerzos cortantes.	61
Figura 3.29. Variación de la magnitud de la fuerza lineal de tensión en cada brazo del SEL	64
Figura 3.30. Variación de la magnitud de la fuerza lineal de compresión en cada brazo del SEL	64
Figura 4.1. a) Perfil de la pieza del SEL; b) sólido de revolución generado.	65
Figura 4.2. a) Brazos de la pieza creadas mediante una matriz circular y b) pieza completa	66
Figura 4.3. a) Mallado de la pieza. Vista isométrica de las fuerzas, b) tensión y c) compresión	66
Figura 4.4. Vista de sección lateral de la pieza donde se muestra la geometría fija aplicada.	67
Figura 4.5. Resultados de la simulación del SEL en SolidWorks®.	68
Figura 4.6. Distribución de tensiones sobre el SEL cuando se aplica una fuerza de tensión.	69
Figura 4.7. Desplazamiento total del SEL cuando se aplica una fuerza lineal de tensión.....	69
Figura 4.8. Distribución de tensiones sobre el SEL cuando se aplica una fuerza de compresión.	70
Figura 4.9. Desplazamiento total del SEL cuando se aplica una fuerza lineal de compresión	70
Figura 4.10. Cambio en los perfiles de las superficies del SEL con la fuerza de tensión.....	71
Figura 4.11. Cambio en los perfiles de las superficies del SEL con la fuerza de compresión.....	71
Figura 4.12. Gráfica de puntos que forman cada superficie anterior.	72
Figura 4.13. Gráfica de puntos que forman cada superficie posterior.	72
Figura 4.14. Variación del radio de curvatura de la superficie anterior y curva que mejor se ajusta a los datos cuando se aplican fuerzas de: a) tensión y b) compresión en cada brazo del SEL.	73
Figura 4.15. Variación del radio de curvatura de la superficie posterior y curva que mejor se ajusta a los datos cuando se aplican fuerzas de: a) tensión y b) compresión sobre cada brazo del SEL.	73
Figura 4.16. Variación de la constante de conicidad de la superficie anterior y curva que mejor se ajusta a los datos cuando se aplican fuerzas de: a) tensión y b) compresión.....	74
Figura 4.17. Variación de la constante de conicidad de la superficie posterior y curva que mejor se ajusta a los datos cuando se aplican fuerzas de: a) tensión y b) compresión.....	74
Figura 4.18. Diseño del SEL hecho en Zemax®.	76
Figura 4.19. Simulación en Zemax® del SEL.	77
Figura 4.20. Variación de la distancia focal efectiva del SEL.	77
Figura 4.21. Diagrama del arreglo experimental para medir las distancias focales posteriores.	78
Figura 4.22. Arreglo experimental para medir las distancias focales posteriores	78
Figura 4.23. Fotografía que muestra el mecanismo para obtener los puntos focales.	79
Figura 4.24. Secuencia de imágenes de manchas de concentración de luz producidas por tensión ..	80

Figura 4.25. Secuencia de imágenes de las manchas de luz generados cuando se aplica una fuerza lineal de compresión a cada brazo del SEL.	81
Figura 4.26. Variación de la $d.f.p$ con respecto a la fuerza lineal de tensión.	82
Figura 4.27. Variación de la $d.f.p$ con respecto a la fuerza lineal de compresión.	82
Figura 4.28. Variación del diámetro de la mancha generada de puntos focales por tensión.	83
Figura 4.29. Variación del diámetro de la mancha generada de puntos focales por compresión.	83
Figura 4.30. Arreglo experimental para la obtención de los coeficientes de Zernike.	84
Figura 4.31. Coeficientes de Zernike obtenidos mediante el sensor de frente de onda Shack-Hartmann cuando el SEL es sometido a distintas magnitudes de fuerza de tensión.	85
Figura 4.32. Coeficientes de Zernike obtenidos mediante el sensor de frente de onda Shack-Hartmann cuando el SEL es sometido a distintas magnitudes de fuerza de compresión.	85
Figura 4.33. Frentes de onda reconstruidos por el sensor Shack-Hartman generados cuando los brazos del SEL están sometidos a una fuerza lineal de tensión.	86
Figura 4.34. Frentes de onda reconstruidos por el sensor Shack-Hartman generados cuando los brazos del SEL están sometidos a una fuerza lineal de compresión.	87
Figura 4.35. Imágenes adquiridas a través del SEL con y sin aplicar fuerzas lineales.	88
Figura 4.36. Series de imágenes de SEL cuando es sometida a distintas fuerzas lineales.	89
Figura 4.37. Montaje experimental para la adquisición de imágenes de 2 objetos y capturas de los dos objetos cuando el SEL es sometido a una fuerza de tensión y compresión.	90
Figura 5.1. Comparación de la variación de: a) el radio de curvatura y b) la constante de conicidad de las superficies cuando se aplica una determinada fuerza de tensión lineal sobre el SEL.	92
Figura 5.2. Comparación de la variación de: a) el radio de curvatura y b) la constante de conicidad de las superficies cuando se aplica una determinada fuerza de compresión lineal sobre el SEL.	93
Figura 5.3. Cambios en el valor de los coeficientes de Zernike para las aberraciones de (tilt Y), (tilt X) y desenfoque, cuando la lente está en estado de: a) tensión y b) compresión.	94
Figura 5.4. Cambios en el valor de los coeficientes de Zernike para las aberraciones de astigmatismo en 45° , astigmatismo en 0° y de alto orden cuando se aplica al SEL fuerzas de tensión.	95
Figura 5.5. Cambios en el valor de los coeficientes de Zernike para las aberraciones de astigmatismo en 45° , astigmatismo en 0° y de alto orden cuando se aplica al SEL fuerzas de compresión.	96
Figura 5.6. Cambios en el valor de la distancia focal posterior con respecto a la fuerza de tensión aplicada a la lente obtenidas de manera experimental y calculadas de manera teórica.	98
Figura 5.7. Cambios en el valor de la distancia focal posterior con respecto a la fuerza de compresión aplicada a la lente obtenidas de manera experimental y calculadas de manera teórica.	98

Índice de tablas

Tabla 2.1. Código para la fabricación del PDMS que relaciona sus parámetros de síntesis [17].	17
Tabla 2.2. Algunos polinomios de Zernike normalizados [23].	29
Tabla 3.1. Parámetros del lente cristalino [40,41].	39
Tabla 3.2. Características principales del motor a pasos modelo 28BYJ-48 [42].	42
Tabla 3.3. Radio y número de dientes de los engranes de la montura.	43
Tabla 3.4. Fuerzas tangenciales medidas por el sensor de carga y pares de torsión calculadas cuando el engrane principal se hace girar manualmente hacia la derecha.	48
Tabla 3.5. Fuerzas tangenciales medidas por el sensor de carga y pares de torsión calculadas cuando el engrane principal se hace girar manualmente hacia la izquierda.	49
Tabla 3.6. Valores de los diámetros de la superficie posterior obtenidos en ImageJ® por cada fuerza tangencial aplicada, cuando el sistema ejerce tensión en el SEL.	50
Tabla 3.7. Valores de los diámetros de la superficie posterior obtenidos en ImageJ® por cada fuerza tangencial aplicada, cuando el sistema ejerce compresión en el SEL.	50
Tabla 3.8. Valores de los diámetros de abertura de la superficie posterior por cada ángulo recorrido del engrane principal para que el sistema ejerza tensión y compresión lineal sobre el SEL.	54
Tabla 3.9. Valores del par de torsión calculados a partir de la solución de la ecuación (3.9), cuando son aplicadas fuerzas de tensión sobre el SEL.	55
Tabla 3.10. Valores del par de torsión calculados a partir de la solución de la ecuación (3.10), cuando son aplicadas fuerzas de compresión sobre el SEL.	55
Tabla 3.11. Par de torsión que proporciona el sistema motores-engranes y que corresponde a cada valor de la corriente eléctrica que consume el sistema opto-mecatrónico cuando el SEL se somete a un estado de tensión y compresión.	58
Tabla 4.1. Valores de la distancia focal posterior del SEL cuando se le aplican distintas magnitudes de fuerza de tensión.	81
Tabla 4.2. Valores de la distancia focal posterior del SEL cuando se le aplican distintas magnitudes de fuerza de compresión.	82
Tabla 5.1. Ecuaciones que describen el cambio en los radios de curvatura para cada superficie en función de la fuerza lineal aplicada en cada brazo de la lente.	93
Tabla 5.2. Ecuaciones que describen el cambio en las constantes de conicidad para cada superficie en función de la fuerza lineal aplicada en cada brazo de la lente.	94
Tabla 5.3. Ecuaciones que describen los cambios en la distancia focal posterior en función de la fuerza lineal aplicada en cada brazo de la lente.	97

Capítulo 1. Introducción

En la rama de la óptica, una lente quizá sea el dispositivo que más aplicaciones tenga en la actualidad pues es implementado en procesamiento de imágenes, en comunicaciones ópticas, en corrección de la visión, en la manipulación de la dirección de un haz de luz, en dispositivos para generar imágenes en 3D y otras aplicaciones tanto científicas como tecnológicas [1,2,3,4].

Para una lente sólida convencional, su distancia focal está bien definida, sin embargo, muchos sistemas ópticos han requerido que esta distancia focal sea variable, tal es el caso del ojo humano, que es un sistema óptico compuesto de dos lentes principales, la córnea y el cristalino. El cristalino del ojo humano tiene la naturaleza de ser una lente elástica que cambia dinámicamente su longitud focal, está unido por fibras al músculo ciliar. El músculo ciliar se contrae y el cristalino disminuye así sus radios de curvatura y la distancia focal. Para lograr esto en la práctica, la distancia focal se modifica mediante un sistema de lentes ajustando la distancia entre ellos, sin embargo, este sistema es inconveniente, complejo y voluminoso. Debido a estas razones, las lentes sintonizables de longitud focal variable han tenido gran desarrollo en investigación en las últimas décadas [1,2,3].

Han surgido diferentes modelos, que están compuestos de líquido, lo cual, les permite modificar su forma y con ello sus parámetros geométricos. Las lentes adaptativas se componen de membranas elásticas, con líquido en su interior, entre otras. Entre todos estos tipos, están las lentes sólidas que comúnmente están hechas de polímeros elastómeros, lo cual permite tener propiedades altamente elásticas y un buen rendimiento óptico [1,2].

Existen ya numerosos estudios que muestran un cambio en la distancia focal debido a la variabilidad de los radios de curvatura al aplicarles cierto tipo de estímulos. Algunos de estos, son dispositivos bioinspirados hechos con elastómeros electroactivos que asemejan a los músculos ciliares los cuales son integrados como un actuador. Tras la activación eléctrica, el músculo artificial deforma una lente líquida hecha de elastómeros [3]. Otros han diseñado un tipo completo del sistema óptico del ojo humano integrado principalmente por una lente córnea biónica, un motor de bobina móvil, un anillo de compresión y una lente cristalina biónica que, mediante el control de la corriente del motor de la bobina móvil, se puede alterar el radio de curvatura de la lente cristalina biónica, ajustando así la distancia focal [4]. Sin embargo, estos y muchos otros modelos no han mostrado de manera directa la cuantificación de los esfuerzos que se le aplican a las lentes sintonizables para poder cambiar su longitud focal.

En el presente proyecto de tesis, se propone hacer un análisis mecánico del rendimiento óptico de una lente sintonizable de PDMS, establecer una relación de los cambios de radio de curvatura y de los cambios en la distancia focal de la lente que se producen cuando se deforma al aplicarle esfuerzos, así como la adquisición de imágenes similares a las que se obtienen por el ojo humano. Haciendo uso de un sistema de montaje opto-mecatrónico proporcionado por el Cuerpo Académico UTMIX-CA-22 “Óptica Aplicada” de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Los resultados obtenidos contribuirán al área de la investigación de óptica adaptativa enfocado a lentes sintonizables, para que pueda ser aplicado en tecnología que involucre visión artificial, formación de imágenes y en general en el área de ciencias visuales.

1.1. Planteamiento del problema

Las lentes con propiedades ópticas sintonizables han sido objeto de una extensa investigación. Los elementos capaces de cambiar su distancia focal de forma dinámica, es decir, sin una mecánica compleja para mover los elementos de la lente a lo largo del eje óptico, facilitarán aún más la miniaturización de los sistemas ópticos manteniendo su flexibilidad. La reducción de los sistemas ópticos no solo hará que los productos de consumo sean más pequeños y versátiles, sino que algún día podrían proporcionar imágenes de alta calidad en cirugía endoscópica y, por lo tanto, respaldar diagnósticos médicos [2,3,4]. Siendo entonces de particular interés la investigación actual sobre lentes sintonizables de PDMS, cuyas propiedades incluyen su modificación geométrica mediante la aplicación de diferentes tipos de estímulos.

Como se mencionó, existen ya algunos modelos de dispositivos bioinspirados que se basan precisamente en lentes sintonizables hechas de elastómero, obteniendo buenos resultados de desempeño. Sin embargo, muchos de estos dispositivos se integran de componentes ópticos, eléctricos y mecánicos de alto costo.

Por lo tanto, se plantea un análisis del rendimiento óptico de una lente sintonizable de PDMS, mediante la caracterización de los actuadores que interactúan sobre la lente, simulaciones que muestran el desempeño mecánico de la lente y un análisis de las aberraciones de frente de onda obtenidas debido a las deformaciones de la lente. Además, se busca establecer una relación entre los cambios de radio de curvatura de la lente sintonizable que se producen al aplicarle esfuerzos y la adquisición de imágenes similares a las que se obtienen por el ojo humano. Todo esto se realiza caracterizando y haciendo uso de un sistema de montaje opto-mecatrónico de menor costo proporcionado por el Cuerpo Académico UTMIX-CA-22 “Óptica Aplicada” de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

1.2. Justificación

Las lentes ópticas con enfoque sintonizable, capaces de modificar sus características físicas, son muy importantes y necesarias en muchos campos de aplicación como la electrónica, comunicaciones ópticas, sistema de imágenes y particularmente para imitar algunas funciones biológicas realizadas por el ojo humano [5]. Por tal motivo, es de gran importancia el estudio y caracterización de una lente sintonizable hecha con PDMS que este proyecto de tesis propone. La realización de este proyecto también está motivado debido a la buena implementación y la alta calidad óptica que las lentes sólidas de PDMS pueden lograr en comparación con otros enfoques de lentes sintonizables.

La utilización del sistema de montaje opto-mecatrónico para la lente sintonizable de PDMS, que previamente fue diseñado y construido por el Cuerpo Académico de Óptica Aplicada, también brindará ventajas al ser de bajo costo y de fácil manejo. Su caracterización también es de gran importancia, pues ayudarán a obtener los parámetros que son necesarios para describir el rendimiento del sistema óptico con el que se trabajará.

Por otra parte, otra de las razones por las cuales se pretende realizar esta tesis es para poder establecer una relación entre los radios de curvatura y los cambios en la distancia focal posterior que se producen al aplicar los estímulos mecánicos, pues en los diversos estudios relacionados a esta área no han mostrado resultados directos que existen entre estas relaciones. El desarrollo de este proyecto permitirá generar sistemas ópticos bioinspirados en el ojo humano, así mismo, al caracterizar los mecanismos de actuación permitirá cuantificar las fuerzas a aplicar a una lente sintonizable para

cambiar su enfoque, lo cual puede emplearse en visión artificial, formación de imágenes y particularmente en ciencias de la visión.

1.3. Hipótesis

La aplicación de estímulos mecánicos en una lente sólida elástica (SEL) hecha de PDMS, que emula el comportamiento del cristalino del ojo humano, modificará el frente de onda al modificar los radios de curvatura de la lente. Es posible relacionar estímulos mecánicos con los cambios en los radios de curvatura de una SEL.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Establecer la relación del cambio en los radios de curvatura de una lente de PDMS sintonizable que se producen al aplicarle estímulos mecánicos de tensión o compresión mediante un sistema opto-mecatrónico.

1.4.2. Objetivos específicos

- Definir y caracterizar actuadores del sistema opto-mecatrónico que interactúan con una lente sintonizable.
- Medir experimentalmente el estímulo mecánico de tensión y compresión que proporciona el sistema opto-mecatrónico, y medir la longitud focal posterior de la lente que se da como resultado al aplicar dicho estímulo. Así mismo, evaluar el rendimiento óptico del sistema y la adquisición de imágenes.
- Simular el comportamiento mecánico y óptico de una lente sintonizable a la cual se le aplican estímulos mecánicos de tensión y compresión.
- Relacionar el estímulo mecánico que el sistema opto-mecatrónico ejerce sobre una lente sintonizable con el cambio de los radios de curvatura producidos por el mismo.

1.4.3. Metas

- Arreglo experimental que permita definir y caracterizar el sistema de montaje opto-mecatrónico en el cual se va a adaptar la lente sintonizable, mediante la obtención del par de torsión y los esfuerzos lineales que el sistema proporciona.
- Simulaciones mecánicas y ópticas bajo condiciones encontradas previamente al caracterizar el sistema opto-mecatrónico.
- Arreglo experimental para el sensor de frente de onda Shack-Hartmann para la obtención del rendimiento óptico, para la medición de la distancia focal posterior y la adquisición de imágenes del sistema óptico.
- Reporte final que incluya los resultados experimentales y las simulaciones, y a partir de ello, obtener el mejor ajuste que relacione los estímulos mecánicos con el cambio en los radios de curvatura y los cambios en la distancia focal posterior de la lente de PDMS mediante el uso del sistema opto-mecatrónico.

Capítulo 2. Marco teórico

Para llevar a cabo la caracterización de un sistema opto-mecatrónico que sintonice una lente hecha de polidimetilsiloxano (PDMS), el cual emula el cristalino del ojo humano simulando su comportamiento biomecánico, realizar mediciones experimentales y establecer una relación entre los cambios de radio de curvatura y los estímulos mecánicos de tensión y compresión aplicados a dicha lente, es fundamental conocer los principios físicos y matemáticos que rigen el comportamiento de este sistema óptico en particular.

En este capítulo se realiza una breve descripción de los principios, postulados y conceptos básicos de la óptica geométrica. Posteriormente, se hace un repaso teórico del modelo del ojo humano como sistema óptico, un breve estudio del análisis de aberraciones en los frentes de onda, una introducción a las lentes de PDMS y la mecánica de esfuerzos que se emplea en este tipo de lentes. Por otro lado, también es importante conocer los antecedentes teóricos y experimentales realizados en el área de la óptica de lentes sintonizables, por lo que se hacen referencias a algunos dispositivos bioinspirados que han contribuido en resultados fundamentales para dicha área.

2.1. Óptica geométrica

La luz puede ser descrita o tratada de distintas formas, podemos estudiar a la luz mediante una teoría en la cual utilizamos una función de onda escalar. Esta forma de tratar a la luz se les conoce como óptica ondulatoria. Sin embargo, existe una teoría más completa de la luz dentro de los límites clásicos, esta es la de óptica electromagnética en la cual se considera su propagación en forma de dos campos ortogonales eléctrico y magnético, que se rige por los mismos principios de todas las formas de naturaleza de radiación electromagnética. Desde otro punto de vista, ciertos fenómenos ópticos son de naturaleza cuántica y no pueden explicarse de manera clásica [6]. Cuando una onda de luz atraviesa un medio cuyo tamaño es mucho mayor que su longitud de onda, el comportamiento de la luz se puede representar mediante rayos que describen la dirección en la cual se propaga la energía de dicha onda de luz mediante ciertas reglas geométricas. A esta forma de describir a la luz se le conoce como óptica geométrica [6].

2.1.1. Conceptos básicos en óptica geométrica

Postulados de la óptica geométrica

-La luz viaja en forma de rayos que son emitidos por alguna fuente luminosa y se pueden observar cuando llegan a un detector óptico.

- El medio en el que se propaga la luz está caracterizado por una cantidad $n \geq 1$, llamado índice de refracción dado como: $n = \frac{c_0}{c}$, donde c_0 es la velocidad de la luz en el espacio y c es la velocidad de la luz en el medio. Entonces el tiempo que le tomará a la luz viajar una distancia d es: $d/c = nd/c_0$, en donde al producto nd se le conoce como longitud de camino óptico.

-En un medio no-homogéneo, el índice de refracción estará dado en función de la posición $\vec{r} = (x, y, z)$. La longitud de camino óptico que va de un punto r_1 a un punto r_2 estará dada como:

$$C.O = \int_{r_1}^{r_2} n(\vec{r}) ds, \quad (2.1)$$

donde ds es un diferencial de longitud a lo largo del camino [6].

-De todas las trayectorias posibles que puede seguir un rayo de luz de un punto r_1 a un punto r_2 , los rayos ópticos solo seguirán una trayectoria tal que el tiempo de viaje (o la longitud del camino óptico) entre los dos puntos sea un extremo en relación con las trayectorias vecinas. Es decir, el camino real entre dos puntos tomados por un rayo de luz es el que recorre el menor tiempo. A esto se le conoce como el “principio de Fermat” [6,7]. Matemáticamente puede ser expresada como la siguiente ecuación:

$$\delta \int_{r_1}^{r_2} n(\vec{r}) ds = 0, \quad (2.2)$$

donde δ indica que la variación del camino óptico es un punto de inflexión o bien que es mínima. De otro modo el principio de Fermat en la óptica geométrica puede verse como una analogía al principio de mínima acción.

Leyes de reflexión y refracción

Dada una superficie en la cual se le hace incidir luz tal como se muestra en la Figura 2.1, la ley de reflexión sostiene que “el rayo de luz incidente, el perpendicular a la superficie y el rayo de luz reflejado se encuentran en un plano llamado plano de incidencia; el ángulo de reflexión θ_1' es igual al ángulo de incidencia θ_1 ” [6,7].

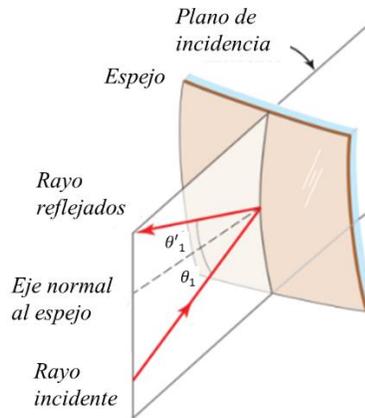


Figura 2.1. Reflexión de un rayo en la superficie de un espejo curvo. Tanto el ángulo de incidencia θ_1 como el ángulo de reflexión θ_1' se miden desde una perpendicular dibujada a la superficie reflectante [6].

Si ahora se considera el límite entre dos medios de índices de refracción n_1 y n_2 , cuando un rayo incide, se divide en dos: un rayo reflejado y un rayo refractado. El rayo reflejado obedecerá la ley de reflexión. Mientras que el rayo refractado obedecerá la ley de refracción enunciada como:

“Cuando el rayo refractado se encuentra en el plano de incidencia: el ángulo de refracción θ_2 está relacionado con el ángulo de incidencia θ_1 por la ley de Snell” [6].

Dicha Ley se encuentra expresada de la siguiente forma:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2. \quad (2.3)$$

A partir de la Figura 2.2, la ley de refracción se deduce definiendo a la distancia: $d_1 + d_2$, como el camino óptico y al utilizar el principio de Fermat el cual establece que el camino óptico sea un mínimo, se llega a la expresión (2.3).

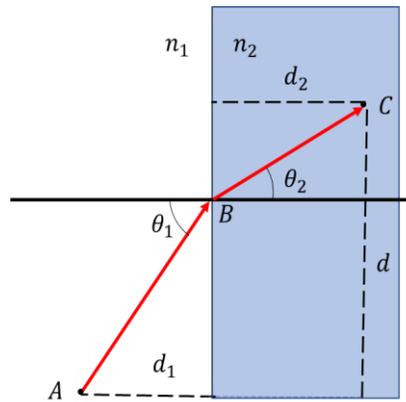


Figura 2.2. Diagrama de refracción de un rayo de luz.

2.1.2. Sistema Óptico

Un sistema óptico es un arreglo o conjunto de componentes ópticos los cuales pueden ser superficies reflectoras, refractoras o bien una combinación de ambas que separan medios con distinto índice de refracción y tiene como función modificar parte del frente de onda incidente a veces con el objetivo de formar imágenes.

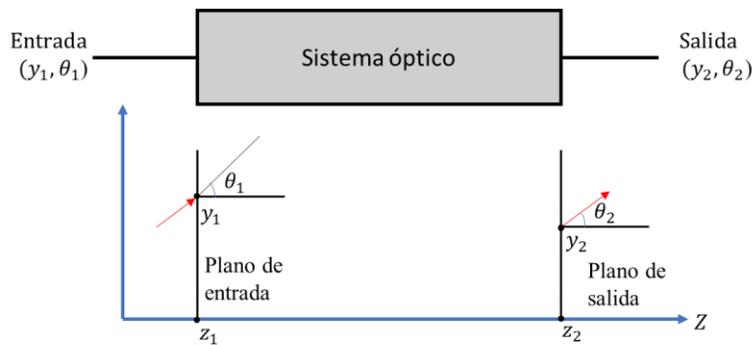


Figura 2.3. Un rayo de luz que entra en un sistema óptico ubicado inicialmente en la posición (y_1, z_1) en un ángulo θ_1 y que sale en la posición (y_2, z_2) a un ángulo θ_2 [6].

El sistema óptico también se puede caracterizar completamente por su efecto sobre un rayo entrante de posición y dirección arbitrarias (y_1, z_1) , redirigiendo el rayo para que tenga una nueva posición y dirección (y_2, z_2) en un plano de salida (ver Figura 2.3) [7].

2.1.3. Lentes

Una lente es un dispositivo refractor que reconfigura una distribución de energía emitida por una fuente de luz ubicada en algún punto del espacio [7]. A una lente también se le define como un sistema óptico delimitado por dos superficies refractoras que tienen un eje en común; por lo general las dos superficies son porciones de esfera y encierran un medio cuyo índice de refracción es diferente con

respecto a los índices de refracción que están a ambos lados de la lente, tal como se muestra en la Figura 2.4. Por lo tanto, están completamente definidos por los radios R_1 y R_2 , por su espesor axial d y el índice de refracción n del cual está hecho el material de la lente [6].

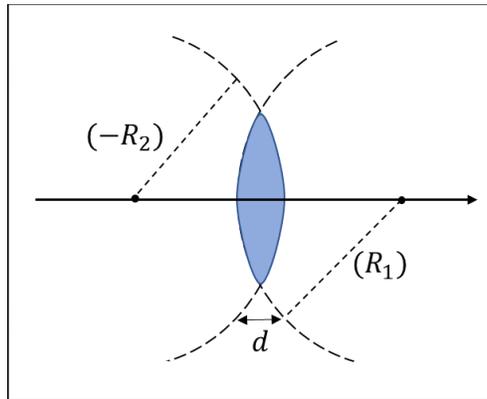
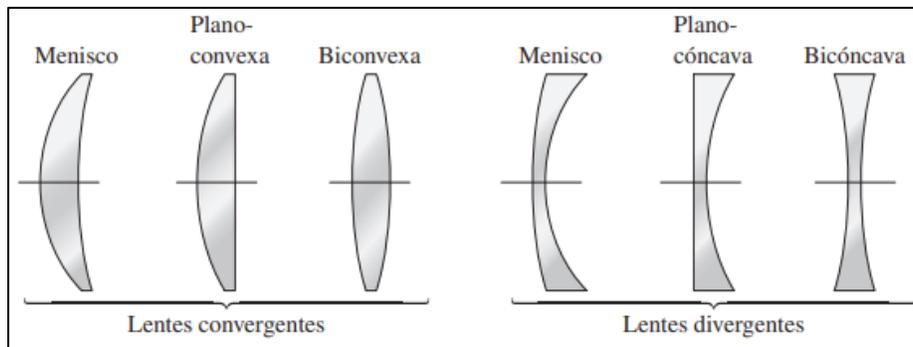


Figura 2.4. Lente formada por dos superficies esféricas refractoras de espesor d y de radios R_1 y R_2 [6].

Considerando la forma y propiedades de convergencia, las lentes se clasifican en dos tipos: lente convergente y lente divergente. Las lentes convergentes suelen ser más gruesas en su centro que en los bordes y convergen los rayos de luz que se les hace incidir en un solo punto. A este punto se le conoce como foco. Cuando el objeto se encuentra a distancias muy lejanas considerada como infinito, a la distancia de separación entre el foco y del centro de la lente se le conoce como distancia focal (f). Algunos ejemplos de lentes convergentes son: menisco convergente, plano convexa y biconvexa, las cuales se pueden apreciar en la Figura 2.5a). Por otro lado, las lentes divergentes suelen ser más delgadas en su centro y más gruesas en los bordes. En estas lentes, el punto de donde proviene los rayos de luz, se le conoce como foco virtual. Las lentes divergentes se pueden presentar como: menisco divergente, plano cóncava y bicóncava, las cuales se pueden observar en la Figura 2.5b). En las lentes divergentes, la distancia focal se mide a partir del punto donde se ubica el objeto al centro de la lente, en este caso se considera negativa [7,8].



a)

b)

Figura 2.5. a) Tipos de lentes convergentes: menisco convergente, planoconvexa y biconvexa. b) Tipos de lentes divergentes: menisco divergente, planocóncava y bicóncava [7].

Lente delgada

Cuando el espesor medido en la dirección del eje de la lente es lo suficientemente pequeño para que pueda suponerse que la desviación de un rayo luminoso tenga lugar únicamente en el plano que pasa por el centro de la lente, ésta se denomina lente delgada [7,8,9].

Para una superficie esférica refractora (SER) como la que se muestra en la Figura 2.6, si se conocen sus características tales como el índice de refracción del medio anterior a la superficie n_1 , el índice de refracción del medio posterior a la superficie n_2 y el radio de curvatura de la superficie R , se tiene una expresión la cual permite encontrar la posición de la imagen producida por la SER, que está dada como:

$$\frac{n_1}{z_1} + \frac{n_2}{z_2} = \frac{n_2 - n_1}{R}, \quad (2.4)$$

que es conocida como la fórmula de Gauss para una SER. Donde z_1 es la distancia del objeto al vértice y z_2 es la distancia del vértice hacia la imagen.

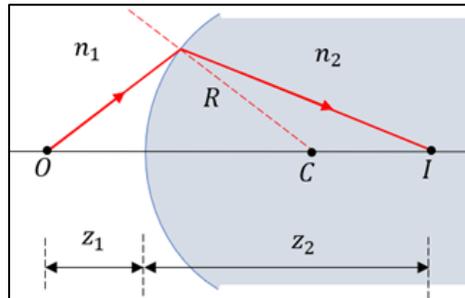


Figura 2.6. Superficie esférica refractora.

Al aplicar la ecuación (2.4) en ambas superficies que componen a una lente y al utilizar la aproximación de rayos paraxiales, se obtiene una relación matemática mediante la cual, es posible calcular la posición de la imagen producida por una lente delgada, cuando se conozca la posición del objeto fuente y las características del sistema óptico. Así, para una lente que se considere delgada (ver Figura 2.7), que se encuentre entre dos medios de índice de refracción n_1 y n_2 , fabricada con un material cuyo índice de refracción sea n , con radios de curvatura R_1 y R_2 , se describe matemáticamente de la siguiente forma [7,8]:

$$\frac{n_1}{z_1} + \frac{n}{z_2} = \frac{n - n_1}{R_1} + \frac{n_2 - n}{R_2}. \quad (2.5)$$

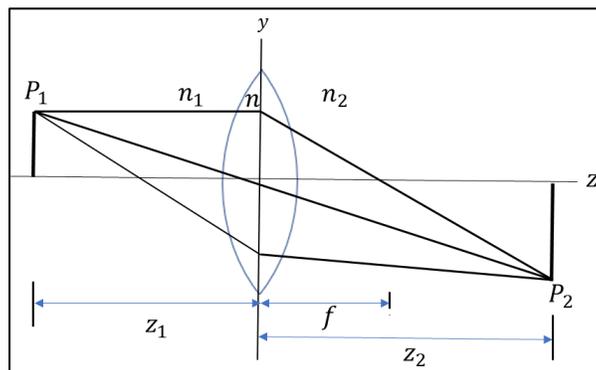


Figura 2.7. Diagrama geométrico de rayos de luz principales que atraviesa una lente delgada.

Esta última ecuación es la fórmula de Gauss para lentes delgadas en su forma más general. Si se considera que la lente es delgada y se encuentra en el aire, entonces $n_1 = n_2 = 1$ y la ecuación (2.5) se reduce a:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.6)$$

La ecuación (2.6) caracteriza a una lente delgada, en la cual, con un índice de refracción determinado y moldeado mediante una superficie esférica con los radios de curvatura definidos, se obtiene una distancia focal f determinada. A la magnitud $1/f$ se le conoce como potencia o poder refractor de la lente y su unidad es la dioptría (m^{-1}). Cuando el objeto se encuentra en una posición muy lejana de la lente, tal que se considera infinita, la distancia focal f se define como la distancia entre el centro de la lente y el punto focal [7,8,9].

Lente gruesa

Cuando el espesor de una lente no es despreciable frente a su distancia focal, diámetro de apertura o sus radios de curvatura, se considera como una lente gruesa. Una lente gruesa generalmente está compuesta por dos superficies esféricas, en donde cada una de las superficies contribuye a la formación de la imagen final del objeto dado [7,10].

En los diagramas de la Figura 2.8, se describe una lente gruesa, en donde el espesor en ningún caso es despreciable. Los puntos focales del objeto e imagen F_0 y F_i respectivamente, pueden medirse desde los vértices externos. En tal caso, tendremos las conocidas distancia focal frontal y distancia focal posterior indicadas en la figura como $d.f.f.$ y $d.f.p.$ Los puntos de intersección de los rayos de entrada y salida al ser prolongados forman una superficie curva que puede estar a fuera o adentro de la lente. Dicha superficie se puede aproximar a un plano en la región paraxial, la cual se denomina plano principal. Los puntos principales primero y segundo, H_1 y H_2 respectivamente, son los puntos en donde los planos principales primario y secundario cruzan el eje óptico [7].

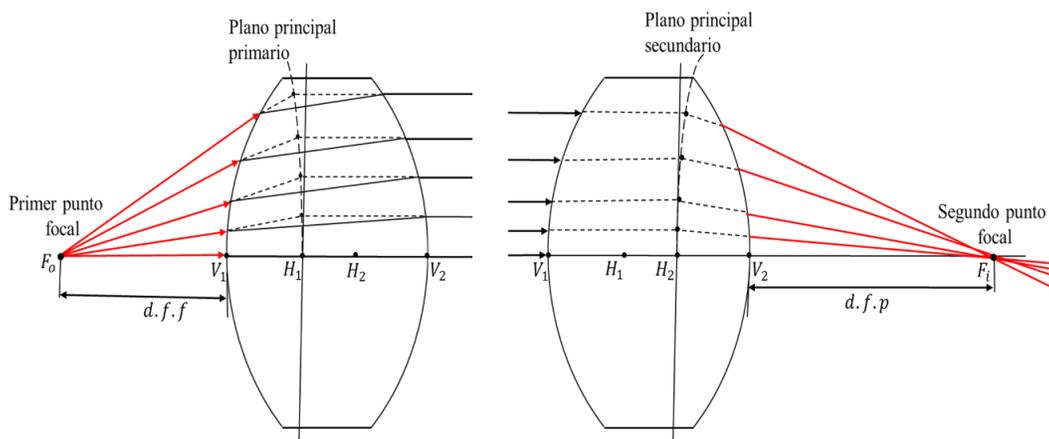


Figura 2.8. Diagrama geométrico de los principales puntos cardinales de una lente gruesa [7].

Los puntos de intersección de los rayos de entrada y salida con el eje óptico al ser prolongados son llamados puntos nodales, N_1 y N_2 mostrados en la Figura 2.9. Los seis puntos, dos focales, dos principales y dos nodales constituyen los puntos cardinales del sistema de una lente gruesa [7].

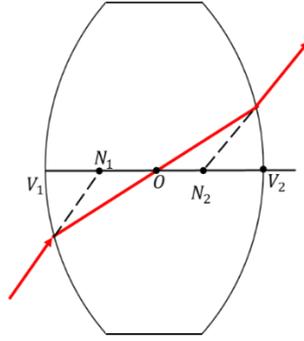


Figura 2.9. Puntos nodales en una lente gruesa.

La determinación analítica de la posición y de la naturaleza de las imágenes creadas por cualquier sistema óptico, se realiza empleando la ecuación de Gauss en su forma más general [8,9]:

$$\frac{n_1}{z_1} + \frac{n_2}{z_2} = p, \quad (2.7)$$

donde p es la potencia del sistema. De los resultados anteriores, se tiene que la potencia para una superficie refractora esférica y la potencia de una lente delgada están dadas por las ecuaciones (2.4) y (2.6). Para determinar la potencia de la lente gruesa, se hace uso del análisis geométrico mostrado en la Figura 2.10 y se plantea un sistema de ecuaciones del cual se obtiene la posición de los puntos V_1 y V_2 en función de los parámetros de la lente. A partir de la ecuación (2.7), y si se considera que la fuente de luz se encuentra a una distancia muy lejana de la lente, es decir, $z_1 \rightarrow \infty$, las potencias para la primera y segunda superficie se pueden expresar mediante las siguientes ecuaciones [7,10]:

$$\frac{n_2}{z_2'} = p_1, \quad (2.8)$$

$$\frac{n_2}{z_1'} + \frac{n_3}{z_2} = -\frac{n_2}{-(z_2' - d)} + \frac{n_3}{z_2} = p_2. \quad (2.9)$$

El valor de z_2 indica la posición de la imagen producida por la lente gruesa para un objeto lejano pero medido desde la segunda superficie. Para calcular la distancia focal efectiva de la imagen (f), se debe determinar la distancia entre la superficie y el punto principal imagen H_2 , que es el segmento $\overline{V_2 H_2}$. Mediante la semejanza de los triángulos, se obtiene la relación siguiente:

$$\frac{f}{z_2} = \frac{z_2'}{z_2' - 1}. \quad (2.10)$$

Despejando a z_2 de la ecuación (2.10) y sustituyendo en la ecuación (2.9), y si se considera además que la potencia total de la lente es inversamente proporcional a la distancia focal de la imagen, que se puede definir como n_3/f , se llega a la siguiente expresión [10]:

$$p = p_1 + p_2 - \frac{d}{n_2} p_1 p_2, \quad (2.11)$$

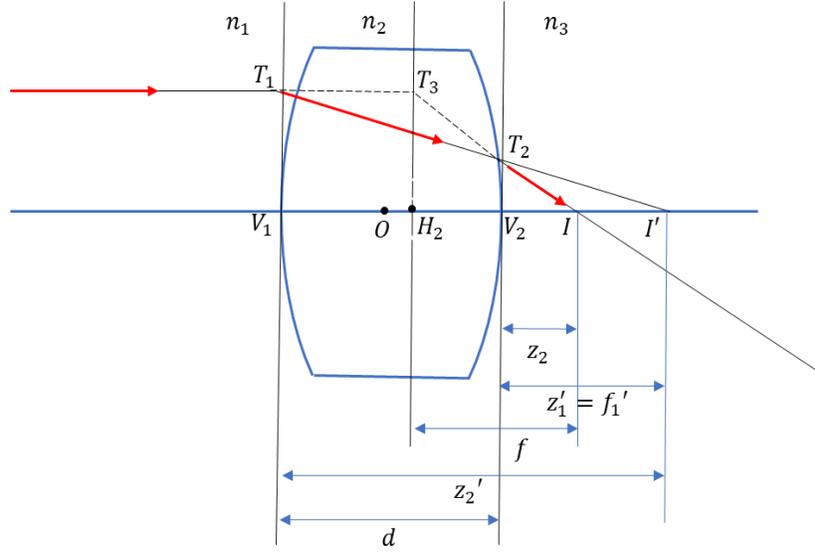


Figura 2.10. Diagrama del análisis geométrico de la trayectoria de un rayo en una lente gruesa.

y de (2.4) se puede definir también que las potencias para cada superficie están dadas como:

$$p_1 = \frac{n_2 - n_1}{R_1}, \quad (2.12)$$

$$p_2 = \frac{n_3 - n_2}{R_2}.$$

Por lo tanto, la potencia para una lente gruesa es:

$$p = \frac{n_3}{f} = \frac{n_2 - n_1}{R_1} + \frac{n_3 - n_2}{R_2} - \frac{d}{n_2} \frac{n_2 - n_1}{R_1} \frac{n_3 - n_2}{R_2}. \quad (2.13)$$

Si se considera a la lente gruesa sumergida en el aire $n_1 = n_3 = 1$ y hecha con un material de índice de refracción $n_2 = n$, la ecuación (2.13) se reduce a la siguiente ecuación:

$$p = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{d}{n} \frac{n-1}{R_1 R_2} \right). \quad (2.14)$$

Esta última ecuación, permite construir a una lente gruesa en el medio, con una distancia focal efectiva predeterminada por los parámetros de radio de curvatura de las superficies que la compongan, el espesor de la lente y el índice de refracción del material del que este hecha [10].

Por otro lado, igualando las ecuaciones (2.8) y (2.9) con el par de ecuaciones (2.12) y tomando en cuenta los valores de los índices de refracción previamente definidos, se tiene que:

$$\frac{n-1}{R_1} = \frac{n}{z_2'}, \quad (2.15)$$

$$-\frac{n}{(z_2')} + \frac{1}{z_2} = \frac{1-n}{R_2}. \quad (2.16)$$

Por definición, la distancia focal posterior es la distancia z_2 , la cual se puede obtener despejando z_2' de la ecuación (2.15) y sustituyendo en la ecuación (2.16) [8]:

$$\frac{1}{d \cdot f \cdot p} = \frac{1}{z_2} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1 \left(1 - \frac{(n-1)}{R_1 n} d \right)} - \frac{1}{R_2} \right]. \quad (2.17)$$

Cuando d tiende a cero, las expresiones (2.14) y (2.17) tienden al valor de la distancia focal de una lente delgada, es decir, la distancia focal efectiva y la distancia focal posterior son equivalentes.

2.1.4. Lentes esféricas

Las lentes esféricas son lentes que se conforman por superficies esféricas, es decir, por superficies que no son esféricas ni planas. Debido a la capacidad de reducir la aberración esférica, estas lentes pueden mejorar potencialmente la calidad de las imágenes en comparación con las lentes esféricas convencionales. Además, también pueden reducir el tamaño y el peso de los sistemas ópticos, ya que una lente esférica puede reemplazar varias lentes esféricas. Esto las hace especialmente útiles en aplicaciones en las que el tamaño y el peso son factores críticos [11,12].

Para poder diseñar este tipo de lentes, es necesario poder describir las superficies esféricas que las componen. Estas superficies se dividen en dos grupos: 1) superficies de revolución con un eje de simetría y 2) superficies de revolución con dos planos de simetría [13].

Las superficies esféricas más utilizadas en óptica y para el diseño de lentes pertenece al primer grupo y entre ellas se encuentran las parábolas, elipses e hipérbolas. En la Figura 2.11, se muestra un diagrama de una superficie esférica definida por la distancia paralela al eje z , entre un punto de ésta y una esfera de referencia tangente al origen. Esta distancia se define como la sagita y esta descrita por la siguiente ecuación [11-13]:

$$z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2\rho^2}} + c_1\rho^4 + c_2\rho^6 + c_3\rho^8 + c_4\rho^{10}. \quad (2.18)$$

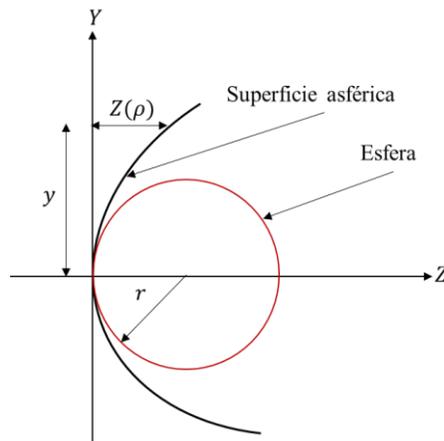


Figura 2.11. Representación de una superficie esférica. Donde la distancia desde el eje a un punto de la superficie es ρ y la sagita $z(\rho)$ es la distancia desde el plano tangente a la superficie [13].

La ecuación (2.18) está escrita en coordenadas cilíndricas, donde $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ es la distancia radial desde el eje óptico. El primer término que involucra la raíz cuadrada describe una sección cónica de revolución donde la curvatura es $c = \frac{1}{r}$, con r como el radio de curvatura y cuya constante cónica es k , la cual determina el tipo de curva a partir de los siguientes valores que tome:

- Si $k < -1$ es un hiperboloide.
- Si $k = 1$ es un paraboloides.
- Si $-1 < k < 0$ es un elipsoide de revolución cerca del eje mayor.
- Si $k = 0$ es una esfera.
- Si $k > 0$ es un elipsoide de revolución cerca del eje menor.

Los parámetros c_1 , c_2 , c_3 y c_4 son los coeficientes de deformación de asfericidad y son términos de expansión adicionales que se utilizan como variables de optimización, dichos termino se expresan como [12]:

$$c_1 = \frac{1}{8}(k+1)c^3, \quad (2.19)$$

$$c_2 = \frac{1}{16}(k+1)^2c^5, \quad (2.20)$$

$$c_3 = \frac{5}{128}(k+1)^3c^7, \quad (2.21)$$

$$c_4 = \frac{7}{256}(k+1)^4c^9. \quad (2.22)$$

2.2. El ojo humano como sistema óptico

El ojo humano se considera un sistema óptico por excelencia y de los más importantes que existen en la naturaleza. Al ojo humano se le han dedicado diversas investigaciones desde hace ya varios siglos. Leonardo Da Vinci, Christopher Scheiner, Descartes y Kepler fueron algunos personajes que realizaron estudios acerca del sistema del ojo humano. Pero no fue hasta el siglo XIX donde se realizaron las contribuciones más importantes a partir de la publicación del libro Handbuch der Physiologische Optik de Helmholtz. Estos trabajos del siglo XIX culminaron con los estudios de Allvar Gullstrand, que le valieron el premio Nobel en Fisiología y Medicina en 1911. Estas investigaciones sobre el ojo humano siguen siendo importantes referencias hasta hoy en día [8].

2.2.1. Estructura del ojo humano

De forma general, el ojo humano se puede considerar como una disposición de doble lente positiva que forma una imagen real en una superficie fotosensible [6]. En la Figura 2.12, se ilustra un esquema anatómico del ojo humano el cual incluye sus principales componentes.

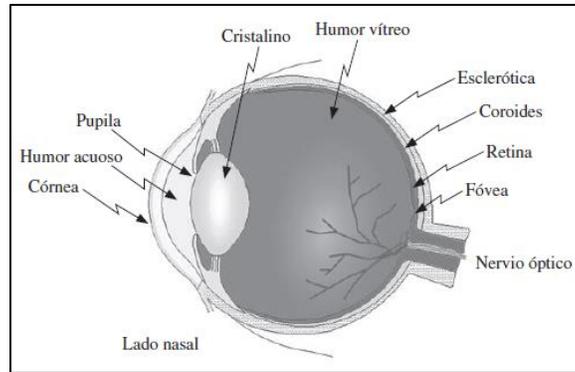


Figura 2.12. Esquema anatómico del ojo humano con sus principales elementos que lo conforman [7].

A continuación, se hace una breve descripción del funcionamiento que tiene cada uno de estos elementos del ojo humano.

Córnea

El ojo tiene una geometría casi esférica, de unos 24 mm de largo y unos 22 mm de ancho, que está contenida dentro de una envoltura dura y flexible llamada esclerótica, que es blanca y opaca. La esclerótica protege la parte interior más gelatinosa y se hace transparente en su parte frontal, formando la córnea. La córnea es el primer componente refractor con el que se encuentra la luz en su camino al interior del ojo. Su radio de curvatura es aproximadamente 7.8 mm en la superficie anterior, -6.5 mm en la superficie posterior y un espesor de 3.05 mm. Tiene un índice de refracción aproximado de 1.37, similar al del agua y contribuye con 43 de las 58 dioptrías que tiene el ojo. Cualquier deformidad en la córnea da lugar al error de refracción o aberración que conocemos con el nombre de astigmatismo. Tras la córnea se encuentra el humor acuoso [7,8].

Iris y pupila

En el humor acuoso se encuentra el iris, el cual les da color a los ojos y hacen la función de un diafragma. Existe una apertura en su centro conocida como pupila, la cual tiene como función controlar la cantidad de luz que llega a la retina, por lo que disminuye su diámetro a medida que se aumenta la intensidad luminosa. La pupila es fácilmente reconocible por ser de color negro. Este color se debe a que los rayos de luz que entran no salen reflejados [7].

Cristalino

Inmediatamente detrás del iris se encuentra el cristalino, es una lente flexible cuya curvatura o poder de convergencia puede ser cambiada a voluntad para enfocar la imagen sobre la retina. A este proceso se le llama acomodación de ojo. El cristalino no es homogéneo, su estructura es similar al de una cebolla transparente y está formada de aproximadamente 22,000 capas muy finas que comienzan en su núcleo. Tiene un índice de refracción variable, que va desde un valor de 1.406 en el núcleo interior hasta aproximadamente 1.386 en la corteza menos densa, representando así un gradiente de índice o

sistema GRIN. El cristalino tiene un poder refractor de aproximadamente 19 dioptrías y la amplitud de la acomodación varía desde 15 dioptrías en los niños y hasta 0.5 dioptrías en ancianos. Sus radios de curvatura son aproximadamente para la superficie anterior de 10.2 mm y para la superficie posterior de -6.0 mm y un espesor de 4.00mm [7,14]. El cristalino se mantiene en posición mediante un ligamento suspensor llamado zónula y tiene unidos a los músculos ciliares, que sirven para flexionarlo y cambiar así su poder de convergencia o bien variar su distancia focal [14]. A edades avanzadas el cristalino comienza a endurecerse, perdiendo la capacidad de acomodación y con ello la capacidad de enfoque va desapareciendo, a esto se le conoce como presbicia [15].

Humor vítreo

Tras pasar el cristalino, la luz atraviesa el humor vítreo, el cual es un gel transparente un poco más denso que el humor acuoso y con índice de refracción un poco mayor al del agua. El humor vítreo rellena el espacio entre el cristalino y la retina, permitiendo al globo ocular mantener su forma [8].

Retina

La retina es una fina capa rojiza y es el elemento del ojo que se encarga de formar las imágenes. El haz luminoso enfocado se absorbe a través de la retina mediante reacciones electroquímicas, transformando así la energía luminosa en estímulos nerviosos que son enviados al cerebro por medio del nervio óptico. La capa más interna de la retina, es decir, la más cercana al vítreo, está compuesta de células y fibras nerviosas, mientras que la parte externa, la más sensible a la luz, está cubierta de células fotorreceptoras llamadas conos y bastones, además de un pigmento protector. Los bastones son monocromáticos y sensibles fundamentalmente a la intensidad de la luz, por lo que son poco sensibles al color. Los conos, son mucho menos numerosos, alrededor de 6.5 millones frente a 120 millones de los bastoncillos, pero son muy sensibles al color. Se excitan fundamentalmente con la luz de alta intensidad [7,8]. La zona de unión entre la retina y el nervio óptico no presenta células fotorreceptoras, por lo que se denomina punto ciego. Cerca del eje óptico se encuentra la fovea. Ésta es una pequeña región circular donde la retina se hace más delgada, ya que, no existen ahí vasos sanguíneos ni fibras nerviosas. El centro de la fovea contiene solamente conos mucho más densamente empacados que en el resto de la retina, por lo que ahí se presenta la mayor resolución [7,8].

2.2.2. Proceso de acomodación

Como se menciona anteriormente, el proceso de acomodación o enfoque del ojo humano es una función que desempeña el cristalino cuando los músculos ciliares modifican su curvatura reduciendo su distancia focal y así la imagen de un objeto cercano se pueda formar en la retina. Por lo general, los músculos ciliares se encuentran relajados y en este estado se dice que la luz de un objeto ubicado en el infinito se enfocará en la retina. Cuando el objeto se acerca más al ojo, los músculos ciliares se contraen, liberando la tensión externa sobre la periferia del cristalino, donde este se deforma debido a su propiedad elástica.

De esta manera la distancia focal, f , disminuye manteniéndose fija la distancia z_2 de la ecuación (2.6), de manera que la luz pueda seguir enfocándose en la retina. Los músculos ciliares se contraen con más tensión conforme el objeto se va acercando, variando cada vez más los radios de curvatura del cristalino. Este proceso de acomodación se muestra en la Figura 2.13 [7,8].

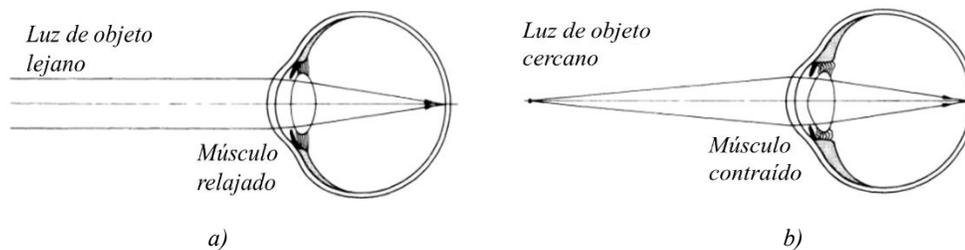


Figura 2.13. Acomodación del ojo donde a) los rayos de un objeto ubicado en el infinito proyectan en la retina del ojo en un estado relajado y b) los rayos de un objeto cercano se proyectan en la retina gracias a los músculos ciliares contraídos sobre el cristalino [7].

2.3. Lentes hechas de polímero

Un polímero es un compuesto conformado por macromoléculas, generalmente orgánicas, que se forman mediante enlaces covalentes uniendo monómeros o unidades simples repetitivas y se caracterizan por tener una masa molar grande. Los polímeros son compuestos muy importantes, ya que algunos cumplen funciones vitales en los seres vivos. Por ejemplo, las proteínas y el ADN. Según su origen, los polímeros se clasifican en: naturales (como el almidón o la celulosa), semisintéticos (como la nitrocelulosa) y artificiales (como el nylon o el policarbonato). El proceso que realizan los monómeros para formar una cadena y construir un polímero se le conoce como mecanismo de polimerización. Además, existe una clasificación de polímeros llamados elastómeros, los cuales forman un material que tiene un módulo de elasticidad muy bajo y alta extensibilidad. Se deforman mucho al someterlo a un cierto esfuerzo, pero puede recuperar su forma inicial al eliminar dicho esfuerzo. Existen componentes ópticos que están hechos con polímeros en forma de membranas que se implementan en lentes líquidas y otros que implementan un cuerpo sólido como lente. El uso de un polímero particular basado en silicón se ha hecho más frecuente debido a sus aplicaciones potenciales en diversas áreas, este es el polidimetilsiloxano Sylgard 184 (PDMS) [1].

2.3.1. Polidimetilsiloxano (PDMS)

Para preparar un cuerpo elastómero, se utiliza un proceso de curación por calor sobre el PDMS SYLGARD 184 (producto de Dow-Corning). Se suministra un kit de dos partes, las cuales son el prepolímero (base) y el agente de curado. Estos se mezclan generalmente en una proporción en peso de 10:1. El prepolímero es un monómero con una terminación de vinilo y el agente de curado es un monómero terminado en metilo con unidades de hidruro de silicio $OSi - H - CH_3$. Estas dos resinas conducen a un proceso de polimerización reticulada. Para poder llevar a cabo esta polimerización, generalmente se usa el método de curado térmico, el cual se basa en someter la mezcla a una temperatura mayor a la del ambiente. En el proceso de curado térmico los monómeros establecen enlaces de $Si - CH_2 - CH_2$, mediante las reacciones entre los grupos vinilo del monómero base y los hidruros de silicio del monómero prepolímero (ver Figura 2.11) [1]. El material de PDMS se obtiene al terminar dicho proceso, donde la fórmula química es la siguiente [16]:



donde n es el número de veces que se repite el monómero $[Si(CH_3)_2O]$. Este valor puede influir en el estado del PDMS. Si n es bajo, entonces el PDMS será líquido y si n es alto, será sólido [16].

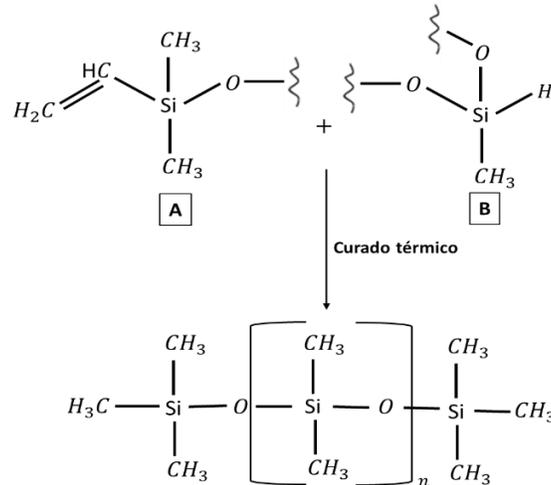


Figura 2.14. Proceso de polimerización para obtener el polidimetilsiloxano (PDMS) mediante el curado térmico, donde las partes A y B corresponden al prepolímero (base) y el reticulante (agente de curado) [1,16].

En la Tabla 2.1, se muestra un codificado para el proceso de polimerización, en el cual se relaciona la proporción de la mezcla (base: agente de curado), tiempo de curado y temperatura de curado [17].

Tabla 2.1. Código para la fabricación del PDMS que relaciona sus parámetros de síntesis [17].

Código	Razón (base-agente de curado)	Tiempo de curado/Temperatura (°C)
M1	10:1	30 min/100°C
		18min/150°C
		15min/200°C
		10min/240°C
M2	10:1.25	30 min/100°C
		18min/150°C
		15min/200°C
		10min/240°C
M3	10:1.5	30 min/100°C
		18min/150°C
		15min/200°C
		10min/240°C
M4	10:1.75	30 min/100°C
		18min/150°C
		15min/200°C
		10min/240°C
M5	10:2	30 min/100°C
		18min/150°C
		15min/200°C
		10min/240°C

2.3.2. Propiedades del PDMS

Una vez sintetizado, el PDMS adquiere propiedades ópticas y mecánicas de interés, y algunas de estas propiedades depende de la variación de sus parámetros de síntesis (ver Tabla 2.1). El PDMS presenta alta transparencia, transmitancia de hasta el 95% en la región visible del espectro, homogéneo, lineal, isotrópico y con un índice de refracción en un rango de 1.3997 a 1.445 [16,17,18].

En la gráfica de la figura 2.15, se muestran las curvas de las variaciones del índice de refracción de cada razón de concentración base-agente de curado (Tabla 2.1), con respecto a la temperatura de curado. En dicha gráfica, el valor mínimo del índice de refracción es de 1.408 y corresponde al código M1, donde la proporción es de 10:1 a una temperatura de 100°C durante 30 minutos, mientras que el valor máximo alcanzado es de 1.445 y corresponde al código M5, con una proporción de 10:2 a una temperatura de 240°C durante 10 minutos [17].

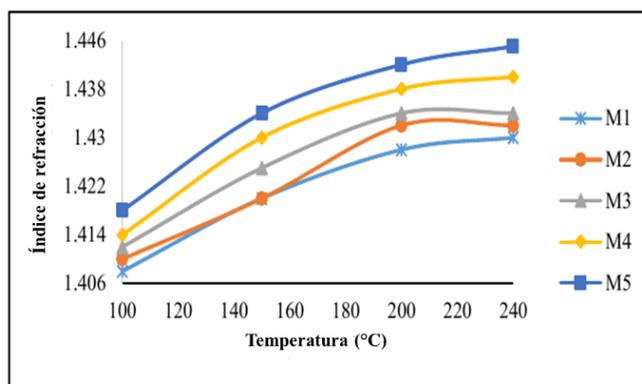


Figura 2.15. Variación del índice de refracción del PDMS con respecto a la temperatura de curado [17].

El PDMS tiene una densidad de 0.982 g/ml aproximadamente y un coeficiente de Poisson de 0.46, adopta la forma del contenedor y es reversible a su forma original cuando actúa algún tipo de esfuerzo [18]. Al igual que el índice de refracción, es posible modificar las propiedades elásticas de este material variando la razón de concentración y la temperatura de curado. En las figuras 2.16 y 2.17 se muestran las gráficas de las variaciones del módulo de compresión y el módulo de tensión del PDMS cuando se modifican los parámetros de síntesis con respecto a la temperatura de curado.

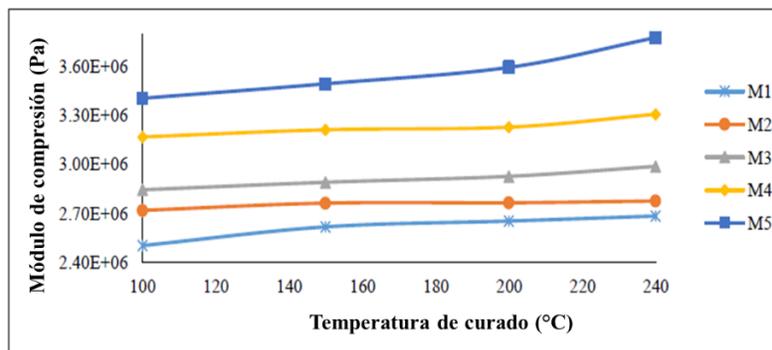


Figura 2.16. Módulo de compresión del PDMS para cada razón de concentración con respecto a la temperatura de curado [17].

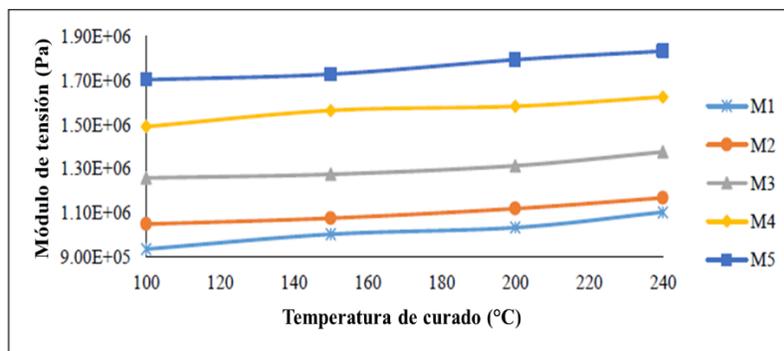


Figura 2.17. Módulo de tensión del PDMS para cada razón de concentración con respecto a la temperatura de curado [17].

Para el módulo de compresión, el valor mínimo observado es de 2.499 MPa, correspondiente al código M1 (razón 10:1 a 100 °C durante 30 min), y el valor máximo observado es de 3.776 MPa, correspondiente al código M5 (razón 10:2 a 240 °C durante 10 min). Por otro lado, el valor mínimo observado del módulo de tensión es de 0.936 MPa, el cual corresponde al código M1 (razón 10:1 a 100°C durante 30 min), mientras que el valor máximo observado es de 1.831 MPa, correspondiente al código M5 (razón 10:2 a 240 °C durante 10 min) [17].

El Polidimetilsiloxano es no tóxico y se ha convertido en un material comúnmente utilizado para la fabricación de materiales que van desde la industria cosmética hasta el campo médico, y desde la industria de fabricación y conservación de alimentos, hasta la producción de dispositivos microfluídicos. Las aplicaciones son prácticamente ilimitadas [16,18].

2.4. Lentes sólidas de PDMS

Debido a los resultados obtenidos en los cuales muestran las propiedades altamente elásticas y un excelente rendimiento óptico del PDMS, se ha propuesto para fabricar lentes de enfoque sintonizable sin utilizar ningún líquido, a este tipo de lentes se les conoce como lentes sólidas de PDMS o lentes sólidas elásticas (SEL por sus siglas en inglés) [16].

Existen muchos procesos de fabricación de lentes sólidas elásticas, una de ellas es descrita por Hongwen Ren y Shin-tson W. en su libro “Introduction to Adaptive Lenses” (2012). En este proceso una película de goma elastómera de estireno-etileno (SEBS) es introducida entre un molde convexo y un molde cóncavo. Con los dos moldes, se puede crear una membrana de lente con forma de menisco suave y deformable mediante el moldeo por compresión de la membrana SEBS. Cuando se quitan los dos moldes, se obtiene una membrana SEBS curva (ver Figura 2.18a-c). Luego, el borde de la membrana curva se adhiere con un espaciador circular (ver Figura 2.18d). Después de eso, la membrana curva se combina con una lente de PMMA para formar una cámara (ver Figura 2.18e). Luego, la cámara se llena con material PDMS (ver Figura 2.18f). La membrana SEBS se forma mediante un tratamiento térmico con presión [1].

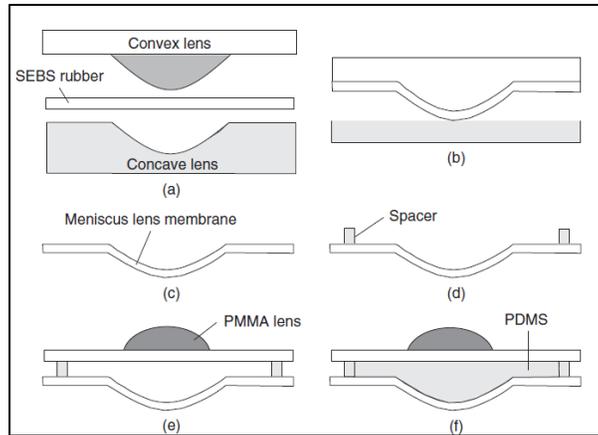


Figura 2.18. Proceso de fabricación de una lente sólida de PDMS [1].

2.5. Antecedentes

La aplicación de los polímeros elastómeros en lentes sintonizables ha sido tema de estudio en las últimas décadas, pues las lentes hechas de este material son capaces de cambiar su distancia focal de forma dinámica, mediante la aplicación de estímulos sin una mecánica tan compleja. Las lentes ópticas sintonizables, se utilizan para reducir el tamaño total de las configuraciones ópticas como en el sistema de cámaras pequeñas para teléfonos móviles, mini proyectores, microscopios, etc. Particularmente, la implementación de las lentes sintonizables en sistemas ópticos que puedan imitar funciones biológicas realizadas por el ojo humano, han sido las de mayor interés y que han contribuido más al entendimiento del comportamiento de este tipo de lentes.

Se han propuesto varios modelos de dispositivos bioinspirados de este tipo de sistemas ópticos basados en la naturaleza del cristalino del ojo humano, en donde la mayoría ha utilizado a los polímeros elastómeros como material principal para la fabricación de las lentes, pero los mecanismos para la aplicación de estímulos que deforman a la lente son completamente diferentes. Por ejemplo, un modelo propuesto por Federico C. et al. (2011), fue la de una lente sintonizable bioinspirada con elastómeros electroactivos que asemejan a los músculos ciliares. Esta lente elástica, se llena de líquido y le es integrado un actuador de elastómero anular que hace la función de un músculo artificial. Tras la activación eléctrica, el músculo artificial deforma la lente variando la distancia focal. Se mostró en esa publicación que se pueden obtener lentes combinando una clase emergente de material y tecnología de músculos artificiales. Este estudio, se basó en la aplicación de estímulos de tipo eléctrico. El prototipo del modelo y los resultados obtenidos con respecto a la variación del diámetro de la lente al aplicar un determinado voltaje se muestran en la Figura 2.19 y la Figura 2.20, respectivamente [3].

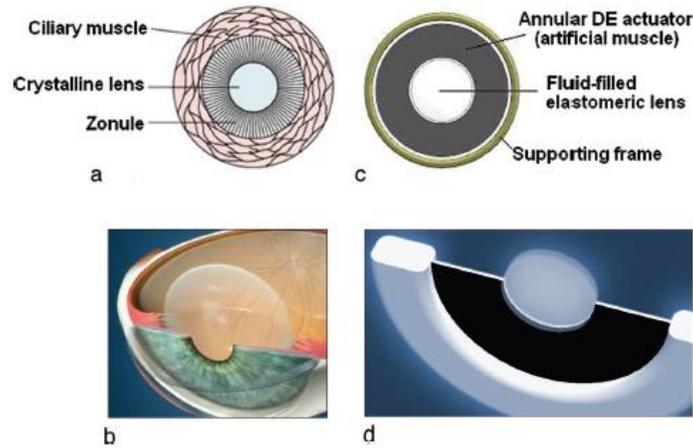


Figura 2.19. Modelo propuesto por Federico C. et al. (2011), en el cual hacen la comparación morfológica entre el cristalino humano y el cristalino bioinspirado [3].

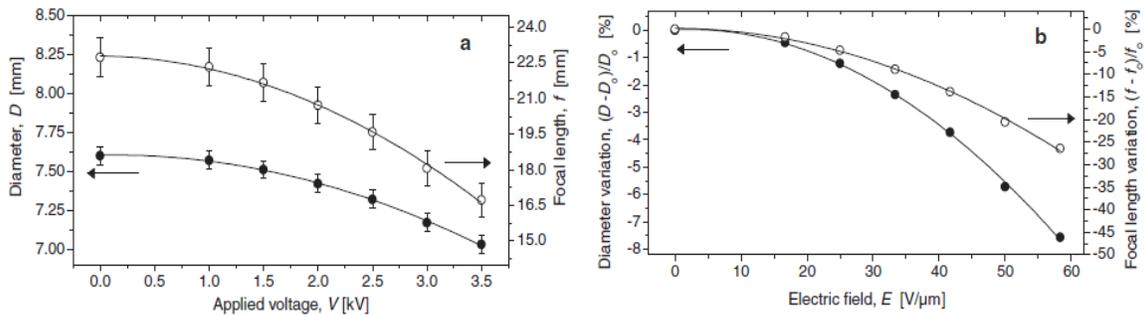


Figura 2.20. Rendimiento de la lente sintonizable bioinspirada obtenida por Federico C. et al. (2011) en términos de variaciones inducidas eléctricamente de su diámetro (•) y distancia focal (°) [3].

Otro ejemplo de estos dispositivos bioinspirados, es el que fue publicado por Dan L. et al. (2014), el cual consistió en el desarrollo de un sistema biomimético con lentes hechas a base de polímeros. El sistema estaba integrado principalmente por una lente de córnea biónica, un motor de bobina móvil, un anillo de compresión, una lente cristalina biónica, un sustrato y un sensor CCD.

La dinámica de este modelo se llevó a cabo mediante el control de la corriente de la bobina del motor, a través del cual se cambia el movimiento del anillo de compresión para poder alterar el radio de curvatura de la lente cristalina biónica, ajustando así la distancia focal de todo el sistema [4]. La estructura de este sistema óptico propuesto y los resultados experimentales obtenidos se muestran en la Figura 2.21.

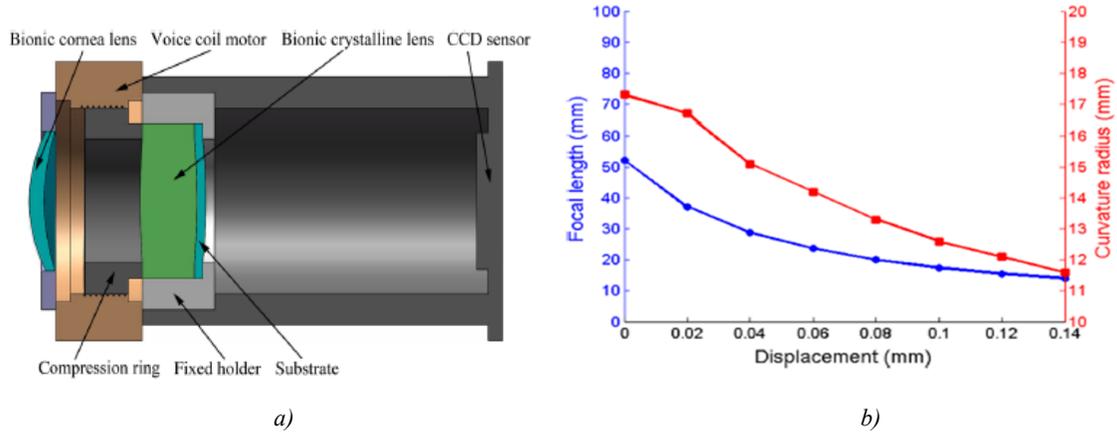


Figura 2.21. a) Diagrama esquemático del sistema óptico biomimético propuesto y b) las relaciones encontradas por Dan L. et al. (2014) entre el radio de curvatura de la superficie frontal de la lente cristalina biónica, la distancia focal posterior observada de todo el sistema óptico y la carga de desplazamiento impuesta [10].

Otros resultados relacionados con los dispositivos bioinspirados, fueron los estudios de rendimiento óptico de una lente sintonizable de PDMS con tensión aplicada controlada automáticamente, que se obtuvieron por Ángel S. et al. (2016) en el Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Previamente se diseñó y fabricó un sistema de montaje mecánico especial, para introducir tensión y compresión ejercida sobre una lente sólida elástica (SEL por sus siglas en inglés) de PDMS, con el fin de cambiar los radios de curvatura para ambas superficies que la componen. Las fuerzas de tensión y compresión se generaron a partir de una rueda dentada que se conecta a través de abrazaderas por medio de un juego de bielas-manivelas que, convierte el par de un actuador en tensión y compresión lineal. Este montaje mecánico se puede ver a detalle en la Figura 2.22 [5].

Como resultados importantes en este trabajo, se obtuvieron las caracterizaciones tanto mecánicas como ópticas del SEL. En la Figura 2.23, se muestran la variación de la distancia focal efectiva con respecto a la fuerza de tensión y compresión que se le aplica [5].

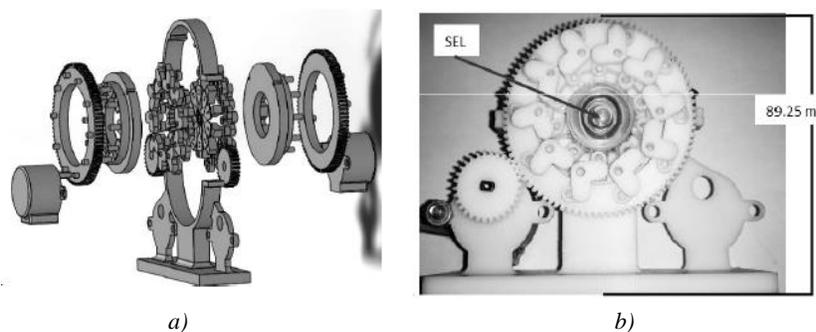


Figura 2.22. Diagramas del montaje mecánico que ejerce tensión y compresión sobre una lente sólida elástica (SEL) de PDMS diseñada y construida en el Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, donde se muestra a) vista isométrica del diseño del sistema mecánico y b) vista frontal del sistema de montaje mecánico fabricado con actuador [5].

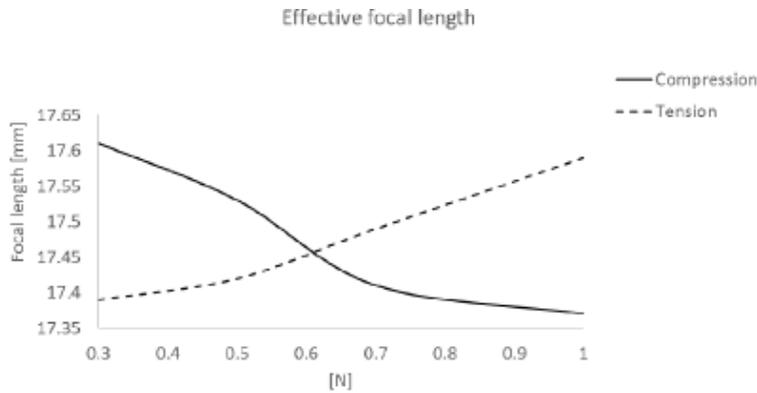


Figura 2.23. Variación de la distancia focal efectiva con respecto a la fuerza aplicada de compresión/tensión [5].

2.6. Teoría de aberraciones

La óptica geométrica que considera sólo los rayos paraxiales recibe el nombre de óptica de primer orden o Gaussiana. Se caracteriza por considerar que los ángulos θ de un rayo de luz que pasan a través de un sistema refractivo son muy pequeños, de manera que se puede hacer la aproximación: $\text{sen}\theta \approx \theta$.

Si ahora se remplazan los senos de los ángulos por los dos primeros términos de su expansión en serie de Taylor, tal como se expresa en la ecuación (2.24), se obtiene la llamada teoría de tercer orden de la óptica geométrica, las cuales describen efectos secundarios que no prevé la teoría de primer orden.

$$\text{sen}\theta \approx \theta - \frac{\theta^3}{3!}. \quad (2.24)$$

En esta teoría se estudian los defectos ópticos llamados aberraciones, los cuales hacen que la calidad de las imágenes no sea como la deseada [8,18].

2.6.1. Tipos de aberraciones

Las aberraciones se clasifican principalmente en dos tipos: las aberraciones cromáticas y las monocromáticas. Las aberraciones cromáticas, se producen cuando en un sistema óptico formado por superficies refractoras, existen distintas distancias focales para cada color. Estas variaciones estarán relacionadas con el cambio en el índice de refracción que depende de las longitudes de onda de la luz. Dichas aberraciones se dividen a su vez en aberración cromática axial (cambio en la posición) y aberración cromática lateral (cambio en el tamaño). En este tipo de aberraciones, la teoría de primer orden puede tener una buena predicción [7,8].

Por otro lado, las aberraciones monocromáticas se observan cuando la luz es de una sola longitud de onda y se presenta debido a la geometría de los componentes ópticos. Pueden ser calculadas de forma aproximada por la teoría de tercer orden. A estas aberraciones también se les conoce como aberraciones de Seidel y son: esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo y distorsión [7]. A continuación, se describen algunos tipos de estas aberraciones monocromáticas.

Aberración esférica

Si se considera una onda de luz que incide sobre una lente esférica, tal como se muestra en la Figura 2.24, los rayos que están próximos al eje óptico (rayos paraxiales), se concentran en un punto

focal F_i que es la posición de la imagen paraxial. Por otro lado, los rayos que inciden a alturas más alejadas del eje óptico se enfocan o se concentran en puntos más cercanos a la lente. Esta variación de la posición del enfoque con la abertura de la lente se denomina aberración esférica. Así la posición del foco depende de la altura del rayo sobre la superficie refractora [7,8].

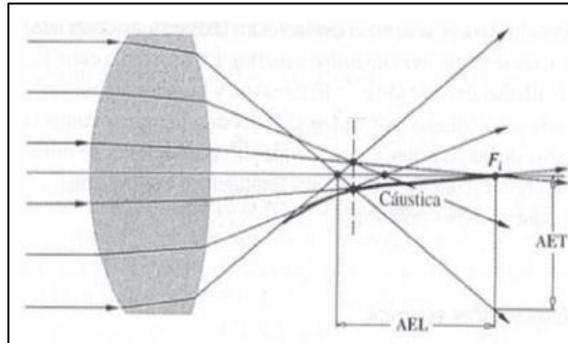


Figura 2.24. Aberración esférica de una lente biconvexa [7].

La distancia comprendida entre la intersección de un rayo con el eje y el foco F_i , es conocida como aberración esférica longitudinal o AEL. Si se coloca una pantalla en el punto F_i , la altura a la que un rayo cruza esa pantalla medida desde el eje óptico se le denomina aberración esférica transversal o de forma abreviada AET. La envolvente de los rayos refractados forma una curva característica llamada cáustica [7,8].

Aberración de coma

En un sistema óptico, la coma se define como una variación de aumento o amplificación con respecto a la abertura. Esta aberración ocurre cuando los rayos que se transmiten a través de una lente a diferentes porciones de abertura cruzan el plano de la imagen a diferentes alturas del eje óptico [13]. La aberración de coma se llama así porque la imagen que se forma en esta aberración tiene forma de coma ortográfica o bien de cometa. La formación de una imagen comática de un punto se ilustra en la Figura 2.25 [7,8].

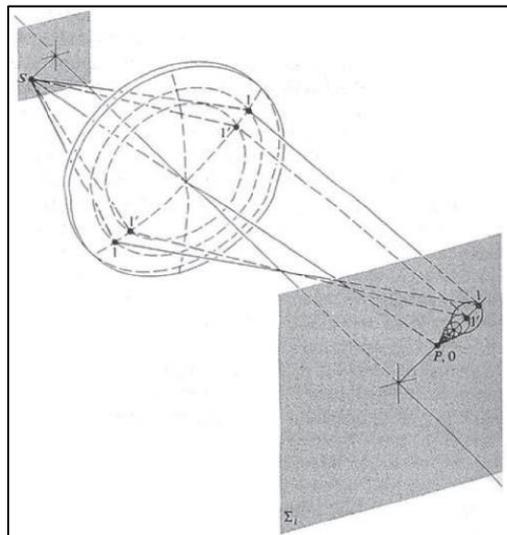


Figura 2.25. Imagen comática de una fuente puntual [6].

Cualquier rayo que llegue a la pupila de entrada sobre su diámetro vertical es un rayo tangencial y cualquier rayo que llegue sobre su diámetro horizontal es un rayo sagital. Se define entonces a la coma sagital como la distancia del foco paraxial al foco marginal sagital, mientras que la coma tangencial es la distancia entre el foco paraxial y el foco marginal tangencial [7,8].

Aberración de astigmatismo

Esta aberración ocurre cuando los rayos tangenciales y sagitales enfocan en distintos puntos en el plano de la imagen cuando un haz luminoso es refractado a través de un sistema óptico. El astigmatismo, es entonces, la separación entre los puntos de convergencia de los rayos tangenciales y el punto de convergencia de los rayos sagitales [8]. Esto se ilustra con más claridad en la Figura 2.26.

La superficie donde los rayos sagitales y tangenciales están enfocados se llaman superficies sagitales y tangenciales respectivamente. Así, el astigmatismo se puede determinar por la distancia de separación entre la superficie sagital y tangencial.

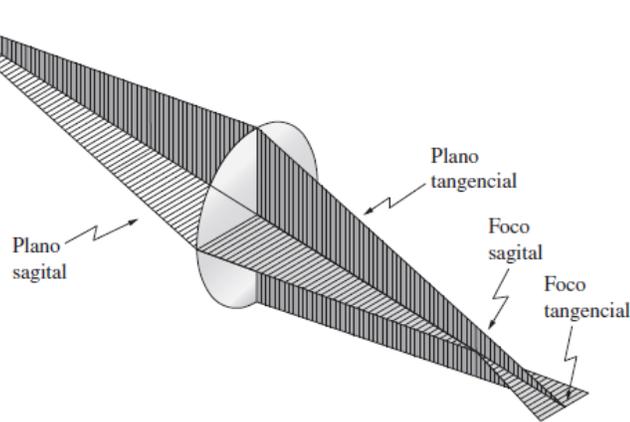


Figura 2.26. Posición de los focos sagitales y tangenciales cuando una imagen sufre aberración de astigmatismo [8].

Por ejemplo, si se utiliza una rueda como objeto para formar una imagen a través de una lente con astigmatismo, se obtiene como imagen la Figura 2.27b) en la superficie tangencial y la imagen de la Figura 2.27c) en la superficie sagital. En la Figura 27d) se presenta una imagen óptima que se encuentra en una superficie intermedia entre la sagital y la tangencial [8].

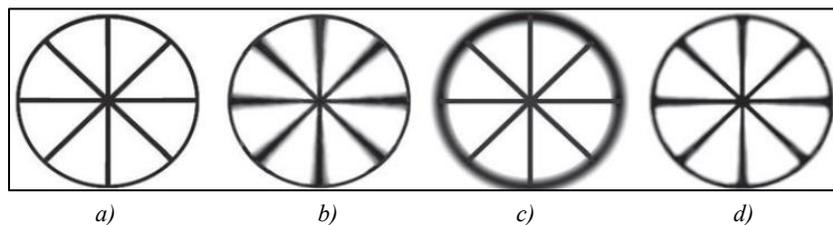


Figura 2.27. Imagen de una rueda donde: a) es el objeto ideal, b) imagen obtenida en la superficie tangencial, c) imagen obtenida en la superficie sagital y d) la imagen óptima [8].

Aberración de distorsión

Aunque se tenga un sistema libre de las aberraciones mencionadas hasta aquí, podrá existir un tipo más de aberración llamada distorsión. Esta aberración ocurre debido a una amplificación lateral no constante en una lente o en un sistema óptico formado por lentes. La amplificación por tanto no es la misma para cualquier punto de la imagen. Si la altura de una imagen aumenta con la amplificación, la distorsión será positiva o de cojín. Por el contrario, si la altura disminuye con la amplificación la distorsión será negativa o de barril [7,8]. Si, por ejemplo, el objeto es un cuadro y la imagen resultante se curva hacia dentro en los bordes la distorsión será positiva. Si la imagen se curva hacia afuera por los bordes la distorsión será negativa, tal como se ilustra en la Figura 2.28.

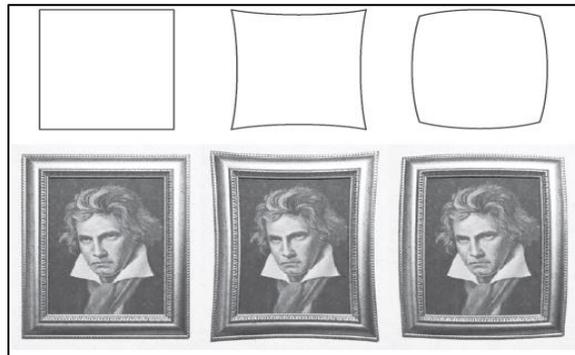


Figura 2.28. Imagen de un objeto cuadrado sin distorsión (izquierda), con distorsión positiva (en medio) y con distorsión negativa (derecha) [8].

Aberración de foco

La aberración de foco o de desenfoque es la aberración más simple y tiene su origen en la incapacidad que tiene un sistema óptico de enfocar las imágenes en el plano de imagen gaussiana [19].

Si se tiene un sistema óptico capaz de formar una imagen ideal, ocurre una aberración de desenfoque si el punto imagen producido no se localiza en el plano imagen gaussiana, si no que está ubicado en un plano anterior o posterior a este. Considerando la Figura 2.29, el frente de onda de referencia se enfoca en el punto F_r con un radio R . El frente de onda real producido es una esfera de radio R' y se enfoca en el punto F' . Se dice entonces que la imagen está desenfocada y su longitud axial es igual a $\Delta R = R' - R$. En consecuencia, en el plano de imagen gaussiana, se observará una mancha circular cuyo diámetro es proporcional a la longitud de desenfoque. En sistemas ópticos, como el del ojo humano, el desenfoque es considerado como un defecto visual. En este contexto, se utiliza para describir la miopía cuando $\Delta R < 0$, es decir, cuando el punto focal de la imagen se encuentra antes de la retina, o bien la hipermetropía si $\Delta R > 0$, cuando el punto focal de la imagen se encuentra después de la retina. La acomodación del cristalino suele corregir este tipo de aberraciones en el ojo humano; sin embargo, estas correcciones se ven reducidas con la edad dando origen a la presbicia [15,19].

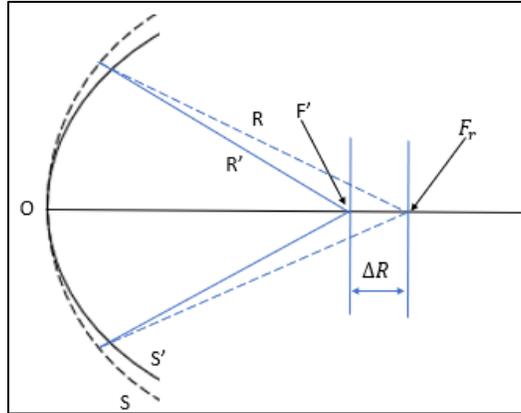


Figura 2.29. Frente de onda esférico desenfocado de radio R' y frente de onda de referencia de radio R .

2.6.2. Aberración en los frentes de onda

En la óptica ondulatoria se define la amplitud compleja de una onda monocromática que viaja en el espacio libre con una longitud de onda λ_0 de la siguiente forma:

$$U(\vec{r}) = A(\vec{r}) \exp[-jk_0 S(\vec{r})], \quad (2.25)$$

donde $A(\vec{r})$ es la magnitud de la amplitud compleja, $-k_0 S(\vec{r})$ es la fase y $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ es conocido como número de onda. Los frentes de onda son entonces las superficies $S(\vec{r}) = \text{constante}$ y la dirección de la normal del frente de onda es el gradiente $\nabla S(\vec{r})$, el cual indica su dirección de propagación [5]. Los rayos de luz que recorren distintas trayectorias en un cierto tiempo con una misma fase son perpendiculares al frente de onda, tal como se muestra en la Figura 2.30.

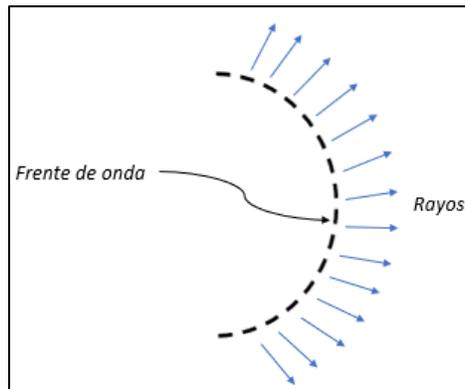


Figura 2.30. Rayos normales al frente de onda.

En un sistema óptico con aberraciones, el frente de onda tiene deformaciones que lo desvían de su forma esférica. Estas aberraciones se miden con respecto a un frente de onda de referencia con su centro de curvatura en el punto de la imagen gaussiana, la cual se conoce como esfera de referencia gaussiana [19,20,21].

En la Figura 2.31, R corresponde al radio de la esfera de referencia, R' a la distancia de un rayo arbitrario desde un punto Q del frente de onda a un punto P_1 en el plano de la imagen. El rayo arbitrario será normal al frente de onda real, pero no al frente de onda de referencia, por lo que a la

distancia $\delta = \overline{P_0P_1}$ se le conoce como aberración del rayo. A la aberración de la onda se define como la diferencia de camino óptico entre la esfera de referencia y el frente de onda real [20,21,22].

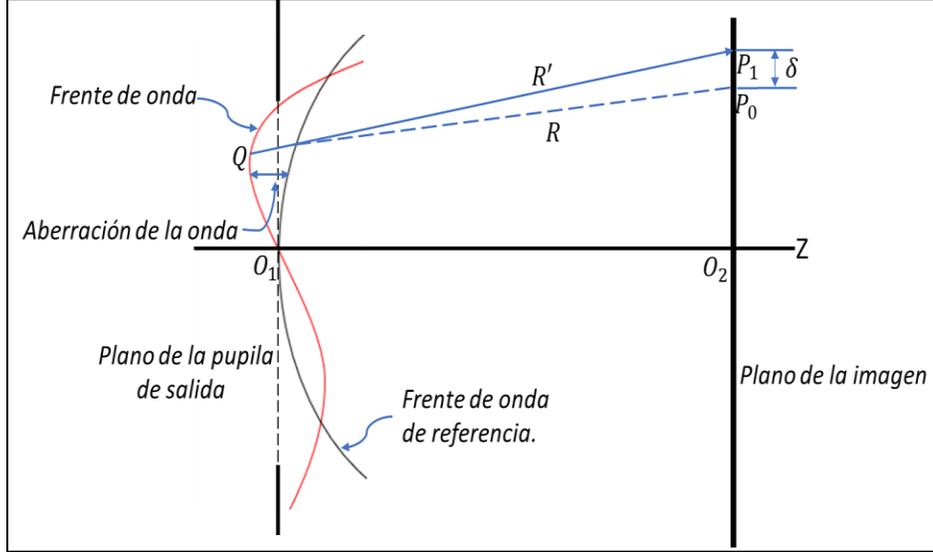


Figura 2.31. Aberración del frente de onda [20].

2.6.3. Polinomios de Zernike

Las deformaciones del frente de onda real se pueden representar mediante algunos tipos de funciones analíticas. Las funciones más comúnmente utilizadas para su representación analítica son los polinomios de Zernike, los cuales no se limitan solo al caso de un frente de onda con simetría sobre el eje y. Estos polinomios fueron mostrados por primera vez por Zernike en 1934, se describen en coordenadas polares y son ortogonales en el círculo unitario. Se presentan con dos índices n y m . El índice n es el grado del polinomio radial y m es el índice de dependencia angular. Por tanto, puede definirse como el producto de tres términos, un término de normalización N_n^m , un término radial $R_n^{|m|}$ y un meridional $M(m\theta)$, dado por la siguiente ecuación [23]:

$$Z_n^m = N_n^m R_n^{|m|}(\rho)M(m\theta), \quad (2.26)$$

donde:

$$N_n^m = \sqrt{(2 - \delta_{0,m})(n+1)}, \quad \text{con } \delta_{0,m} = 1 \text{ si } m = 0 \text{ o } \delta_{0,m} = 0 \text{ si } m \neq 0, \quad (2.27)$$

$$R_n^{|m|}(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{1}{2}(n-|m|)} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left[\frac{(n+|m|)}{2} - s \right]! \left[\frac{(n-|m|)}{2} - s \right]!} \rho^{n-2s}, \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} M(m\theta) &= \cos(m\theta) \quad \text{si } m \geq 0, \\ M(m\theta) &= \text{sen}(|m|\theta) \quad \text{si } m < 0. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Además, n y m deben cumplir con las siguientes condiciones: $0 \leq m \leq n$, ambos deben ser par o impar y $n - m$ siempre debe ser par si $m \neq 0$. Los polinomios de Zernike pueden ser simplificados con la notación $Z_n^m = Z_j$, donde:

$$j = \frac{n(n+2) + m}{2}, \quad (2.30)$$

misma que denotará el orden de los polinomios.

La función de aberración del frente de onda $W(\rho, \theta)$, puede representarse mediante una combinación lineal de estos polinomios de Zernike mediante la siguiente expansión en series:

$$W(\rho, \theta) = \sum_{nm} c_n^m Z_n^m, \quad (2.31)$$

donde c_n^m son los coeficientes de Zernike que multiplican a cada polinomio asociado y son usados para dar el valor de la mejor estimación del frente de onda, $\rho \in [0,1]$ y $\theta \in [0,2\pi]$. El parámetro ρ es un número adimensional y su valor a cualquier distancia radial r desde el centro de abertura esta dado como $\rho = \frac{r}{a}$, con a como el valor del radio de abertura del sistema óptico [21,23,24].

Los primeros 15 polinomios de Zernike se muestran en la Tabla 2.2 proporcionado por ANSI [23].

Tabla 2.2. Algunos polinomios de Zernike normalizados [23].

n	m	Polinomios de Zernike	Aberración
0	0	1	Pistón
1	-1	$2\rho \text{sen}\theta$	Distorsión vertical (Tilt Y)
1	1	$\sqrt{8}\rho^3 \text{sen}3\theta$	Distorsión horizontal (Tilt X)
2	-2	$\sqrt{6}\rho^2 \text{sen}2\theta$	Astigmatismo con eje $\pm 45^\circ$ (Ast45)
2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Desenfoque (Def)
2	2	$\sqrt{6}\rho^2 \cos 2\theta$	Astigmatismo con eje $0^\circ/90^\circ$ (Ast0)
3	-3	$\sqrt{8}\rho^3 \text{sen}3\theta$	Trefoil vertical (TreY)
3	-1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\text{sen}\theta$	Coma en eje x (ComX)
3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos\theta$	Coma en eje y (ComY)
3	3	$\sqrt{8}\rho^3 \cos 3\theta$	Trefoil horizontal (TreX)
4	-4	$\sqrt{10} 4\rho^4 \text{sen} 4\theta$	Tetrafoil vertical (Tet Y)
4	-2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\text{sen}2\theta$	Astigmatismo secundario en eje y (SAs Y)
4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Aberración esférica de tercer orden (SAb3)
4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos 2\theta$	Astigmatismo secundario en eje x (SAst X)
4	4	$\sqrt{10}\rho^4 \cos 4\theta$	Tetrafoil horizontal (Tet X)

Cada polinomio que representa las aberraciones primarias se obtiene sumando una cantidad adecuada de los términos de pistón, inclinación y desenfoque. De tal manera que el valor de la varianza del frente de onda aberrado para cada polinomio de Zernike se minimice [23].

Los mapas de colores y las gráficas tridimensionales de los quince primeros polinomios de Zernike son mostrados en la Figura 2.32. El mapa de frente de onda es un gráfico codificado y se representa por colores que muestran el relativo retardo o aceleración de las diferencias de fase del respectivo frente de onda. El color verde representa un nivel cero en cuanto al retardo o adelanto, los colores fríos como el azul muestran el frente de onda lento, retardado o retrasado, en tanto los colores calientes como los amarillos, naranjas y rojos, representan un adelanto del frente de onda con respecto al plano de referencia [23,24,25].

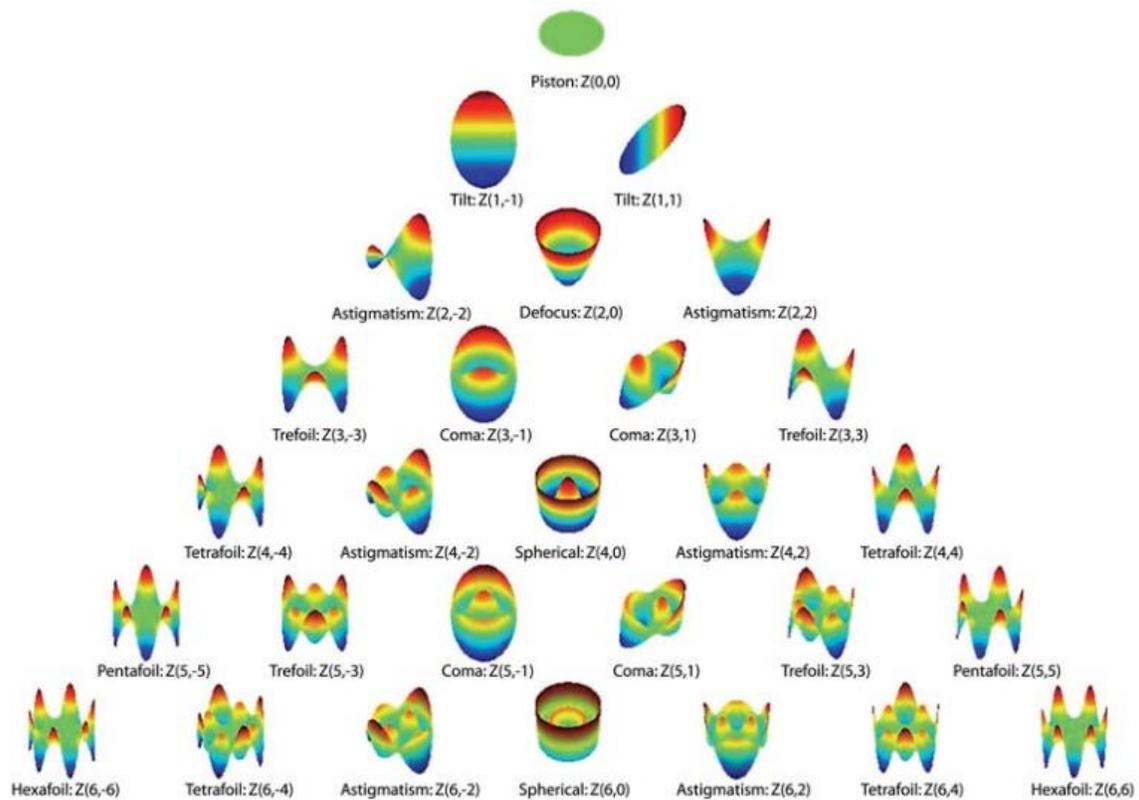


Figura 2.32. Mapa de colores y gráfica tridimensional de los polinomios de Zernike hasta el sexto orden [24].

2.7. Desempeño y caracterización óptica

En los sistemas ópticos compuestos por lentes, espejos o una combinación de ambas, siempre se encuentran presentes aberraciones las cuales hacen que la imagen de un objeto sea modificada o distorsionada. Como se mencionó anteriormente, estas aberraciones pueden representarse mediante una función, la cual puede estar expandida en términos de los polinomios de Zernike. Por esta razón, es necesario conocer el desempeño de cualquier sistema óptico y para ello se emplean métricas que nos permitan medir y comparar el frente de onda ideal con el frente de onda real.

Para poder evaluar el desempeño óptico de una lente, se realizan diferentes métodos de caracterización, entre ellos un análisis interferométrico utilizando un interferómetro Mach-Zehnder o bien, la medición de los frentes de onda utilizando un sensor de frente de onda como el de Shack-Hartmann.

Sensor Shack-Hartmann

Un sensor Shack-Hartmann consta de un arreglo matricial de micro lentes con la misma distancia focal y una cámara CMOS, el cual es colocado en el plano focal de los micro lentes, tal como se muestra en la Figura 2.33 [26,27].

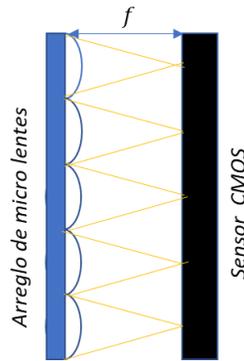


Figura 2.33. Vista lateral del arreglo de micro lentes en una matriz correspondiente a un sensor de tipo Shack-Hartmann.

Si un frente de onda plano y uniforme incide sobre el sensor de Shack-Hartmann, cada micro lente forma un punto a lo largo del eje óptico de la lente, los cuales sirven como puntos de referencia para detectar posteriormente las distorsiones que sufrirá el frente de onda (ver Figura 2.31). Ahora si un frente de onda distorsionado llega al sensor, hará que algunas de las micro lentes enfoquen en puntos desplazados del eje óptico (ver Figura 2.34), de manera que las distancias desplazadas de cada punto contendrán la información de la deformación del frente de onda [27,28].

La pendiente del frente de onda W mínima detectada se expresa como función de los desplazamientos de los puntos detectados δ_y y δ_x respectivamente, así como por la distancia entre la micro lente y el detector, el cual suele ser igual a la longitud focal del micro lente f , tal como se describe en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\delta_y}{f} \quad ; \quad \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\delta_x}{f}. \quad (2.32)$$

Por lo tanto, una vez conocidos los desplazamientos de los puntos con respecto a las posiciones de referencia, es posible calcular la función de aberración del frente de onda [27,28].

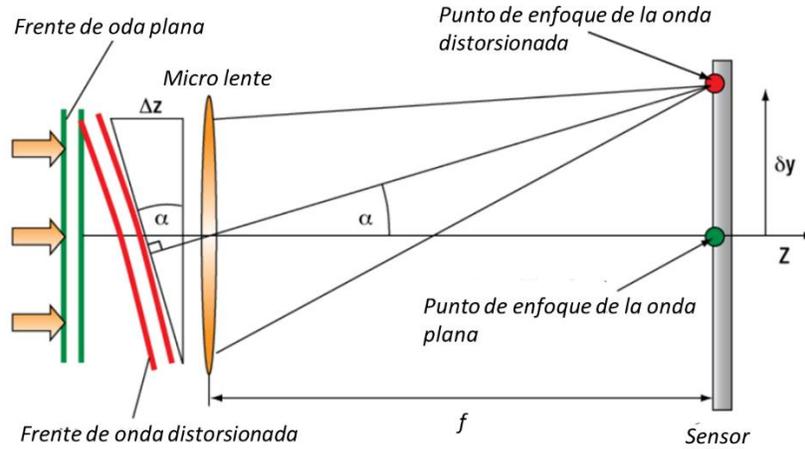


Figura 2.34. Diagrama de los puntos de enfoque de una onda plana y una onda distorsionada para una de las micro lentes obtenida del manual para usuario de un sensor de frente de onda (Shack-Hartmann) de la marca THORLABS® [29].

Se debe tener en cuenta que el desplazamiento de punto mínimo detectable depende del tamaño de píxel del detector, la precisión del algoritmo del centroide y la relación señal/ruido del sensor [28].

2.8. Mecanismo de motores a pasos y engranes

2.8.1. Sistema de engranajes

Los engranes son ruedas constituidas en los bordes por elementos llamados dientes. El objetivo de los engranes o ruedas dentadas es transmitir una rotación entre dos ejes con relación de velocidades angulares constante. Se habla entonces de un par de engranajes para referirse al acoplamiento que se utiliza para transmitir potencia mecánica, mediante el contacto directo de dos engranes unidos rígidamente [29].

Ley fundamental de engranaje

La ley fundamental de engranaje establece que: “la relación de velocidad angular m_v entre los engranes de un juego de engranajes, permanece constante mientras permanecen engranados”. Esta ley se describe a partir de la siguiente ecuación [30]:

$$m_v = \frac{w_{sal}}{w_{ent}} = \pm \frac{r_{ent}}{r_{sal}} = \pm \frac{d_{ent}}{d_{sal}} = \frac{1}{m_T}, \quad (2.33)$$

siendo w_{ent} , r_{ent} y d_{ent} la velocidad angular, el radio y el diámetro del engrane de entrada respectivamente. En tanto w_{sal} , r_{sal} y d_{sal} , son la velocidad angular, el radio y el diámetro del engrane de salida. Se tiene también que $m_T = \tau_{sal}/\tau_{ent}$ es conocida como relación de par, donde τ_{ent} y τ_{sal} son el par de torsión del engrane de entrada y de salida. Un juego de engranes, es por tanto en esencia un dispositivo que intercambia par de torsión por velocidad angular o viceversa. La ecuación (2.33) toma signo positivo si los engranes giran en el mismo sentido y signo negativo si estos giran en sentido contrario. Con $m_v > 1$ el mecanismo se conoce como multiplicador y si $m_v < 1$ se habla de un mecanismo reductor. En la Figura 2.35, se muestra un par de engranes simple, donde el engrane de entrada, el cual es más pequeño que el engrane de salida se conoce como piñón [29,30].

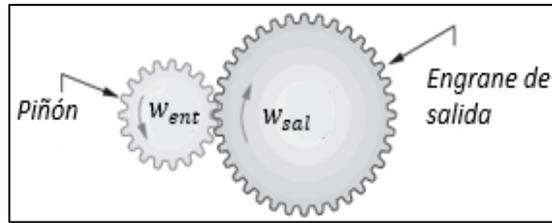


Figura 2.35. Par de engranes [31].

Nomenclatura del diente de engrane

En la Figura 2.36, se muestran dos dientes de engrane con su respectiva nomenclatura estándar. La altura del diente se conforma por el círculo de “cabeza” (addendum) y el círculo de “raíz” (dedendum). El dedendum es un poco más grande que el addendum para crearse una cantidad llamada holgura. El espesor del diente se mide en el círculo de paso y el ancho del espacio de diente es ligeramente más grande que su espesor, a partir de la diferencia entre ambas se puede calcular el juego de engranes.

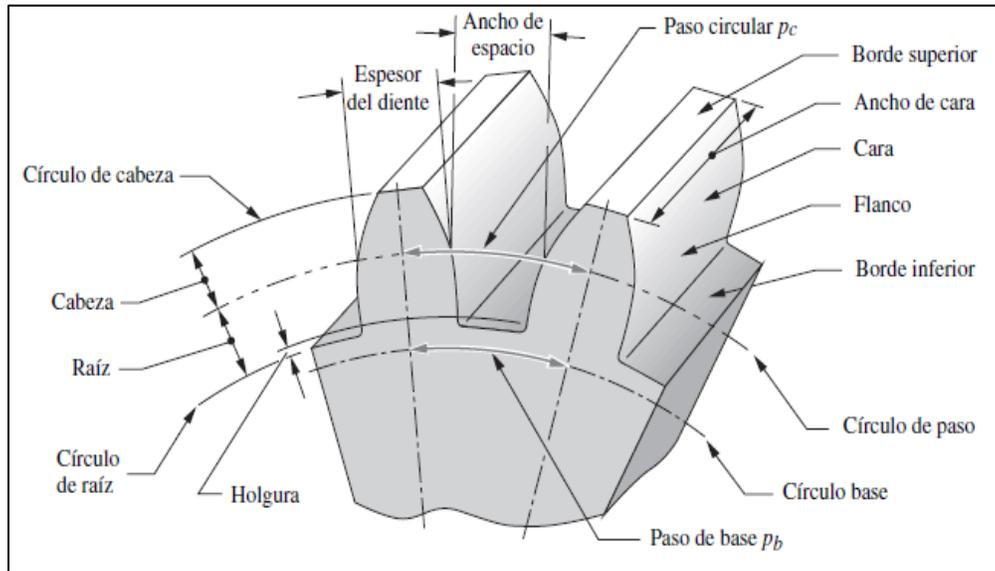


Figura 2.36. Nomenclatura del diente de engrane [30].

El paso circular P_c es la longitud de arco a lo largo de la circunferencia del círculo de paso de un punto de un diente al mismo punto del siguiente diente.

Una forma común de definir el tamaño del diente es relacionarlo con el diámetro del círculo de paso, por lo que se define el paso diametral como:

$$P_d = \frac{N}{d}, \quad (2.34)$$

donde N es el número de dientes en el engrane y d es el diámetro de paso.

Se puede obtener una relación de velocidad m_v y una relación del par de torsión m_T del engranaje sustituyendo d de la ecuación (2.34) en la ecuación (2.33), considerando un paso diametral de los engranes engranados iguales, de manera que queda como [30]:

$$m_v = \pm \frac{d_{ent}}{d_{sal}} = \pm \frac{N_{ent}}{N_{sal}}, \quad (2.35)$$

$$m_T = \pm \frac{d_{sal}}{d_{ent}} = \pm \frac{N_{sal}}{N_{ent}}, \quad (2.36)$$

donde d_{ent} y d_{sal} son los diámetros del engrane de entrada y de salida, mientras que N_{ent} y N_{sal} son el número de dientes para el engrane de entrada y de salida respectivamente.

Tren de engranes

El mecanismo denominado tren de engranes, es cualquier conjunto de dos o más engranes conectados de tal forma que el elemento conducido de una pareja es el conductor de la segunda. Los trenes de engranes se clasifican principalmente en dos tipos, los trenes de engranes simples y los compuestos [29,30].

En un tren de engranes simple, cada eje porta un solo engrane. La relación de velocidad m_v , se determina al expandir la ecuación (2.35). La Figura 2.37, muestra un tren de engranes simple, el cual se conforma de tres engranes en serie. La relación de velocidad para este caso es:

$$m_v = \left(-\frac{N_1}{N_2} \right) \left(-\frac{N_2}{N_3} \right) = \left(\frac{N_1}{N_3} \right), \quad (2.37)$$

donde N_1 , N_2 y N_3 son el número de dientes que corresponde al primer, segundo y tercer engrane respectivamente, el cual es mostrado en la Figura 2.37. De manera general, siempre se cumple la ecuación (2.37), en la cual, la relación de velocidad siempre queda en términos del número de dientes del engrane de entrada y de salida [30].

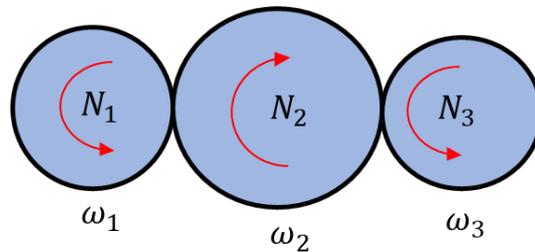


Figura 2.37. Tren de engranes simple conformado por tres engranes conectados en serie con N_1 , N_2 y N_3 como el número de dientes y ω_1 , ω_2 y ω_3 como las velocidades angulares que corresponde a cada engrane respectivamente.

2.8.2. Mecanismo de los motores CD a pasos

Los motores de tipo paso a paso hoy en día son de gran utilidad en numerosas aplicaciones de medición y control. Algunos ejemplos de estas aplicaciones incluyen impresoras de inyección de tinta, máquinas CNC y bombas volumétricas. Varias características comunes a todos los motores paso a paso los hacen idealmente adecuados para este tipo de aplicaciones. Estas características son las siguientes [31]:

1. Sin Escobillas - Los motores paso a paso son sin escobillas. El conmutador y las escobillas de los motores convencionales son algunos de los componentes más propensos a fallar, y generan arcos eléctricos que son indeseables o peligrosos en algunos entornos.
2. Independiente de la Carga - Los motores paso a paso girarán a una velocidad establecida independientemente de la carga, siempre y cuando la carga no exceda la clasificación de par para el motor.
3. Posicionamiento en Lazo Abierto - Los motores paso a paso se mueven en incrementos o pasos cuantificados. Siempre y cuando el motor funcione dentro de su especificación de par, la posición del eje se conoce en todo momento sin necesidad de un mecanismo de retroalimentación.
4. Par de Retención - Los motores paso a paso pueden mantener el eje estacionario.
5. Excelente respuesta al arranque, frenado e inversión.

En los motores a paso, su movimiento rotatorio ocurre desde una posición de equilibrio a la siguiente. La característica principal de estos motores radica en su capacidad de convertir los cambios en la excitación del devanado del estator, en cambios definidos con precisión de la posición del motor. El posicionamiento se logra mediante la alineación magnética entre los dientes del estator y el rotor. Dicha alineación magnética, se produce mediante un flujo magnético en el estator cuando existe un flujo de corriente en los embobinados al aplicar un determinado voltaje [32]. Los principales elementos y el funcionamiento de un motor a paso se muestran en la Figura 2.38.

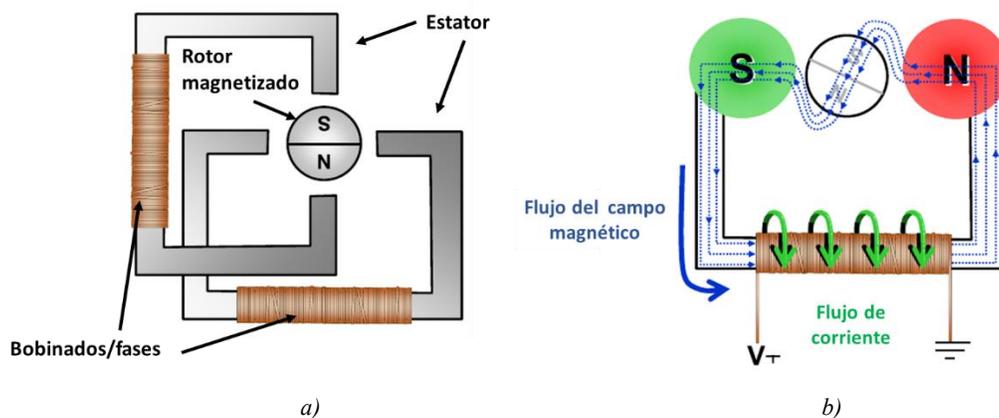


Figura 2.38. a) Principales elementos de un motor a paso. b) Giro del rotor de un motor a paso debido al flujo magnético en un estator cuando se aplica un determinado voltaje [33].

Existen varios diseños de motores a paso, siendo de particular interés para este proyecto los motores a paso unipolares. Las características y el funcionamiento se describen a continuación:

Los motores a paso unipolares están compuestos por dos bobinados, cada uno con una toma central. Las tomas centrales se llevan fuera del motor como dos cables separados, tal como se muestra en la Figura 2.39. El cable de toma central se conecta a una fuente de alimentación y los extremos de los bobinados se conectan a tierra alternadamente.

Estos motores, al igual que todos los motores de imán permanente e híbridos, operan atrayendo los polos norte o sur del rotor permanentemente magnetizado hacia los polos del estator. Así, la dirección

de la corriente a través de los bobinados del estator determina qué polos del rotor serán atraídos hacia qué polos del estator [31,32].

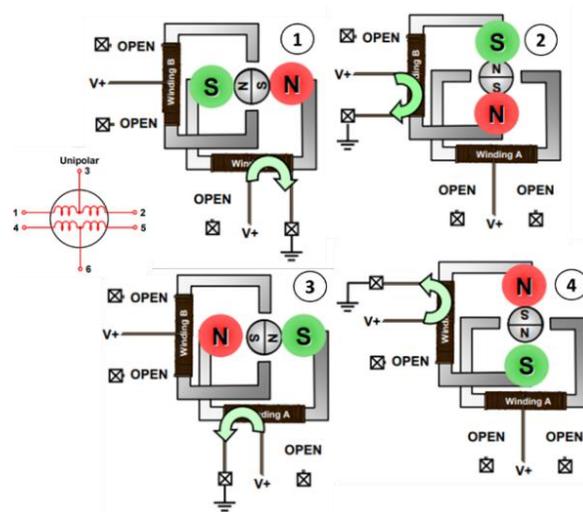


Figura 2.39. Fases de un motor a paso unipolar, donde en cada fase la toma central es conectada a tierra o a la fuente de voltaje y la corriente fluye en la mitad de cada bobinado hasta hacer girar el rotor 360° [33].

Los torques o par de torsión que se generan durante el funcionamiento de un motor a pasos son los siguientes [32,33]:

- Torque de anclaje (holding torque): se define como el máximo par estático que se le puede aplicar al eje de un motor excitado sin causar una rotación continua y aumenta con la corriente de excitación de las fases. Cuando se aplica un par de carga al motor que exceda el holding torque, el rotor girara continuamente.
- Torque de tracción (pull in torque): es el torque máximo para vencer la inercia del rotor para empezar a girar a máxima velocidad o a una velocidad indicada.
- Torque de extracción (pull out torque): es el máximo torque que el motor puede proporcionar sin sufrir pérdida de pasos cuando el motor se encuentra en funcionamiento.

En la aplicación de un motor paso a paso a un sistema de control de movimiento, el diseñador debe conocer las características de torsión y velocidad del motor. Estos datos la proporcionan a menudo los fabricantes mediante curvas de par/velocidad. Estas curvas consisten en dos características clave: la primera denominada ‘pull in’ nos indica el par de arranque en función de la velocidad de arranque, con el motor en reposo y sin pérdida de pasos. La segunda, denominada ‘pull out’, representa el par máximo de trabajo cuando el motor está en funcionamiento. Entre la curva de ‘pull in’ y la de ‘pull out’, se encuentra el área de aceleración y desaceleración, conocida como campo de giro o zona de arrastre [32,34,35]. Esta gráfica característica se muestra en la Figura 2.40.

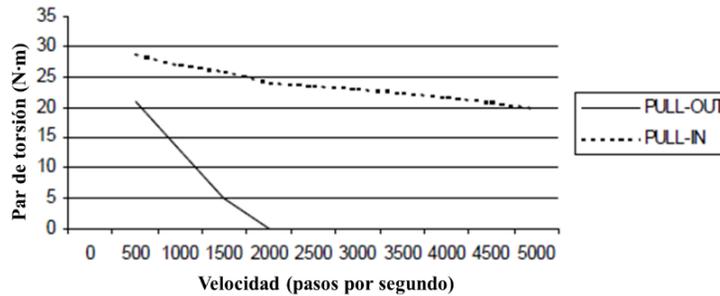


Figura 2.40. Curvas características de un motor a paso [34].

A menudo, los motores paso a paso se ejecutan a voltajes más altos que su voltaje nominal. Aumentar el voltaje suministrado a un motor aumenta la velocidad a la que aumenta la corriente en los bobinados del motor. Cuanta mayor sea la corriente en los bobinados, mayores serán las características de torque y velocidad del motor [31,32]. Un bobinado de un motor a paso puede ser modelado como el circuito inductivo-resistivo mostrado en la Figura 2.41 a).

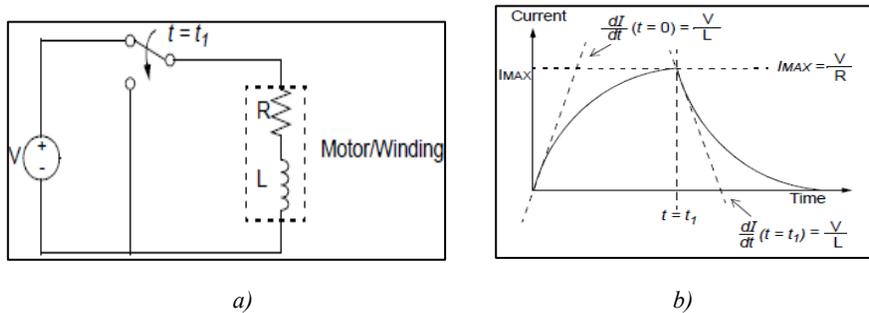


Figura 2.41. a) Diagrama del circuito inductivo-resistivo de uno de los embobinados de un motor a paso. b) Curva característica de la corriente con respecto al tiempo al aplicar un cierto voltaje de un motor a paso [33].

Por otro lado, en la Figura 2.41b) se muestra el comportamiento de la corriente con respecto al tiempo cuando se aplica el voltaje de suministro. La corriente aumenta de manera exponencial hasta que se alcanza una corriente máxima. La corriente en función del tiempo se da como [31,32]:

$$I(t) = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{tR}{L}} \right), \quad (2.38)$$

donde V es el voltaje de suministro, R la resistencia del bobinado y L la inductancia del bobinado. La relación V/R es la corriente máxima y se especifica en la hoja de datos del fabricante del motor.

2.9. Medición y aplicación de fuerzas lineales de tensión y compresión

Existen distintos tipos de fuerzas o “esfuerzos” que se encuentran al tratar con las propiedades mecánicas de los materiales. El esfuerzo se define como la fuerza que actúa por unidad de área en la cual se aplica la fuerza. Los esfuerzos de tensión y compresión lineal son esfuerzos normales. La tensión ocasiona una elongación en la dirección de la fuerza aplicada, mientras que la compresión ocasiona un acortamiento sobre el material.

A la deformación elástica, se define como la deformación recuperable por completo que resulta partir de un esfuerzo aplicable. Mientras que, en la deformación plástica, el material no regresa a su forma original después de aplicarle un cierto esfuerzo. En muchos materiales el esfuerzo y la deformación elástica están relacionados de manera lineal. A la pendiente de una curva esfuerzo-deformación en el régimen lineal define el módulo de Young E . A esta relación entre el esfuerzo y la deformación en una región elástica se le conoce como ley de Hooke:

$$S = \frac{F}{A_0} = \varepsilon E = \frac{\Delta l}{l_0} E, \quad (2.39)$$

donde S es el esfuerzo y es la razón entre la fuerza aplicada (F) y el área de sección transversal original del material (A_0). A la cantidad ε se le conoce como deformación, que se define como la razón del cambio en la longitud (Δl) después de que se le aplique la fuerza (F) entre la longitud original del material (l_0) [36].

Las últimas décadas han visto un aumento en el uso de polímeros en componentes que soportan cargas y absorben impactos. Como consecuencia, surge el requisito de predecir el comportamiento del material de los componentes sujetos a diversas condiciones de carga. Han surgido muchos métodos para poder medir las deformaciones que se sufren como consecuencia de los esfuerzos aplicados en este tipo de materiales. Por ejemplo, se puede medir el aumento de volumen durante la aplicación de esfuerzos, estos fenómenos pueden cuantificarse y modelarse, lo que permite modelos predictivos en cuanto al comportamiento de los polímeros. Dichos modelos, pueden luego implementarse en códigos de elementos finitos para evaluar y predecir mejor la respuesta de los componentes poliméricos sujetos a deformaciones plásticas significativas. Esto generalmente se logra mediante el uso de muestras con muescas con diferentes radios [36].

Otro método son las técnicas basadas en imágenes que miden la deformación local en muestras de polímeros. Para esto, se aplican algunos marcadores discretos a una muestra de prueba de tensión con una pequeña imperfección geométrica, y se utiliza una técnica para caracterizar el comportamiento posterior al estrechamiento del polímero en cuestión. Un método más general es monitorear la muestra de prueba con una cámara digital y analizar imágenes de la muestra durante el proceso de deformación con correlación de imagen digital. Una forma clásica de calcular la deformación volumétrica en un material es sumar los tres componentes de deformación normal medidos en las direcciones longitudinal y dos transversales [37].

Capítulo 3. Caracterización de la montura opto-mecatrónica

3.1. Diseño de la montura opto-mecatrónica y descripción de su funcionamiento

El sistema opto-mecatrónico fue diseñado y construido en el Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por la Ingeniera Miroslava Leyva Pacheco [38] y el Cuerpo Académico UTMIX-CA-22 “Óptica Aplicada”. En este sistema, se incorpora una pieza que se muestra en la Figura 3.1 a), que está formada por diez brazos que son adheridos a los bordes de una lente sintonizable (SEL) hecha de PDMS mostrada en la Figura 3.1b). En el diseño del SEL, se adoptaron los parámetros especificados en el modelo esquemático de ojo descrito por Navarro et al. en 1985, este modelo considera el ojo como un sistema óptico formado por cuatro superficies refractivas con simetría rotacional, además define cada superficie con dos parámetros: el radio de curvatura y sus constantes cónicas [5,39,40]. Los parámetros del lente cristalino de este modelo se resumen en la Tabla 3.1.

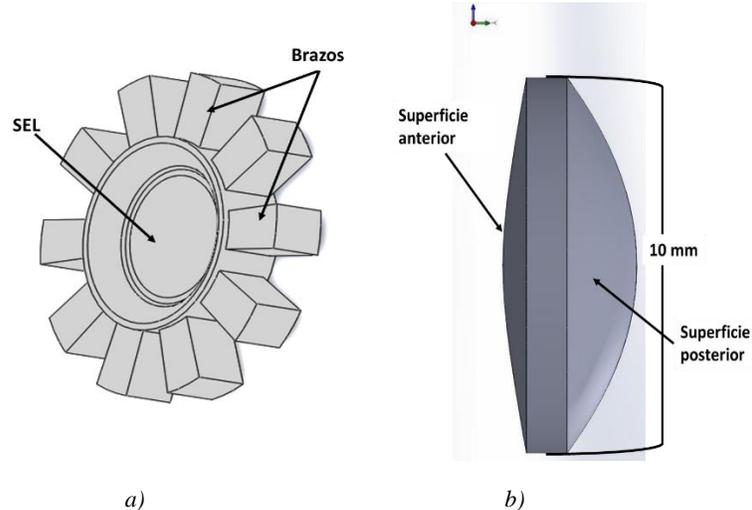


Figura 3.1. a) Pieza que contiene al SEL y b) diseño original del SEL diseñados en SOLIDWORKS®.

Tabla 3.1. Parámetros del lente cristalino [40,41].

Parámetro :	Valores
Radio de curvatura	Superficie anterior = 10.2 mm Superficie posterior = -6 mm
Constante cónica	Superficie anterior = -3.1316 Superficie posterior = -1
Espesor	4 mm
Diámetro	10 mm

Para la fabricación de la lente, se ocupó un par de moldes de aluminio con los parámetros geométricos del diseño hecho en SolidWorks® (ver Figura 3.1), dichos moldes fueron maquinados previamente

en el laboratorio de manufactura avanzada de la Universidad Tecnológica de la Mixteca mediante una fresadora CNC.

En el proceso, se utilizó un recipiente en el cual se mezcló la base y el agente de curado del kit PDMS SYLGAR 184 [41] y se pesó sobre una balanza electrónica OHARUS®.

Posteriormente, se utilizó un agitador y se revolvió en forma de espiral para un mejor mezclado y se dejó reposar a un tiempo aproximado de media hora. Luego, la mezcla fue vertida sobre los moldes y se dejó reposar otra media hora, esto con el fin de desaparecer las burbujas producidas. Una vez pasado el tiempo de reposo, los moldes se introdujeron dentro de una mufla eléctrica para el proceso de curado térmico del PDMS. Después de pasar el tiempo requerido para este proceso, el molde se retiró de la mufla y se dejó reposar a la temperatura ambiente. Finalmente, los moldes se separaron y se retiró el material excedente del PDMS.

En este proceso, la razón base:agente de curado fue de 10:1. La mufla se fijó a una temperatura de 100°C, durante un tiempo de curado de 30 minutos. Estos parámetros de síntesis corresponden al código M1 de la Tabla 2.1 y de acuerdo con las gráficas de las figuras 2.13 y 2.14 mostradas en el capítulo 2, el módulo de compresión y de tensión que se obtuvo para la lente en este caso fueron de 2.450 MPa y 0.936 MPa respectivamente.

En la Figura 3.2, se muestra la pieza completa del SEL ya fabricada, donde se le agregaron postes de metal de una longitud de 6 mm a cada uno de los brazos para la sujeción en la montura. En la misma figura, también se muestran los moldes utilizados para su fabricación.

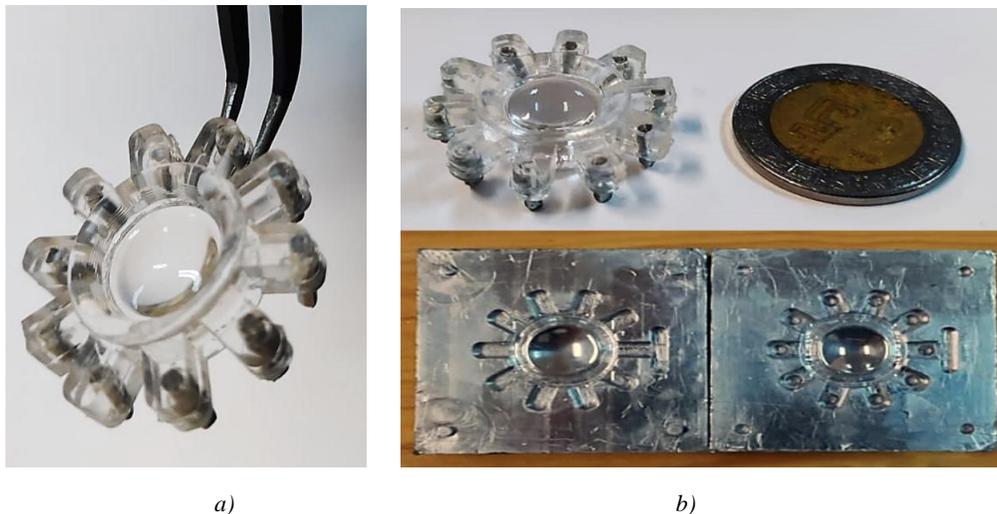


Figura 3.2. a) Pieza hecha de PDMS y b) comparación del tamaño del SEL y los moldes utilizados para su fabricación.

La vista completa de la montura opto-mecatrónica del lado inverso se muestra en la Figura 3.3a), en donde, a partir de la conexión de un sistema de tren de engranes, se genera un par de torsión total en un engrane principal mediante dos engranes secundarios 1 y 2, que son accionados mediante dos motores a pasos que introduce cada uno una cierta cantidad de par de torsión a un determinado voltaje. El par de torsión total producido en el engrane principal es convertido a una fuerza lineal por medio de un juego de sistema biela-manivela y que actúa sobre el SEL a partir de la conexión con los brazos (ver Figura 3.3b). Esta fuerza lineal puede ser de tensión o compresión, según sea el caso en la dirección en la que gire el engrane principal y es ejercida uniformemente sobre el perímetro del SEL

con el fin de cambiar la curvatura de ambas superficies que la componen y con ello variar su longitud focal.

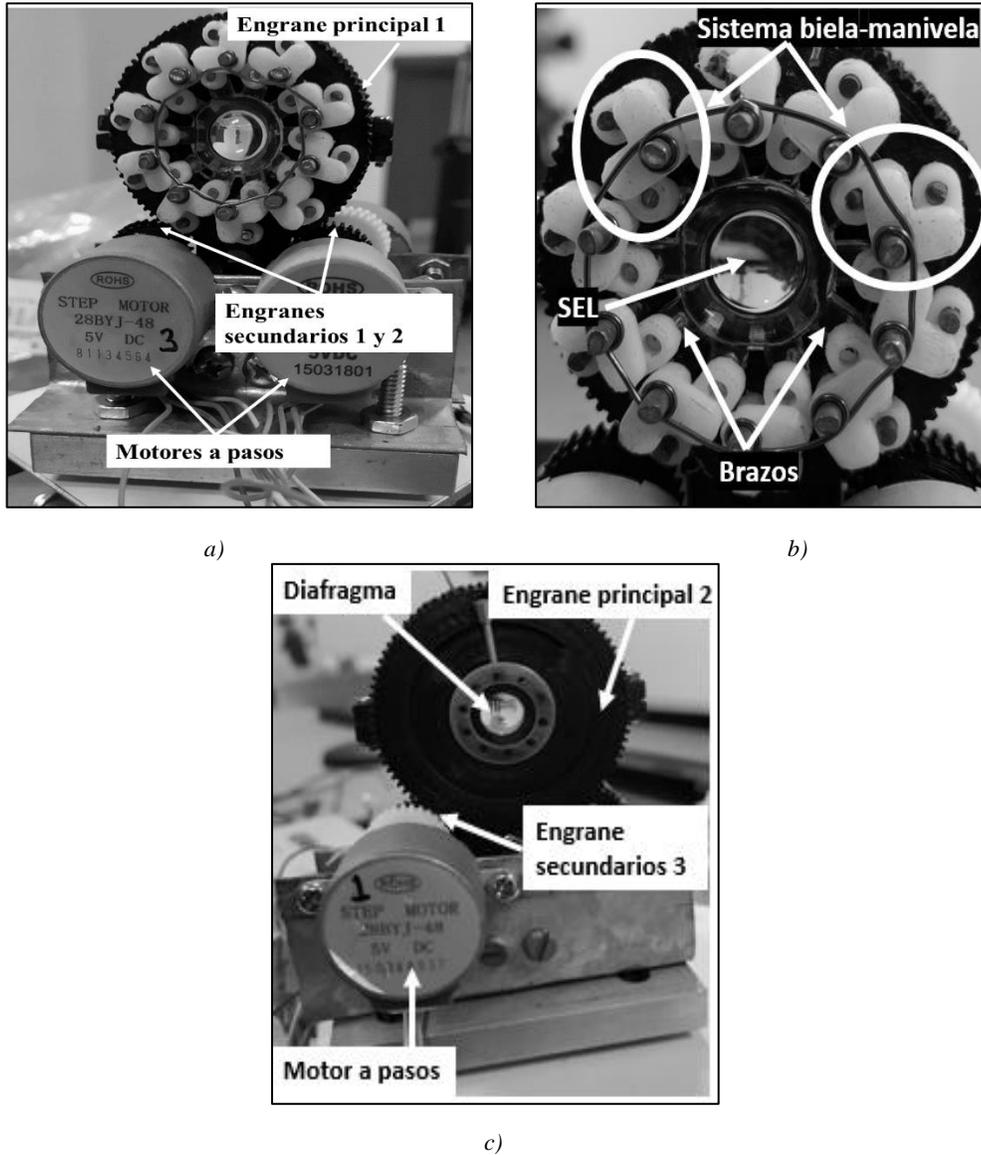


Figura 3.3. a) Vista del lado inverso de la montura opto-mecatrónica, b) vista detallada del lado inverso y c) vista del lado anverso de la montura opto-mecatrónica.

Por otro parte, la vista completa de la montura opto-mecatrónica del lado anverso se muestra en la Figura 3.3c), en la cual se encuentra el iris y que puede ser controlada mediante un diafragma que funciona mediante un sistema de tren de engranes simple conformado por un engrane principal 2 y un engrane secundario 3 conectado a un tercer motor a pasos.

3.2. Funcionamiento de los motores a pasos de la montura opto-mecatrónica

Como se mostró en la sección anterior, cada uno de los engranes secundarios producen un par de torsión, los cuales son transmitidos hacia el engrane principal 1, todo esto se logra gracias al acoplamiento entre los dos engranes secundarios con dos motores a pasos. Cada uno de los motores son accionados mediante pasos a través del control de la corriente lo cual a su vez es proporcional al par de torsión generado.

La montura opto-mecatrónica hace uso de tres motores a pasos modelo 28BYJ-48 marca ROHS® [42]. Dos de estos motores, producen las fuerzas de tensión/compresión y uno controla el diafragma. En la Tabla 3.2, se muestra un resumen de las características principales de este modelo de motor a pasos.

Tabla 3.2. Características principales del motor a pasos modelo 28BYJ-48 [42].

Tensión nominal:	5 VDC
Relación de variación de velocidad:	1/64
Angulo de paso:	0.088°
Frecuencia:	100 Hz
Resistencia del embobinado:	50 Ω
Torque de tracción (pull in torque):	0.029 N·m

Se incorporó una interfaz desarrollada en MATLAB® que establece una comunicación con el módulo PC. Este módulo consta de un puerto USB que establece una comunicación serial con una placa de Arduino® Nano basado en el microcontrolador ATmega328P. En una etapa de potencia para los motores, la placa Arduino envía una señal digital a un módulo de control UNLN2003 para controlar la dirección y el movimiento de los motores. La ventana de esta interfaz se muestra en la Figura 3.4. El código del programa y el circuito de control fueron desarrollados por el Dr. Arturo Hernández, profesor-investigador del Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

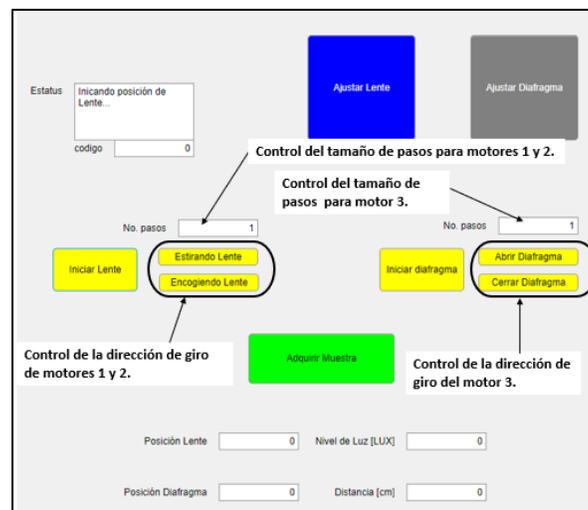


Figura 3.4. Ventana de la interfaz que controla el número de pasos y la dirección de giro de los tres motores implementados en la montura.

3.3. Caracterización del funcionamiento de los engranes de la montura opto-mecatrónica

Como se muestra en la Figura 3.3, la montura cuenta con cinco engranes que forman dos sistemas de tren de engranes simples, tres engranes secundarios y dos engranes principales. El radio y número de dientes de cada una de estos engranes se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Radio y número de dientes de los engranes de la montura.

Radio de los engranes principales (R_p):	24.84 mm
Radio de los engranes secundarios (R_s):	8 mm
Número de dientes de los engranes principales (N_p):	90
Número de dientes de los engranes secundarios (N_s):	30

3.3.1. Análisis de la configuración del engranaje de la montura opto-mecatrónica

La configuración del sistema de tren de engranes simple de la parte inversa de la montura se muestra en el diagrama de la Figura 3.5.

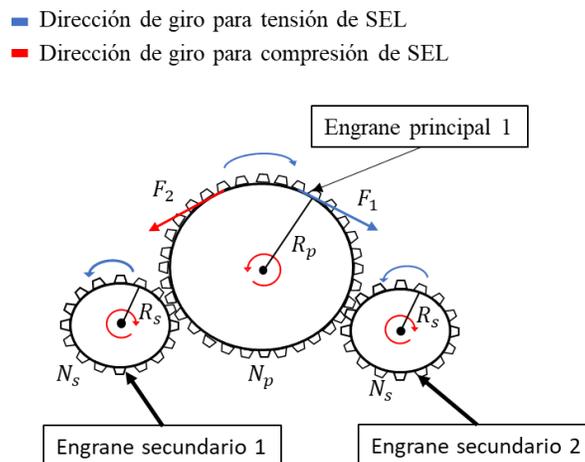


Figura 3.5. Esquema del tren engranes simple de la montura opto-mecatrónica que proporcionan el par de torsión necesario para generar las fuerzas lineales de tensión/compresión.

En dicho diagrama, se ilustran las direcciones de giro de los engranes principal y secundarios del cual se generan los torques necesarios para proporcionar al sistema la fuerza lineal de tensión/compresión. Los movimientos de rotación en contra de las manecillas del reloj de los engranes secundarios a una cierta velocidad angular y con un cierto par de torsión, τ_{s1} , por cada engrane, se transmiten al engrane principal 1 que produce un movimiento de rotación en dirección a las manecillas del reloj con un par de torsión total τ_1 y con una fuerza tangencial asociada de magnitud F_1 . Este se convierte en una fuerza lineal de tensión F_t mediante el sistema biela-manivela y que por último se ejerce en cada uno de los brazos del SEL, el diagrama de este mecanismo se muestra a detalle en la Figura 3.6a).

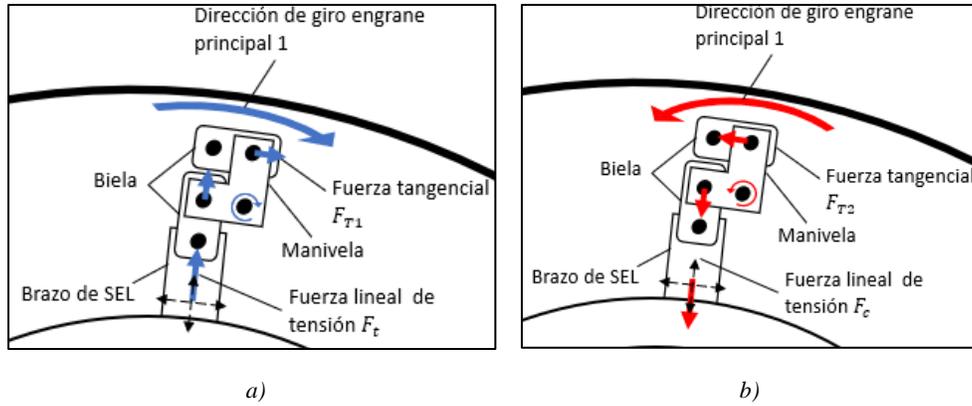


Figura 3.6. Diagrama del mecanismo del sistema biela-manivela que convierte el par de torsión total del engrane principal 1 en una fuerza lineal de a) tensión y b) compresión.

Por el contrario, cuando los engranes secundarios giran en dirección de las manecillas del reloj a una cierta velocidad angular y con par de torsión, τ_{S2} , por cada engrane, se produce un movimiento de rotación en dirección contraria a las manecillas del reloj en el engrane principal 1, con un par de torsión total τ_2 y con una fuerza tangencial asociada de magnitud F_2 . En este caso, el sistema biela-manivela convierte este par de torsión total en una fuerza lineal compresión F_c , que también se ejerce en cada uno de los brazos del SEL, tal como se muestra en la Figura 3.6b).

La magnitud del par de torsión total en el engrane principal 1 se calculan en términos de las fuerzas tangencial asociadas, tomando en cuenta la convención de signos mediante las siguientes ecuaciones [43,44]:

$$\tau_1 = -R_p \cdot F_1, \quad (3.1)$$

$$\tau_2 = R_p \cdot F_2. \quad (3.2)$$

La relación de par de torsión para un tren de engranes simple compuesto por un engrane de entrada con número de dientes N_{ent} y un engrane de salida con número de dientes N_{sal} , está dada por la siguiente ecuación [30]:

$$m_r = \left(-\frac{N_{sal}}{N_{ent}} \right) = \left(\frac{\tau_{sal}}{\tau_{ent}} \right). \quad (3.3)$$

Considerando que cada motor a un cierto paso transmite la misma cantidad de par de torsión a cada uno de los engranes secundarios con la misma dirección y sentido, denotado por τ_{S1} y τ_{S2} , entonces el par de torsión total en el engrane principal 1, es la suma de ambos. Por tanto, el sistema de engranes mostrado en la Figura 3.5 se puede dividir en dos subsistemas de tren de engranes simples, conformado por dos engranes: engrane secundario 1-engrane principal 1 y engrane secundario 2-engrane principal 1, tal como se muestra en la Figura 3.7. La relación de par de torsión para el subsistema 1 y 2 cuando el engrane principal 1 gira en dirección a las manecillas del reloj es la siguiente:

$$m_{T_1} = m_{T_2} = \left(-\frac{N_P}{N_S} \right) = \left(\frac{\tau_1/2}{\tau_{s1}} \right) = \left(\frac{\tau_1/2}{\tau_{s2}} \right), \quad (3.4)$$

despejando τ_{s1} y τ_{s2} de la ecuación (3.4) queda que:

$$\tau_{ST} = \tau_{s1} = \tau_{s2} = \left(-\frac{N_s}{2N_p} \right) \tau_1. \quad (3.5)$$

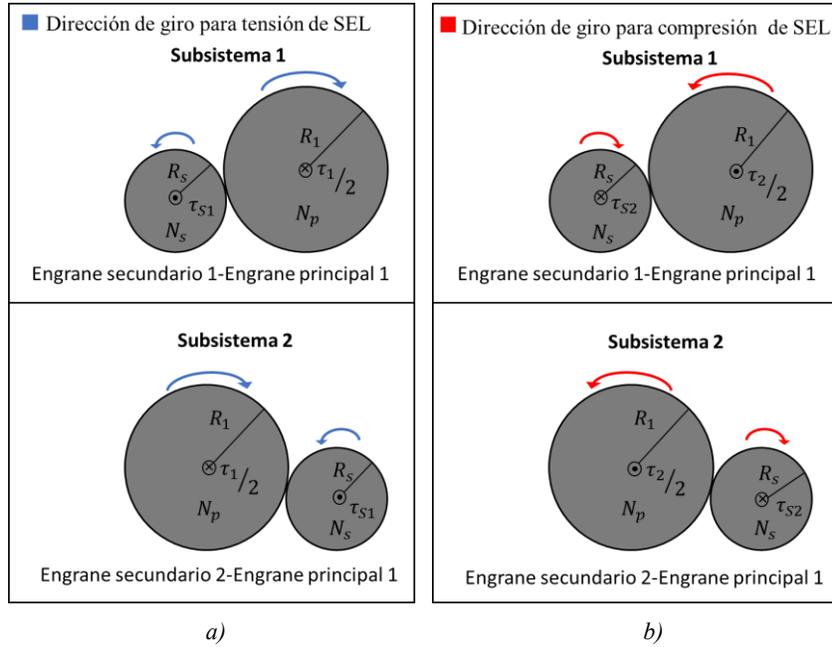


Figura 3.7. Diagrama de los dos subsistemas del mecanismo de tren de engranes simple de la montura opto-mecatrónica cuando se ejercen fuerzas lineales de a) tensión y b) compresión.

Sustituyendo los valores del número de dientes de los engranes principal y secundarios de la Tabla 3.1, la ecuación (3.5) queda como:

$$\tau_{ST} = \left(-\frac{30}{2(90)} \right) \tau_1 = -\frac{1}{6} \tau_1. \quad (3.6)$$

Por otro lado, haciendo el mismo análisis para el engrane principal 1, cuando gira en contra de las manecillas del reloj, se tiene que el par de torsión para los engranes secundarios 1 y 2 es:

$$\tau_{SC} = -\frac{1}{6} \tau_2. \quad (3.7)$$

Las ecuaciones (3.6) y (3.7) proporcionan entonces, el par de torsión que en los engranes secundarios 1 y 2 se generan a un cierto número de pasos en los motores y que está en términos del par de torsión en el engrane principal 1, del cual el sistema requiere para poder ejercer sobre el SEL las fuerzas lineales de tensión/compresión.

3.3.2. Medición del par de torsión entregada por la montura opto-mecatrónica

De acuerdo con las ecuaciones (3.7) y (3.8), para determinar el par de torsión en el engrane principal 1 y en los engranes secundarios 1 y 2, es necesario medir las fuerzas tangenciales F_1 y F_2 producidas. La técnica y arreglo experimental con la que se midieron estas fuerzas se describe a continuación:

Para medir las fuerzas tangenciales en el engrane principal 1, se utilizó un amplificador de celda de carga PASPORT (PS-2198) de PASCO®. El diagrama del arreglo experimental se muestra en la Figura 3.8, donde una cuerda se sujetó entre la celda de carga y una palanca acoplada al engrane principal 1.

Los motores y engranes secundarios fueron desacoplados. El engrane principal se hizo girar mediante fuerzas tangenciales F_2 aplicadas a la palanca, las cuales fueron transmitidas mediante la tensión de la cuerda y que fueron medidas a través del sensor de la celda de carga. La celda de carga se conectó a un amplificador adaptado para transmitir la señal a procesar. El conjunto amplificador-celda de carga se conectó a un interfaz 850 universal (UI-5000) de la marca PASCO® para adquirir los datos de la magnitud de las fuerzas tangenciales y que finalmente se registraron en un ordenador.

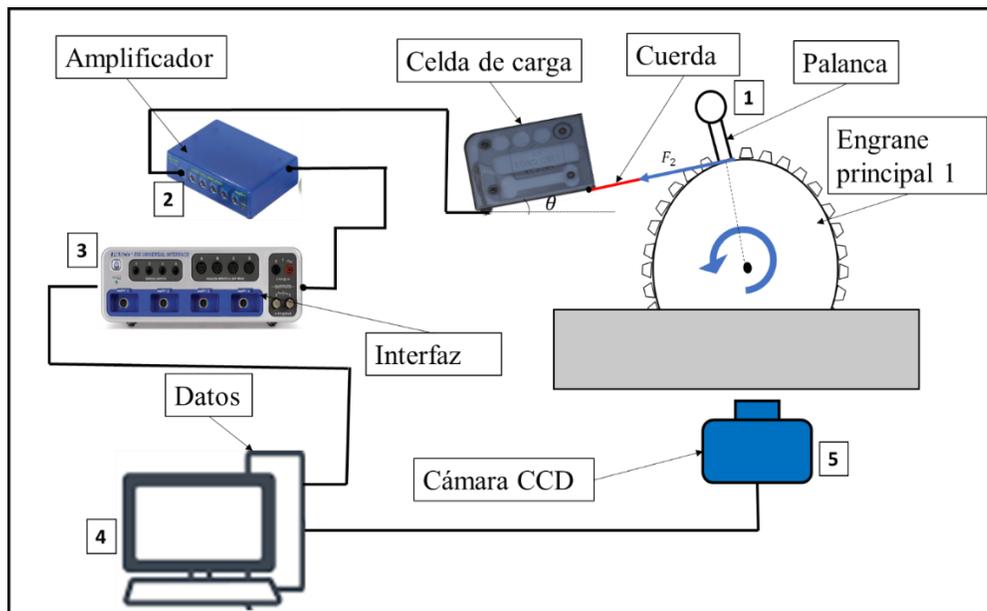


Figura 3.8. Diagrama del arreglo experimental para la medición de las fuerzas tangenciales producidas en el engrane principal 1, para el caso en el que el sistema opto-mecatrónico genera una fuerza lineal de compresión.

En la parte superior de la montura, fue incorporado un indicador milimétrico, el cual midió el desplazamiento angular del engrane principal 1 a partir de su posición inicial (ver Figura 3.9).

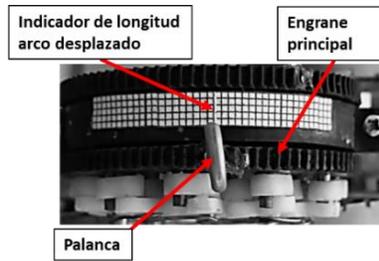


Figura 3.9. Fotografía de vista superior de la montura, que muestra el indicador milimétrico utilizado para medir la longitud de arco recorrido del engrane principal 1 cuando se le aplica una fuerza tangencial específica.

En el diagrama de la figura 3.10a), se muestra el ángulo θ_1 para una rotación determinada del engrane principal y el ángulo θ_2 de inclinación que debe tener el sensor de carga para medir la fuerza tangencial al engrane. A través de un análisis de relaciones geométricas en el diagrama, se demostró que el ángulo de inclinación del sensor debe ser igual al ángulo de rotación del engrane, siempre que la cuerda esté sujeta en la palanca de manera tangencial, es decir, $\theta = \theta_1 = \theta_2$, cuando el ángulo entre la cuerda y la palanca sea de 90° . Por lo tanto, para garantizar que el sensor midiera la fuerza tangencial aplicada a la palanca, se verificó que el ángulo de rotación del engrane principal fuera igual al ángulo de inclinación del sensor. Los ángulos de rotación se determinaron midiendo la longitud de arco recorrido por el engrane principal, mientras que los ángulos de inclinación del sensor se midieron con ayuda de un indicador de ángulo, tal como se muestra en la fotografía de la Figura 3.10b).

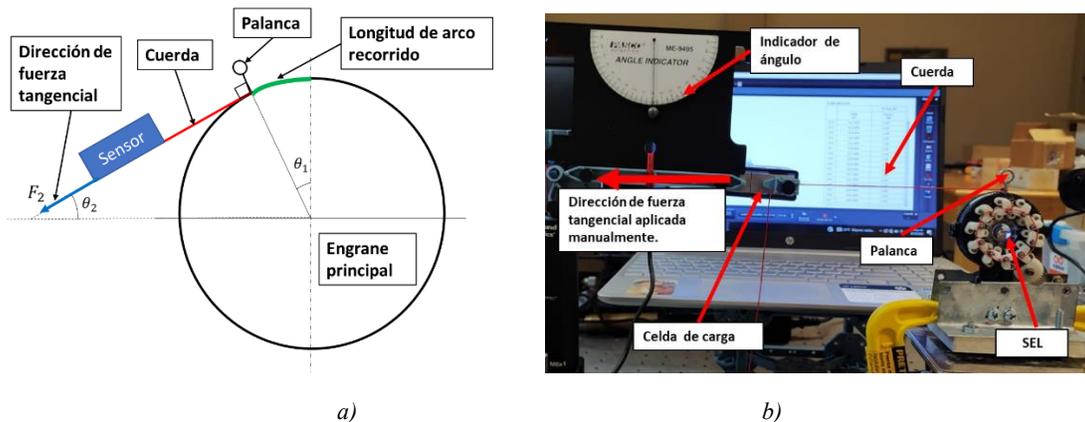


Figura 3.10. a) Diagrama geométrico de la medición de fuerzas tangenciales en el engrane principal 1 y b) fotografía de la implementación del sensor de carga en la montura opto-mecatrónica.

Mediante el mismo arreglo experimental con la cuerda y la celda de carga colocadas en la dirección contraria, se midió las fuerzas tangenciales necesarias para que el sistema opto-mecatrónico ejerza fuerzas de tensión lineal en el SEL. El arreglo experimental se muestra en la fotografía de la Figura 3.11, donde se realizan las mediciones de las fuerzas tangenciales cuando el sistema opto-mecatrónico proporciona una fuerza lineal de tensión.

Por otro lado, debido al contacto entre los componentes de la montura, existe una fuerza de fricción la cual se opone al movimiento giratorio. Para poder medir la magnitud de esta fuerza, se realizó el mismo proceso experimental descrito anteriormente, pero en este caso no se colocó la lente en la montura.

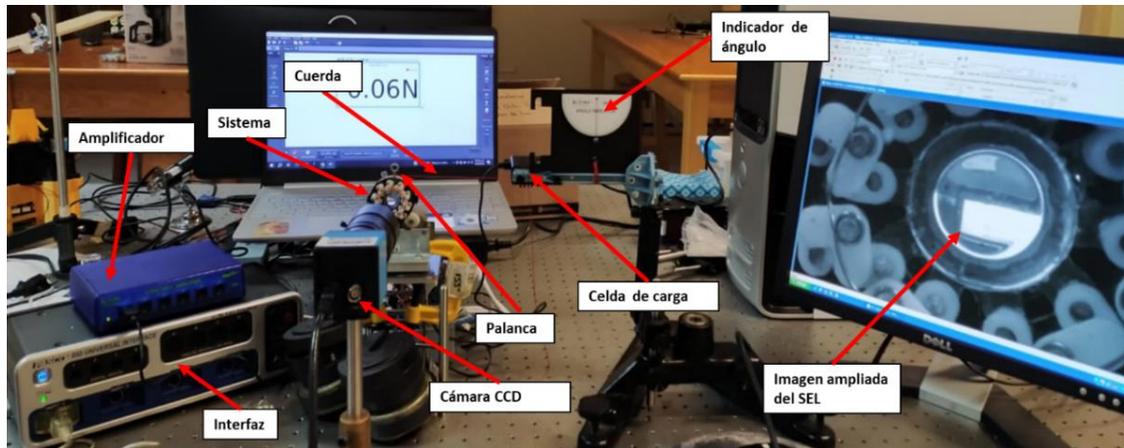


Figura 3.11. Fotografía del arreglo experimental para la medición de las fuerzas tangenciales.

Por consiguiente, para obtener los valores de las fuerzas tangenciales F_1 y F_2 necesarias para hacer girar el engrane principal libre de fricción, se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} F_1 &= F_{SEL} - F_F, \\ F_2 &= F_{SEL} - F_F, \end{aligned} \quad (3.8)$$

donde F_{SEL} es la fuerza tangencial requerida para hacer girar el engrane principal hacia la derecha/izquierda cuando la lente está colocada en la montura y F_F es la fuerza de fricción la cual corresponde a la fuerza tangencial medida para hacer girar el engrane principal hacia la derecha/izquierda, cuando la lente no está colocada en la montura.

Una vez medidas dichas fuerzas tangenciales aplicadas en la palanca para hacer rotar el engrane principal por cada cierta longitud de arco y libres de fricción, mediante las expresiones (3.1) y (3.2) y además conociendo el radio del engrane principal 1, fue posible obtener el par de torsión τ_1 y τ_2 .

Tabla 3.4. Fuerzas tangenciales medidas por el sensor de carga y pares de torsión calculadas por cada valor de ángulo recorrido cuando el engrane principal se hace girar manualmente hacia la derecha, para ejercer fuerzas de tensión.

Longitud de arco recorrido	Ángulo recorrido	F_{SEL}	F_F	F_1	τ_1
0.5mm	1.212°	0.1775 N	0.09	0.0875 N	-2.1735 N·mm
1mm	2.424°	1.1125 N	0.14	0.9725 N	-24.156 N·mm
1.5mm	3.637°	2.2225 N	0.25	1.9725 N	-48.996 N·mm
2mm	4.849°	4.0050 N	0.53	3.4750 N	-86.319 N·mm
2.5mm	6.061°	5.0925 N	0.72	4.3725 N	-108.61 N·mm
3mm	7.274°	6.7925 N	1.04	5.7525 N	-142.89 N·mm
3.5mm	8.486°	8.0925 N	1.17	6.9225 N	-171.95 N·mm

En las tablas 3.4 y 3.5, se muestran los resultados de las fuerzas tangenciales F_1 y F_2 , registradas por el sensor de carga, así como los pares de torsión τ_1 y τ_2 calculados. Estos resultados se obtuvieron al girar el engrane principal a pequeños ángulos de 1.2123° hasta llegar a una posición final con un

ángulo de 8.4864° , o bien, a longitudes de arco de 0.5 mm hasta una posición final de 3.5 mm. Las tablas representan los dos casos: uno en el cual el sistema aplica fuerzas lineales de tensión al girar manualmente el engrane principal hacia la derecha y otro en el cual aplica fuerzas lineales de compresión al girarlo hacia la izquierda.

Tabla 3.5. Fuerzas tangenciales medidas por el sensor de carga y pares de torsión calculadas por cada valor de ángulo recorrido cuando el engrane principal se hace girar manualmente hacia la izquierda, para ejercer fuerzas de compresión.

Longitud de arco recorrido	Ángulo recorrido	F_{SEL}	F_F	F_2	τ_2
0.5mm	1.212°	0.2575 N	0.08	0.1775	4.4091 N·mm
1mm	2.424°	1.130 N	0.11	1.02	25.336 N·mm
1.5mm	3.637°	1.860 N	0.23	1.63	40.489 N·mm
2mm	4.849°	3.005 N	0.52	2.485	61.727 N·mm
2.5mm	6.061°	4.060 N	0.69	3.37	83.710 N·mm
3mm	7.274°	6.535 N	0.98	5.555	137.98 N·mm
3.5mm	8.486°	7.800 N	1.23	6.57	163.19 N·mm

Con el propósito de establecer la relación entre los cambios en el diámetro posterior del SEL, como resultado de las deformaciones inducidas por cada fuerza tangencial aplicada, se dispuso una cámara CCD frente a la montura opto-mecatrónica. Esta cámara, como se puede apreciar en las figuras 3.8 y 3.11, capturo imágenes del SEL mientras se aplicaban las fuerzas tangenciales.

Las fotografías fueron procesadas digitalmente en el software de dominio público ImageJ®, donde utilizando las herramientas de “Straight line” para el trazo de una línea de longitud conocida y “Set Scale” para establecer una escala de referencia, se convirtieron los pixeles de cada fotografía a escalas milimétricas. Una vez definida la escala de referencia, se utilizó la herramienta “elliptical selections” donde se eligieron los contornos circulares que mejor se ajustaron al borde de la imagen del SEL capturado en cada fotografía. Luego, con la herramienta “Measure” que se encuentra en la sección de “Analyze”, se midieron los diámetros de los contornos circulares (ver Figura 3.12).

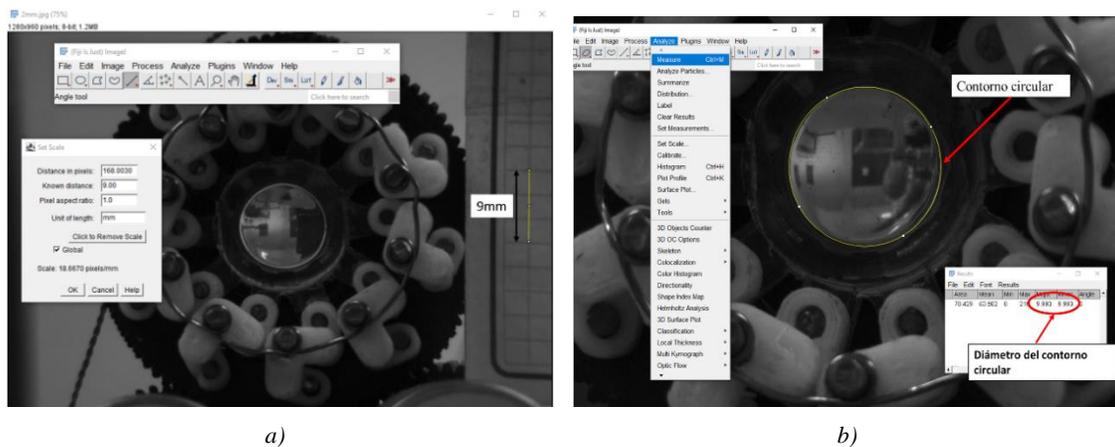


Figura 3.12. Medición de diámetros del SEL en ImageJ®, donde a) se establece la escala de referencia de una longitud conocida y b) se mide el diámetro con el contorno que mejor se ajusta en la imagen del SEL (sin fuerza aplicada).

En las tablas 3.6 y 3.7, se muestra los diámetros de abertura de la superficie posterior medidos desde ImageJ®, por cada fuerza tangencial aplicada y par de torsión producido debido a los giros del engrane principal 1 cuando el sistema ejerce fuerzas de tensión y compresión lineal en el SEL.

Tabla 3.6. Valores de los diámetros de la superficie posterior obtenidos en ImageJ® por cada fuerza tangencial aplicada y par de torsión producido debido al giro del engrane principal 1, cuando el sistema ejerce tensión en el SEL.

F_1	τ_1	Diámetro
0.0875 N	-2.1735 N·mm	10.115 mm
0.9725 N	-24.156 N·mm	10.211 mm
1.9725 N	-48.996 N·mm	10.263 mm
3.4750 N	-86.319 N·mm	10.341 mm
4.3725 N	-108.61 N·mm	10.424 mm
5.7525 N	-142.89 N·mm	10.552 mm
6.9225 N	-171.95 N·mm	10.585 mm

Tabla 3.7. Valores de los diámetros de la superficie posterior obtenidos en ImageJ® por cada fuerza tangencial aplicada y par de torsión producido debido al giro del engrane principal 1, cuando el sistema ejerce compresión en el SEL.

F_2	τ_2	Diámetro
0.1775 N	4.4091 N·mm	9.932 mm
1.02 N	25.336 N·mm	9.716 mm
1.63 N	40.489 N·mm	9.640 mm
2.485 N	61.727 N·mm	9.550 mm
3.37 N	83.710 N·mm	9.457 mm
5.555 N	137.98 N·mm	9.360 mm
6.57 N	163.19 N·mm	9.270 mm

En las figuras 3.13 y 3.14, se muestra una secuencia de imágenes del SEL, donde hay una variación en el diámetro debido a las fuerzas lineales de tensión/compresión que se ejercen sobre el SEL cuando se produce un determinado par de torsión al hacer girar el engrane principal 1 en distintos ángulos. Cada una de las fotografías presentadas en las figuras muestra un contorno circular amarillo, el cual corresponde a la abertura del SEL en ausencia de la fuerza aplicada y que se establece como referencia para apreciar las variaciones en la abertura que ocurre cuando el SEL se somete a diferentes fuerzas radiales.

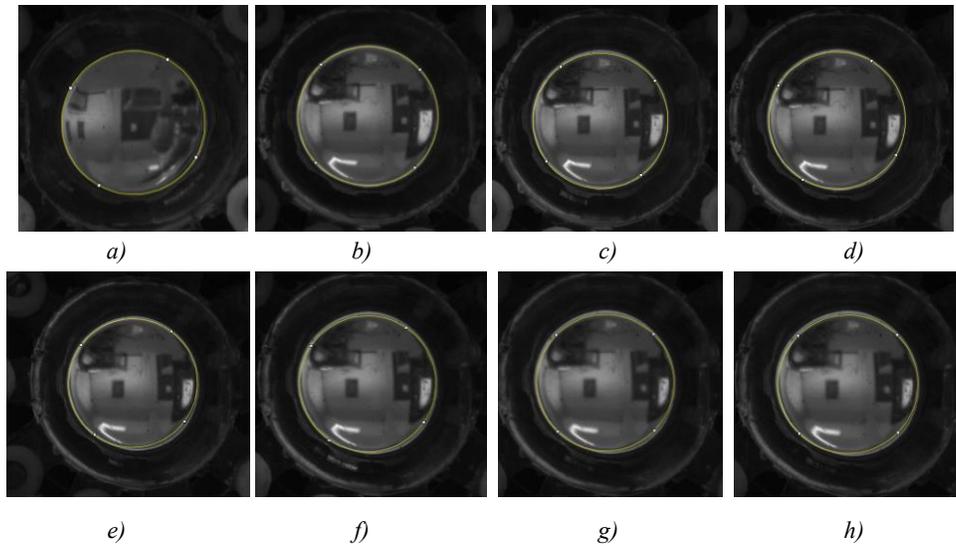


Figura 3.13. Diámetro de abertura posterior del SEL cuando a) se encuentra en su estado normal y cuando se produce un par de torsión en el engrane principal 1 de: b) 2.1735 N-mm, c) 24.1569 N-mm, d) 48.9969 N-mm, e) 86.319 N-mm, f) 108.6129 N-mm, g) 142.8921 N-mm y h) 171.9549 N-mm. Para el caso en el que el sistema ejerce fuerzas de tensión sobre el SEL.

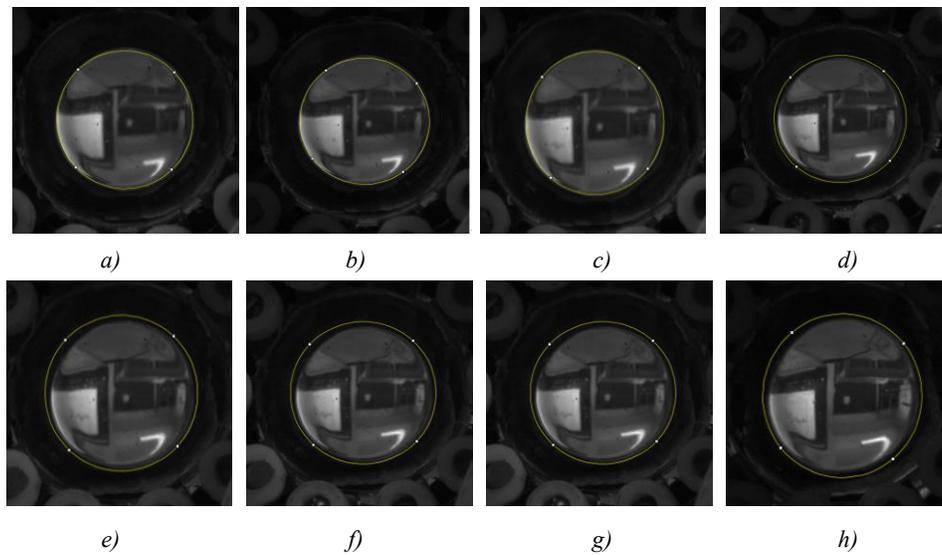


Figura 3.14. Diámetro de abertura del SEL cuando a) se encuentra en su estado normal y cuando se produce un par de torsión de b) 4.4091 N-mm, c) 25.336 N-mm, d) 40.489 N-mm, e) 61.727 N-mm, f) 83.710 N-mm, g) 137.98 N-mm y h) 163.19 N-mm. Para el caso en el que el sistema ejerce fuerzas de compresión sobre el SEL.

En las gráficas de las figuras 3.15 y 3.16, se muestran las variaciones en el diámetro de abertura de la superficie posterior bajo los diferentes valores de la magnitud del par de torsión, que se producen cuando el engrane principal 1 se hace girar para que el sistema ejerza fuerzas de tensión y compresión lineal sobre el SEL.

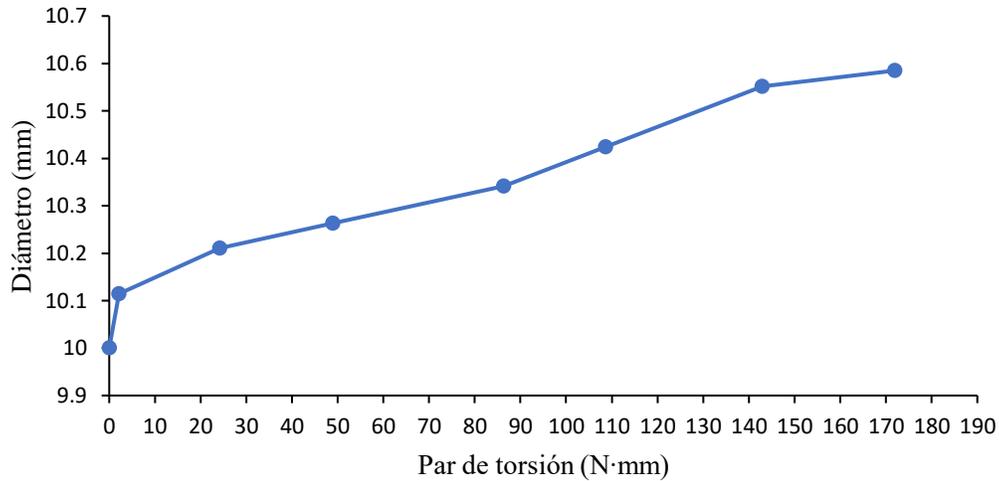


Figura 3.15. Variación en el diámetro de abertura de la superficie posterior con respecto al par de torsión producido en el engrane principal 1, cuando el sistema ejerce una fuerza de tensión sobre el SEL.

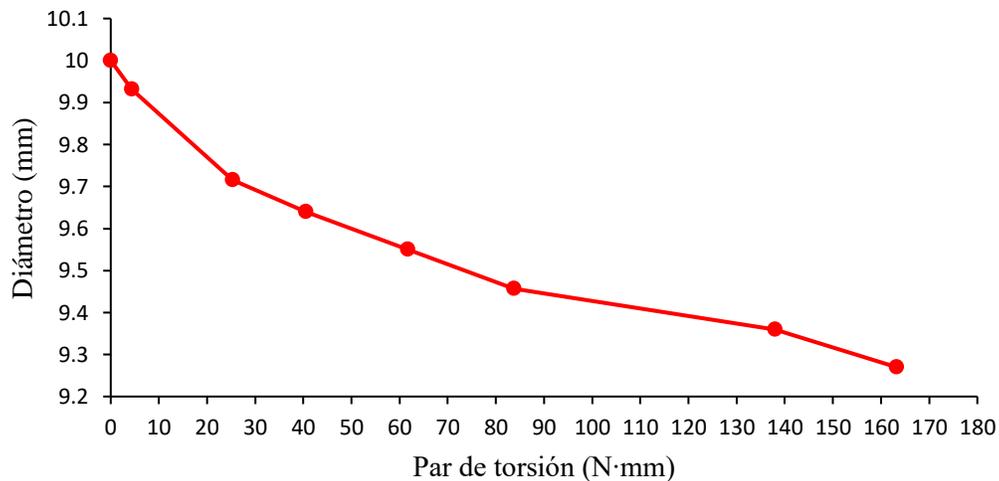


Figura 3.16. Variación en el diámetro de abertura de la superficie posterior con respecto al par de torsión producido en el engrane principal 1, cuando el sistema ejerce una fuerza de compresión sobre el SEL.

Una vez conocidos los datos de las variaciones de los diámetros de abertura de la superficie posterior con respecto al par de torsiones producidos en el sistema, se hizo un ajuste de curvas para ambos casos en que el sistema está en estado de tensión y de compresión. El ajuste para ambas curvas que relacionan el diámetro y par de torsión, se realizó en el programa numérico MATLAB®, utilizando la herramienta “Curve Fitting Tool”, tal como se muestra en las figuras 3.17 y 3.18. Dicha herramienta proporciona la curva que mejor se ajustó a cada punto obtenido de las tablas 3.6 y 3.7, así como también los coeficientes de la ecuación polinomial que describen dichas curvas.

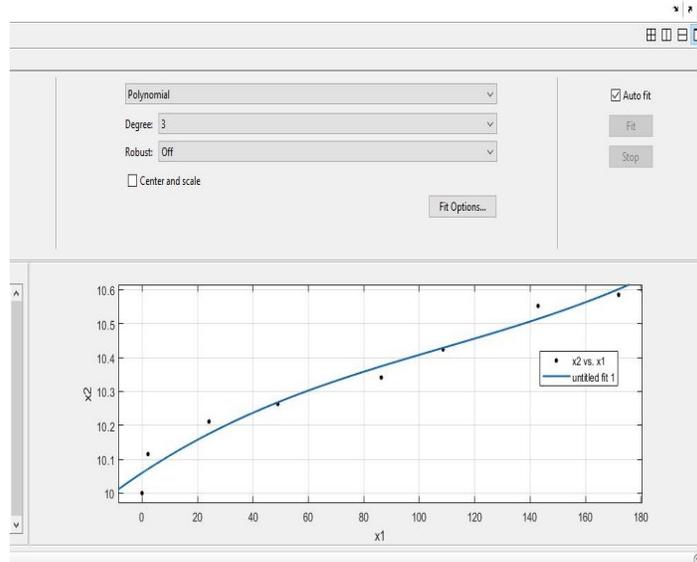


Figura 3.17. Curva que mejor se ajusta a los puntos de la tabla 3.6, que relaciona la variación del diámetro de abertura con el par de torsión producido cuando el sistema está en estado de tensión.

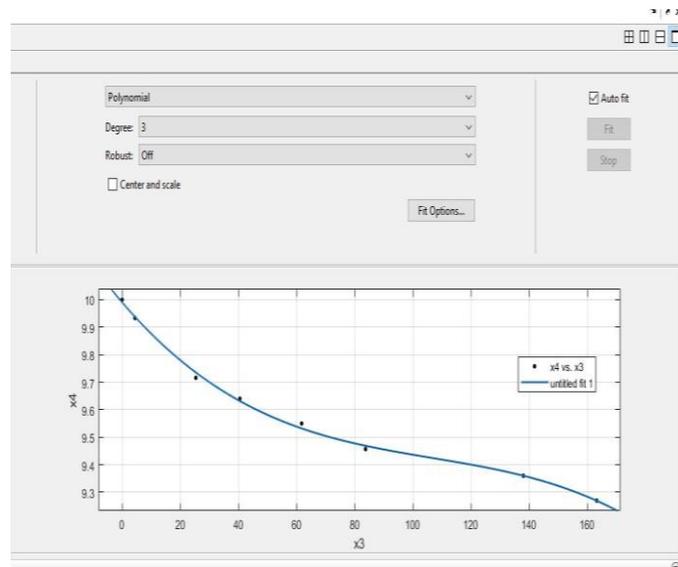


Figura 3.18. Curva que mejor se ajusta a los puntos de la tabla 3.7, que relaciona la variación del diámetro de abertura con el par de torsión producido cuando el sistema está en estado de compresión.

La curva que mejor se ajustó al cambio en los diámetros de abertura de la superficie posterior, cuando el sistema está en estado de tensión, corresponde a una función cubica expresada en la siguiente ecuación:

$$D_T = 8.52 \times 10^{-8} \tau_1^3 - 2.777 \times 10^{-5} \tau_1^2 + 0.0054 \tau_1 + 10, \quad (3.9)$$

donde D_T , es el diámetro posterior del SEL cuando se le aplica una determinada fuerza de tensión debido al par de torsión τ_1 que se produce al hacer girar el engrane principal 1 en el sentido de las manecillas del reloj. El error (RMSE) para este ajuste fue de 0.04906.

Por otro lado, la curva que mejor se ajustó al cambio en los diámetros de abertura cuando el sistema está en estado de compresión, corresponde a un polinomio de grado 2, expresada en la siguiente ecuación:

$$D_C = -3.106 \times 10^{-7} \tau_2^3 + 9.945 \times 10^{-5} \tau_2^2 - 0.0123 \tau_2 + 10, \quad (3.10)$$

donde D_C , es el diámetro posterior del SEL cuando se le aplica una determinada fuerza de compresión debido al par de torsión τ_2 que se produce al hacer girar el engrane principal 2 en sentido contrario de las manecillas del reloj. El error (RMSE) para este ajuste fue de 0.01601.

Para medir el par de torsión cuando el conjunto de engranes secundarios y motores a paso están incorporados en el sistema opto- mecatrónico, se aplicó el mismo método anterior. Esta vez, el giro se realizó mediante el accionamiento de los motores a paso, haciendo recorrer el engrane principal pequeñas longitudes de arco de 0.5mm desde su posición inicial (cuando el SEL está en su estado normal). Nuevamente, para encontrar los diámetros de abertura del SEL sometido a distintas fuerzas de tensión y compresión, por cada longitud de arco recorrido del engrane principal 1 debido al accionamiento de los motores secundarios 1 y 2, se tomaron distintas fotografías utilizando la cámara CCD y se procesaron en ImageJ®.

Los diámetros obtenidos por cada longitud de arco recorrido se muestran en la Tabla 3.8, donde los valores D_T corresponde a los diámetros del SEL de la superficie posterior sometido a fuerzas de tensión, cuando al accionar los motores, los engranes secundarios hacen girar al engrane principal 1 en la dirección de las manecillas del reloj.

Por otro lado, los valores D_C corresponde a los diámetros del SEL de la superficie posterior sometido a fuerzas de compresión, cuando al accionar los motores, los engranes secundarios hacen girar al engrane principal 1 ahora en dirección contraria a las manecillas del reloj.

Una vez conocidos los valores resultantes de los diámetros y encontrando una solución real para τ_1 y τ_2 a partir de las ecuaciones (3.9) y (3.10) obtenidas, fue posible calcular el valor del par de torsión en el engrane principal 1, que proporciona la montura opto-mecatrónica tomando en cuenta los motores y engranes secundarios. Dichos valores calculados del par de torsión que proporciona la montura opto-mecatrónica, se muestran en las tablas 3.9 y 3.10, tomando en cuenta la convención de signos.

Tabla 3.8. Valores de los diámetros de abertura de la superficie posterior por cada longitud de arco y ángulo recorrido del engrane principal 1 cuando los motores a paso son accionados para que el sistema ejerza tensión y compresión lineal sobre el SEL.

Longitud de arco recorrido	Ángulo recorrido	D_T	D_C
0.5mm	1.212°	10.07 mm	9.868 mm
1mm	2.424°	10.171 mm	9.717 mm
1.5mm	3.637°	10.22 mm	9.603 mm
2mm	4.849°	10.286 mm	9.536 mm
2.5mm	6.061°	10.364 mm	9.445 mm
3mm	7.274°	10.435 mm	9.322 mm

Tabla 3.9. Valores del par de torsión calculados a partir de la solución de la ecuación (3.9), que proporciona el sistema motores-engranés y que corresponde a cada valor del diámetro de abertura del SEL cuando son aplicadas fuerzas de tensión.

D_T	τ_1
10.07 mm	-1.870 N·mm
10.171 mm	-23.30 N·mm
10.22 mm	-36.35 N·mm
10.286 mm	-60.59 N·mm
10.364 mm	-81.92 N·mm
10.435 mm	-110.76 N·mm

Tabla 3.10. Valores del par de torsión calculados a partir de la solución de la ecuación (3.10), que proporciona el sistema motores-engranés y que corresponde a cada valor del diámetro de abertura del SEL cuando son aplicadas fuerzas de compresión.

D_C	τ_2
9.868 mm	0.108 N·mm
9.717 mm	27.67 N·mm
9.603 mm	45.556 N·mm
9.536 mm	60.564 N·mm
9.445 mm	95.071 N·mm
9.322 mm	150.09 N·mm

Con los valores de par de torsión de las tablas 3.9 y 3.10, con las relaciones (3.6) y (3.7) y los valores de los ángulos, se obtuvo el par de torsión que los motores a pasos proporcionan a los engranes secundarios por cada valor de ángulo que el engrane principal 1 recorre cuando gira.

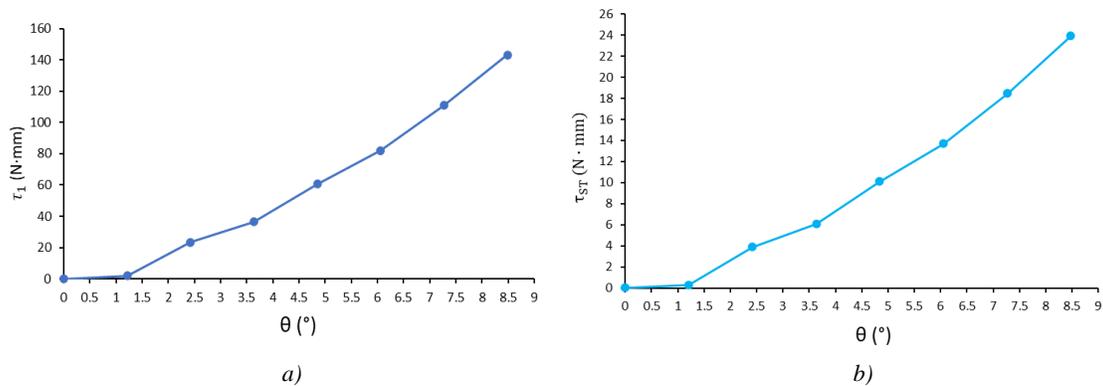


Figura 3.19. Variación de: a) el par de torsión del engrane principal 1 (τ_1) y b) el par de torsión en los engranes secundarios (τ_{ST}) en función del desplazamiento angular del engrane principal, cuando el sistema opto-mecatrónico ejerce fuerzas lineales de tensión sobre la lente.

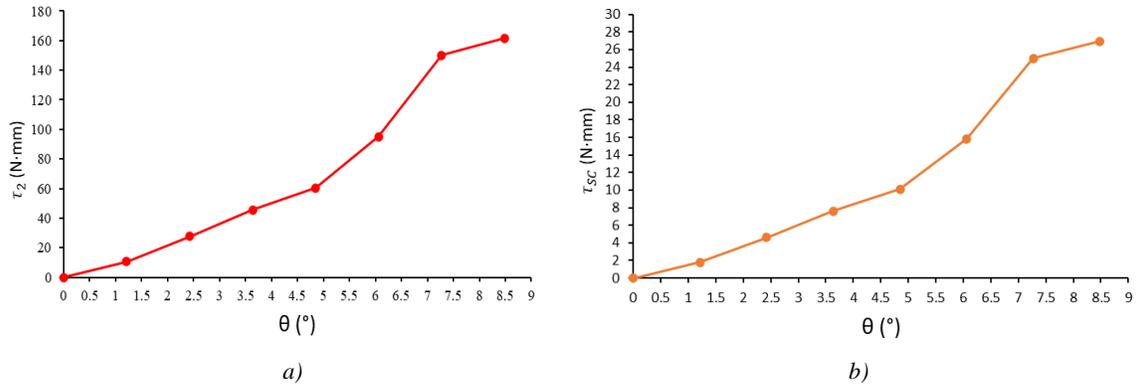


Figura 3.20. Variación de: a) el par de torsión del engrane principal I (τ_2) y b) el par de torsión en los engranes secundarios (τ_{sc}) en función del desplazamiento angular del engrane principal, cuando el sistema opto-mecatrónico ejerce fuerzas lineales de compresión sobre la lente.

En las figuras 3.19 y 3.20, se muestran las gráficas que relacionan el ángulo en cual recorre el engrane principal y el par de torsión que se produce tanto en los engranes secundarios, como en el engrane principal cuándo son accionados los dos motores a pasos. Como se observa, el sistema proporciona un mayor par de torsión cuando se ejerce compresión sobre el SEL.

Las gráficas y las tablas obtenidas en esta sección proporcionaron la información necesaria para determinar las magnitudes de las fuerzas lineales de tensión/compresión que se ejercen en los brazos de la pieza de PDMS. Estos cálculos se detallan en las secciones posteriores.

3.3.3. Par de torsión introducido por el sistema opto-mecatrónico en función de la corriente consumida

Las pequeñas variaciones de la corriente consumida por el sistema opto-mecatrónico para generar un par de torsión específico y, con ello aplicar fuerzas de tensión/compresión lineal al SEL, se obtuvieron mediante la implementación de un sensor de corriente PASPORT™ en el circuito de control de los dos motores a pasos secundarios.

El diagrama del sistema de control y el esquema del circuito de la montura opto-mecatrónica, con la implementación del sensor, se muestra en la Figura 3.21, donde se utilizó una interfaz 850 universal (UI-5000) de la marca PASCO® para la adquirir los datos de las corrientes. Los valores y las gráficas en función del tiempo fueron registrados en un ordenador.

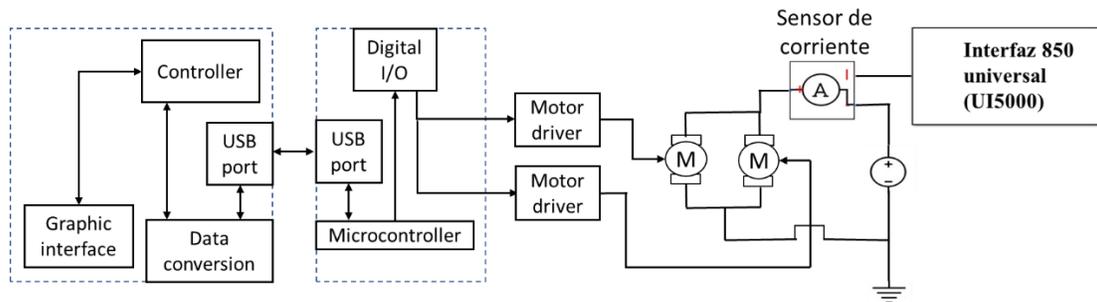


Figura 3.21. Diagrama de control del sistema y esquema del circuito de los dos motores a paso (M) con la implementación del sensor de corriente.

En las figuras 3.22 y 3.23, se muestran las gráficas de la variación de la corriente, las cuales se obtuvieron en el software comercial PASCO CAPSTONE™. En las gráficas, cada pulso representa la corriente consumida por los motores cuando son accionados para producir un par de torsión en un determinado tiempo y con ello someter al SEL en un estado de tensión /compresión lineal.

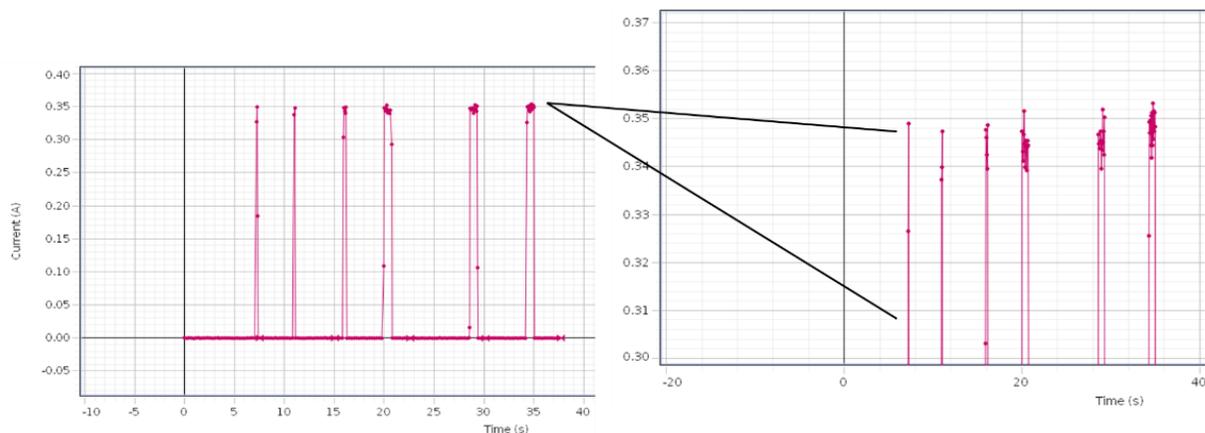


Figura 3.22. Gráfica de la variación de la corriente cuando son accionados los motores en un determinado tiempo para el caso en el que el SEL es sometido a un estado de tensión.

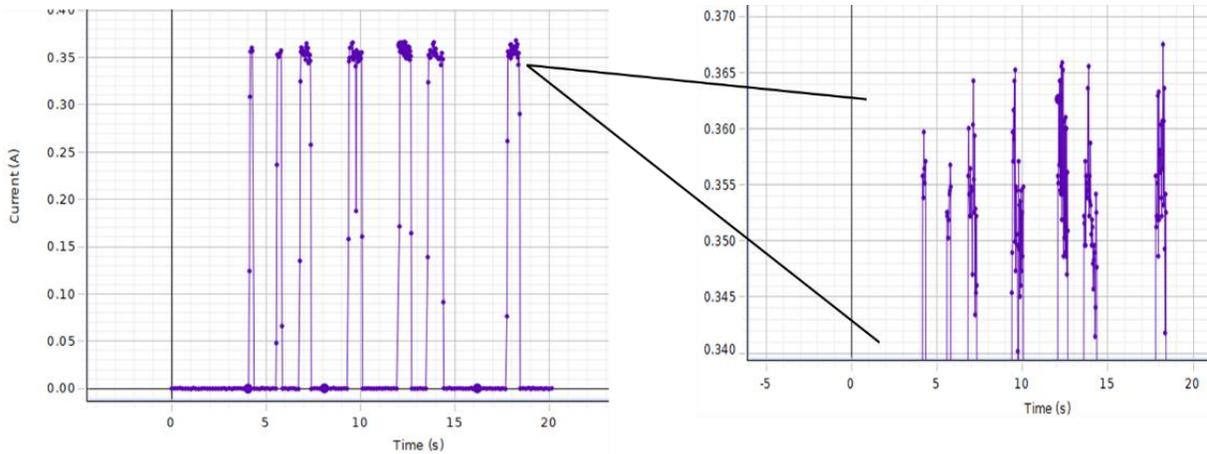


Figura 3.23. Gráfica de la variación de la corriente cuando son accionados los motores en un determinado tiempo para el caso en el que el SEL es sometido a un estado de compresión.

La duración de un pulso se determina en función del par de torsión. En consecuencia, cuanto mayor sea el par de torsión requerido por el conjunto de motores, mayor será la duración de tiempo del pasar de una posición a otra. Por lo tanto, el promedio de los valores de corriente medidos por el sensor en un determinado periodo, durante el cual el engrane principal se desplaza de una posición a otra, puede representar el consumo de corriente en ese intervalo de tiempo.

La Tabla 3.11 muestra el promedio de los valores de corriente eléctrica medidos por el sensor para cada ángulo recorrido por el engrane principal. También se incluyen los valores del par de torsión generado cuando se aplican fuerzas de tensión o compresión lineal al SEL.

Tabla 3.11. Par de torsión que proporciona el sistema motores-engranes y que corresponde a cada valor de la corriente eléctrica que consume el sistema opto-mecatrónico en cada ángulo recorrido por el engrane principal, cuando el SEL se somete a un estado de tensión y compresión.

Longitud de arco recorrido	Ángulo recorrido	Estado de tensión		Estado de compresión	
		Corriente consumida	Par de torsión τ_1	Corriente consumida	Par de torsión τ_2
0.5mm	1.212°	0.318 A	-1.870 N·mm	0.333 A	0.108 N·mm
1mm	2.424°	0.333 A	-23.30 N·mm	0.335 A	27.67 N·mm
1.5mm	3.637°	0.338 A	-36.35 N·mm	0.337 A	45.556 N·mm
2mm	4.849°	0.344 A	-60.59 N·mm	0.338 A	60.564 N·mm
2.5mm	6.061°	0.345 A	-81.92 N·mm	0.3400 A	95.071 N·mm
3mm	7.274°	0.346 A	-110.76 N·mm	0.3408 A	150.09 N·mm

La variación de la magnitud del par de torsión en el engrane principal con respecto a la corriente consumida por el sistema cuando el SEL es sometido a fuerzas de tensión y compresión lineal se muestran en las figuras 3.24 y 3.25 respectivamente.

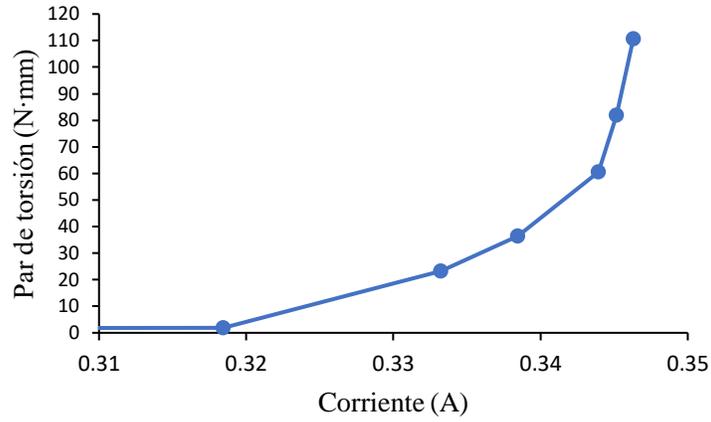


Figura 3.24. Variación del par de torsión producido en el engrane principal 1 con respecto a la corriente consumida cuando el sistema ejerce fuerzas de tensión sobre el SEL.

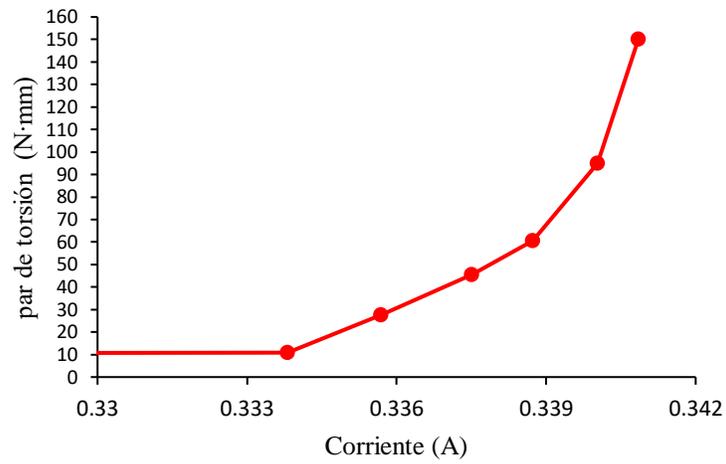


Figura 3.25. Variación del par de torsión producido en el engrane principal 1 con respecto a la corriente consumida cuando el sistema ejerce fuerzas de compresión sobre el SEL.

3.4. Cálculo de las fuerzas lineales de tensión y compresión ejercidas en los brazos de la lente sólida de PDMS

Como se mencionó en la sección 3.3.1, el sistema opto-mecatrónico incorpora un sistema biela-manivela, el cual convierte el par de torsión total del engrane principal 1 (τ_1 y τ_2), en fuerzas lineales de tensión/compresión (F_t y F_c). En las fotografías de la Figura 3.26, se muestra el conjunto de los diez sistemas biela-manivela actuando en cada uno de los diez brazos del SEL cuando se ejerce una tensión y compresión máxima al hacer girar el engrane accionando los motores a pasos un ángulo de 8.486° a la derecha y a la izquierda respectivamente.

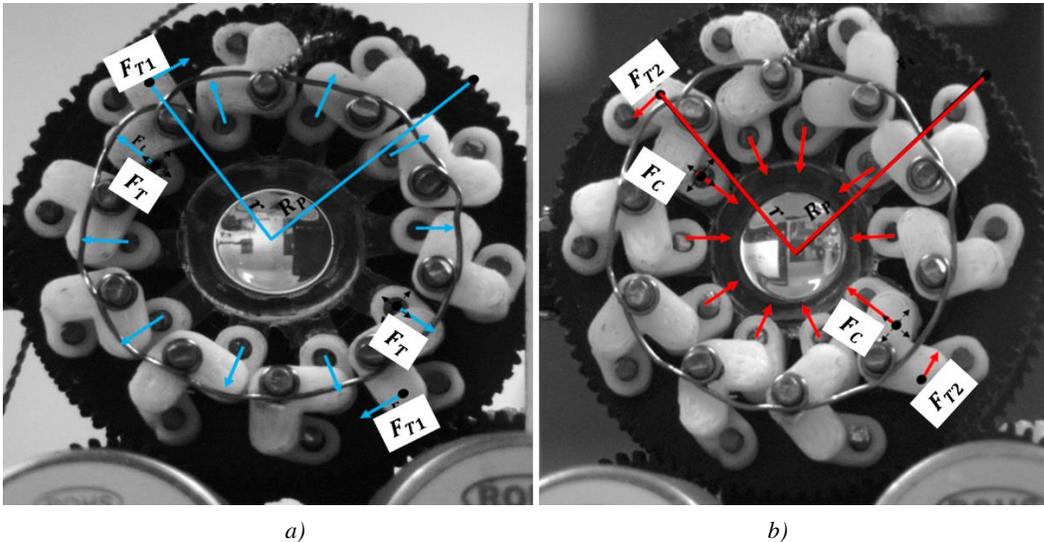


Figura 3.26. Aplicación de las fuerzas lineales de: a) tensión máxima y b) compresión máxima ejercidas por el sistema sobre los brazos del SEL.

En la Figura 3.27, se muestra un diagrama detallado de la fuerza tangencial que actúa en el punto “a” de la biela y la fuerza de reacción que existe en el punto “b”, debido a la resistencia del brazo del SEL cuando el sistema se encuentra en estado de equilibrio, para los casos en que el engrane principal gira en sentido horario y sentido antihorario.

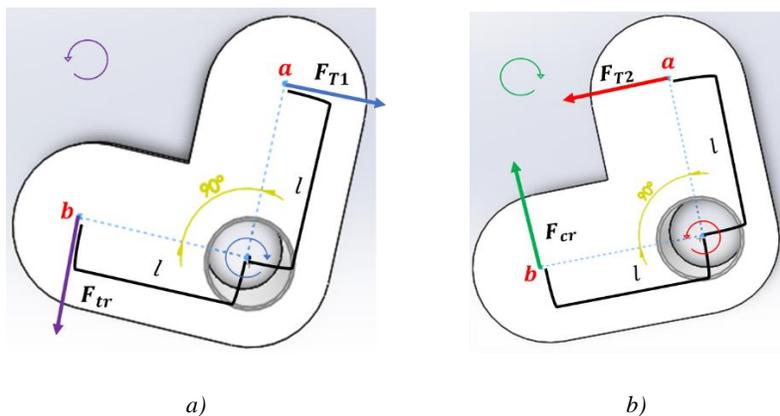


Figura 3.27. Diagrama de fuerzas actuantes en cada una de las bielas cuando a) el giro es en sentido horario y b) el giro es en sentido antihorario. Donde F_{T1} y F_{T2} son fuerzas tangenciales que actúan en el punto a, mientras que F_{tr} y F_{cr} son las fuerzas de reacción de los brazos del SEL.

F_{T1} es la fuerza tangencial en el punto a, el cual une la manivela con la biela superior y que está ubicado a una distancia r_a desde el centro de la lente, F_{tr} , es la fuerza de reacción que se opone al giro de la manivela debido a la resistencia del brazo del SEL, el cual se transmite a partir de la conexión con la biela inferior. Mediante una suma de pares de torsión en la manivela, en un estado de equilibrio, cuando la dirección de giro del engrane principal 1 es en sentido horario, se tiene que:

$$-F_{T1}l + F_{tr}l = 0, \quad (3.11)$$

entonces:

$$F_{tr} = F_{T1}, \quad (3.12),$$

de manera similar, para cuando el engrane principal 1 gira en dirección antihorario se obtiene que:

$$F_{cr} = F_{T2}. \quad (3.13)$$

Por lo tanto, y de acuerdo con “la tercera ley de Newton” las fuerzas lineales de tensión/compresión aplicadas por el sistema opto-mecatrónico a los brazos del SEL, se pueden obtener a partir de las fuerzas tangenciales F_{T1} y F_{T2} , pues se cumplen las siguientes igualdades:

$$F_{T1} = -F_t, \quad (3.14)$$

$$F_{T2} = -F_c. \quad (3.15)$$

En la Figura 3.28a), se muestra un diagrama del engrane principal 1, donde se ubican los puntos de interés P, a y b para poder determinar las fuerzas tangenciales F_{T1} y F_{T2} .

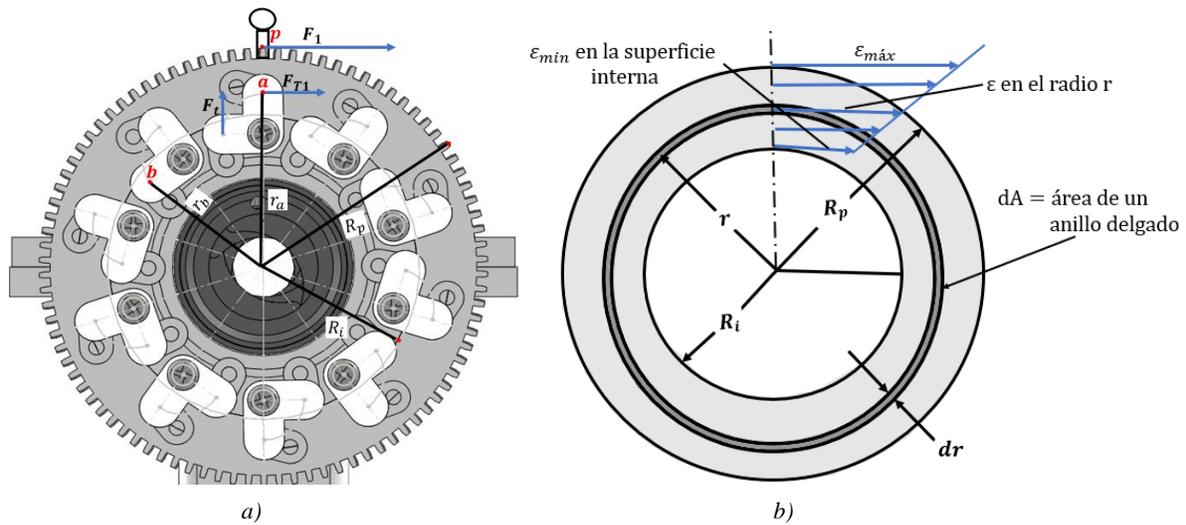


Figura 3.28. a) Engrane principal 1 con el conjunto de sistemas biela-manivela, donde se muestra la fuerza tangencial F_{T1} en el punto “a” debido a la fuerza tangencial máxima F_1 en el punto “P”, cuando el engrane tiene un par de torsión máximo de τ_1 . b) Distribución de esfuerzos cortantes en cada punto del engrane principal 1 visto como un anillo de radio interno R_i y radio externo R_p cuando se aplica un par de torsión máximo τ_1 .

Cuando al engrane principal se le aplica un par de torsión en cuales quiera de las dos direcciones, esté experimenta un par de torsión resistente interno, el cual es el resultado de los esfuerzos generados en todo el engrane. Para que el engrane sometido a esfuerzo esté en equilibrio, en las caras superior e inferior deben actuar esfuerzos cortantes iguales [43].

Si consideramos el engrane principal 1, como un anillo de radio interno R_i y radio externo R_p , tal como se muestra en la Figura 3.28 b), el esfuerzo cortante máximo, $\varepsilon_{m\acute{a}x}$, se puede determinar a partir del par de torsión máximo τ_1 (para el caso en el que el engrane gira en sentido horario), con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = \frac{\tau_1 R_p}{J}, \quad (3.16)$$

donde J es el momento polar de inercia de la sección transversal y para el anillo esta dado como [43,44,45]:

$$J = \frac{\pi}{2} (R_p^4 - R_i^4). \quad (3.17)$$

Por otro lado, el esfuerzo cortante, ε , en cualquier posición radial, r , del anillo circular se expresa en función del esfuerzo cortante máximo, $\varepsilon_{m\acute{a}x}$, en la superficie externa como:

$$\varepsilon = \varepsilon_{m\acute{a}x} \frac{r}{R_p}. \quad (3.18)$$

El esfuerzo cortante actúa de manera uniforme en una pequeña área diferencial, dA , como se ilustra en la Figura 3.28b). Como la fuerza es igual al esfuerzo por unidad de área, existe una fuerza tangencial, dF , en el área dA definida como [43-46]:

$$dF = \varepsilon dA = \varepsilon_{m\acute{a}x} \frac{r}{R_p} dA, \quad (3.19)$$

donde el área dA es la de una franja de longitud igual a la de la circunferencia del anillo por un espesor dr , es decir, $dA = 2\pi r dr$. Sustituyendo este valor de área y la ecuación (3.16) en (3.18), se tiene que:

$$dF = \frac{\tau_1}{J} 2\pi r^2 dr. \quad (3.20)$$

Por tanto, la fuerza tangencial F_{T1} en el punto a del engrane principal 1 cuando gira en sentido horario, se determina integrando la expresión (3.20) desde $r = R_i$ en el radio interno hasta $r = r_a$, que es la distancia del centro del engrane al punto a y, además considerando el momento polar de inercia J de la expresión (3.17), queda que:

$$F_{T1} = \int_{R_i}^{r_a} \frac{\tau_1}{J} 2\pi r^2 dr = \frac{2\pi\tau_1}{\frac{\pi}{2} (R_p^4 - R_i^4)} \int_{R_i}^{r_a} r^2 dr = \frac{4}{3} \tau_1 \frac{(r_a^3 - R_i^3)}{(R_p^4 - R_i^4)}. \quad (3.21)$$

De manera similar, la fuerza tangencial F_{T2} en el punto a del engrane principal 1 para cuando gira en sentido antihorario, se determina como:

$$F_{T2} = \frac{4}{3} \tau_2 \frac{(r_a^3 - R_i^3)}{(R_p^4 - R_i^4)}. \quad (3.22)$$

Los valores de las distancias radiales para el engrane principal, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.12. Valores de las distancias radiales del engrane principal 1.

R_p	24.84 mm
R_i	17 mm
r_a	19.61mm

Sustituyendo estos valores y evaluando los valores de los pares de torsión de los resultados de las tablas 3.9 y 3.10 de la sección anterior en las ecuaciones (3.21) y (3.22), se obtuvieron las fuerzas lineales de tensión y compresión que se aplica a cada uno de los brazos del SEL, así como la fuerza lineal total que el sistema opto-mecatrónico ejerce sobre el SEL.

Los resultados de los valores de la magnitud de las fuerzas lineales de tensión y compresión aplicadas en cada brazo del SEL y que corresponden a cada ángulo recorrido y por cada par de torsión en el engrane principal 1, se desglosan en las tablas 3.13 y 3.14.

Estos resultados también se ilustran en las gráficas de las figuras 3.29 y 3.30, donde se muestran las variaciones de las magnitudes de las fuerzas de tensión/compresión que el sistema opto-mecatrónico ejerce sobre el SEL en función del desplazamiento angular del engrane principal 1.

Tabla 3.13. Valores de la magnitud de la fuerza lineal de tensión aplicada en cada uno de los brazos del SEL, para cada ángulo recorrido y por cada magnitud del par de torsión en el engrane principal 1.

Ángulo recorrido por engrane principal 1	Par de torsión τ_1	Fuerza lineal de tensión por brazo F_t
1.212°	1.870 N·mm	0.022 N
2.424°	23.307 N·mm	0.274 N
3.637°	36.35 N·mm	0.428 N
4.849°	60.60 N·mm	0.714 N
6.061°	81.92 N·mm	0.965 N
7.274°	110.76 N·mm	1.305 N

Tabla 3.14. Valores de la magnitud de la fuerza lineal de compresión aplicada en cada uno de los brazos del SEL, para cada ángulo recorrido y por cada magnitud del par de torsión en el engrane principal 1.

Ángulo recorrido por engrane principal 1	Par de torsión τ_2	Fuerza lineal de compresión por brazo F_c
1.212°	0.108 N·mm	0.127 N
2.424°	27.67 N·mm	0.322 N
3.637°	45.556 N·mm	0.537 N
4.849°	60.564 N·mm	0.714 N
6.061°	95.071 N·mm	1.120 N
7.274°	150.09 N·mm	1.769 N

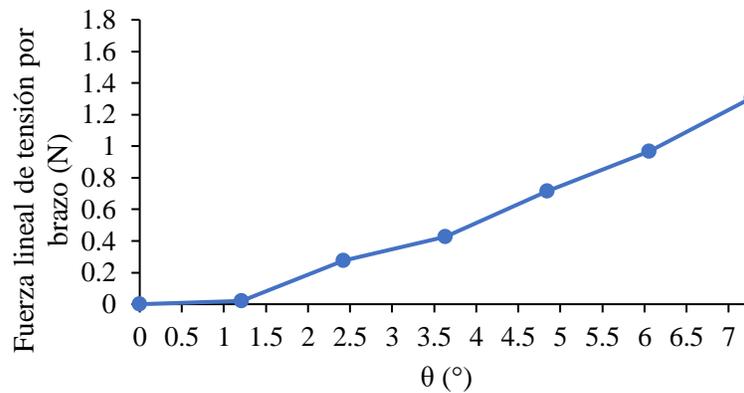


Figura 3.29. Variación de la magnitud de la fuerza lineal de tensión que el sistema opto-mecatrónico ejerce sobre cada brazo del SEL en función del ángulo recorrido por el engrane principal 1.

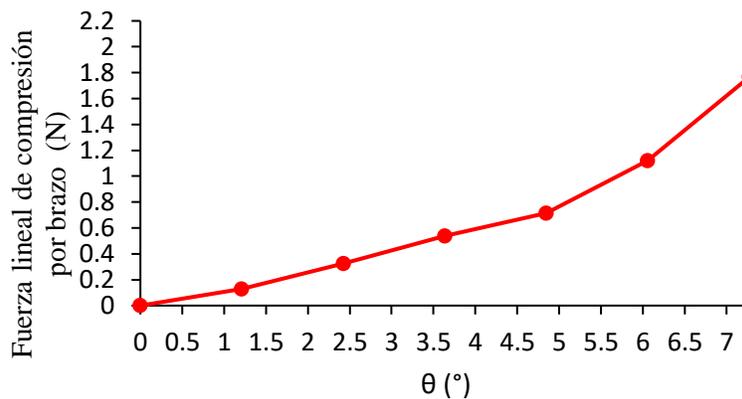


Figura 3.30. Variación de la magnitud de la fuerza lineal de compresión que el sistema opto-mecatrónico ejerce sobre cada brazo del SEL en función de cada ángulo recorrido por el engrane principal 1.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Simulación del comportamiento mecánico de la lente sólida de PDMS

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones del comportamiento mecánico del SEL realizados mediante la técnica de elemento finito, la cual se basa en un método numérico para obtener soluciones aproximadas de problemas con valores límite en diversos campos de la ingeniería [47].

El diseño de la lente y las simulaciones mecánicas fueron realizados utilizando el Software comercial SolidWorks®.

Primero se generó la forma de las superficies que conforman a la lente utilizando la herramienta de “curva conducida por ecuación” en el menú de croquis, donde se introdujo la ecuación de la sagita para las dos superficies dada como:

$$z = z_0 + \frac{\left(\frac{1}{R}\right)y^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)\left(\frac{1}{R}\right)^2 y^2}}, \quad (4.1)$$

donde la constante z_0 es añadida para crear el espesor de la lente, R el radio de curvatura y k la constante cónica. El valor de los parámetros R y k de cada superficie se presentan en la tabla 3.1.

Para crear la pieza, se dibujó el perfil del borde y de los brazos conectados a las dos superficies que forman la lente. Posteriormente se generó el sólido de revolución y los brazos se crearon mediante una matriz circular.

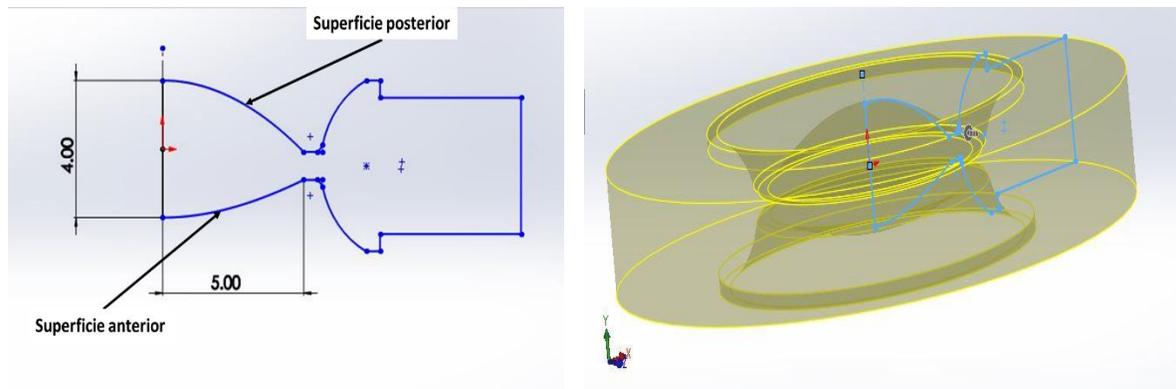


Figura 4.1. a) Perfil de la pieza que contiene a la superficie posterior y anterior del SEL, donde las medidas están dadas en milímetros; b) sólido de revolución generado.

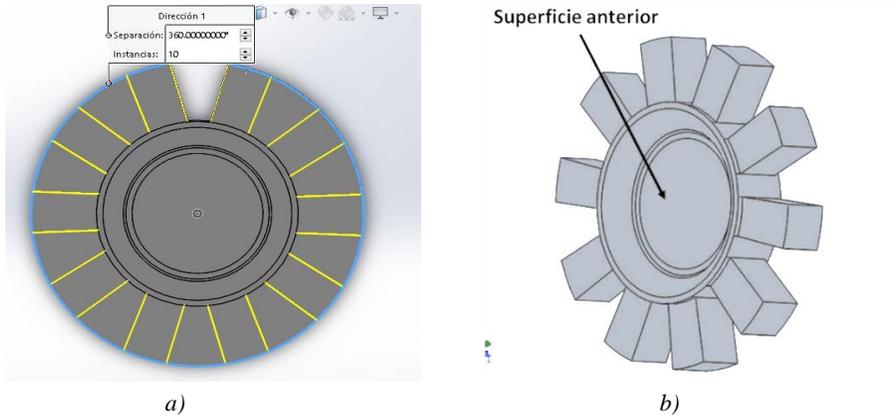


Figura 4.2. a) Brazos de la pieza creadas mediante una matriz circular y b) pieza completa generada.

Una vez generada la pieza, se creó un estudio de análisis estático del modelo, donde, se añadió un nuevo material asignando las propiedades mecánicas del PDMS Sylgar 184 que son descritas en el apartado 2.3.2, así como los parámetros de síntesis obtenidos durante el proceso de curado (código M1 de la tabla 2.1).

En la evaluación, se utilizó una malla sólida basada en curvatura con 4 puntos jacobianos, con elementos cuadráticos de alto orden, un número total de nodos de 34448 y un número total de elementos de 21936. El mallado generado, se muestra en la figura 4.3a).

Para el estudio, se aplicaron fuerzas radiales de tensión y compresión sobre cada uno de los brazos de la pieza, tal como son aplicados mediante el conjunto del par biela-manivela de la montura optomecánica, la distribución de estas fuerzas se muestra en la figura 4.3b) y 4.3c).

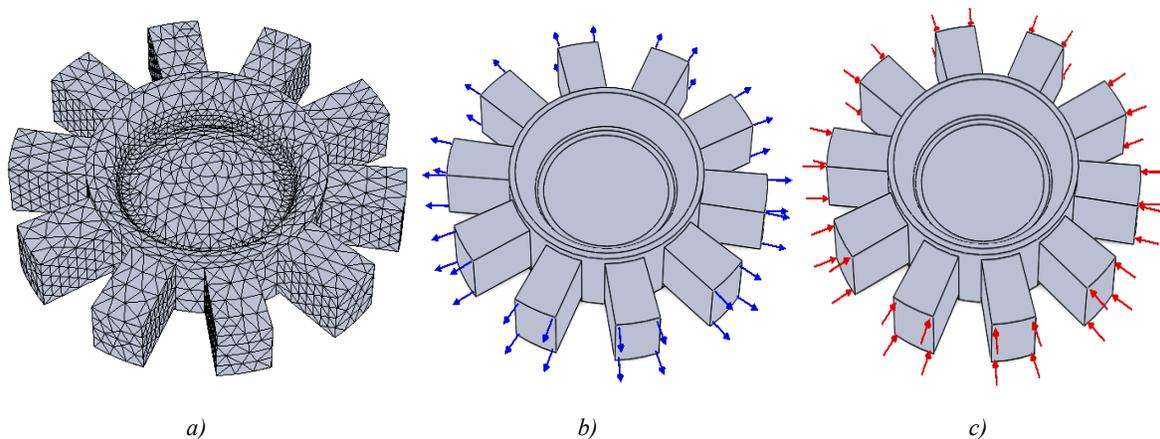


Figura 4.3. a) Mallado de la pieza. Vista isométrica de las fuerzas de b) tensión y c) compresión aplicada sobre los brazos de la pieza.

Se ubicó el centro de masa del modelo donde se creó una pequeña cavidad para definir una geometría fija, la cual sirvió como sujeción de la pieza para la simulación (ver Figura 4.4). Se realizaron un total de 14 simulaciones para el modelo, aplicando los valores de magnitud de las fuerzas de tensión y compresión que el sistema opto-mecánico ejerce sobre cada uno de los brazos del SEL, los cuales fueron calculados en el capítulo 3 y se muestran en las tablas 3.13 y 3.14.

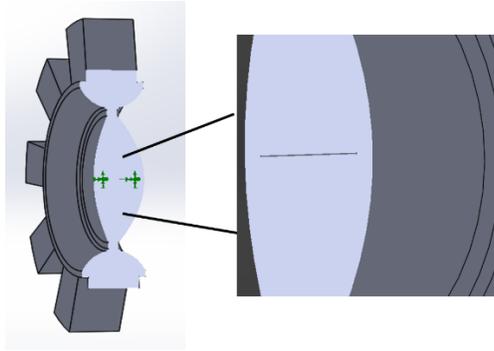


Figura 4.4. Vista de sección lateral de la pieza donde se muestra la geometría fija aplicada y la cavidad creada.

Una vez ejecutadas las simulaciones, se obtuvieron tres soluciones de interés que son: “Tensiones”, “Desplazamientos” y “Deformaciones unitarias”.

En “Tensiones”, SolidWorks® muestra los datos de las fuerzas internas en el material debido a la aplicación y se expresa en unidades de presión. En “Desplazamientos”, se muestra la deformación del modelo debido a la carga aplicada, es decir, se muestra el desplazamiento de cada nodo debido a las fuerzas aplicadas, donde, las unidades están dadas en milímetros. “Deformaciones unitarias” muestra la información de la magnitud de la deformación del modelo en respuesta a una carga, dicha deformación se expresa como el cociente entre el cambio de longitud de una parte del material y su longitud original.

Las imágenes a)-c) de la Figura 4.5, se muestran los resultados de las simulaciones cuando se aplica una fuerza lineal de tensión de 1.689 N por brazo, el cual corresponde a la fuerza lineal de tensión máxima que aproximadamente el sistema opto-mecatrónico ejerce sobre cada brazo. La máxima tensión corresponde a un valor de 0.774 MPa, el máximo desplazamiento corresponde a un valor de 1.660 mm y la máxima deformación unitaria que corresponde a un valor de 0.8047 mm/mm.

Por otra parte, en las imágenes d)-f) de la Figura 4.5, se muestran los resultados de las simulaciones cuando se aplica una fuerza lineal de compresión de 1.907 N por brazo y corresponde a la fuerza lineal de compresión máxima que aproximadamente el sistema opto-mecatrónico ejerce sobre cada brazo. El punto donde se encuentra la máxima tensión corresponde a un valor de 0.870 MPa, el máximo desplazamiento corresponde a un valor de 0.7062 mm y la máxima deformación unitaria corresponde a un valor de 0.3502 mm/mm.

En ambos casos, tanto para la aplicación de fuerzas de tensión como de compresión, los resultados de desplazamientos en el centro de la lente fueron mínimos, tal como se muestra en las imágenes b) y e) de la Figura 4.5. Esto sugiere que en esa región no se observan desplazamientos significativos y, por lo tanto, confirma la precisión de las condiciones definidas en las simulaciones.

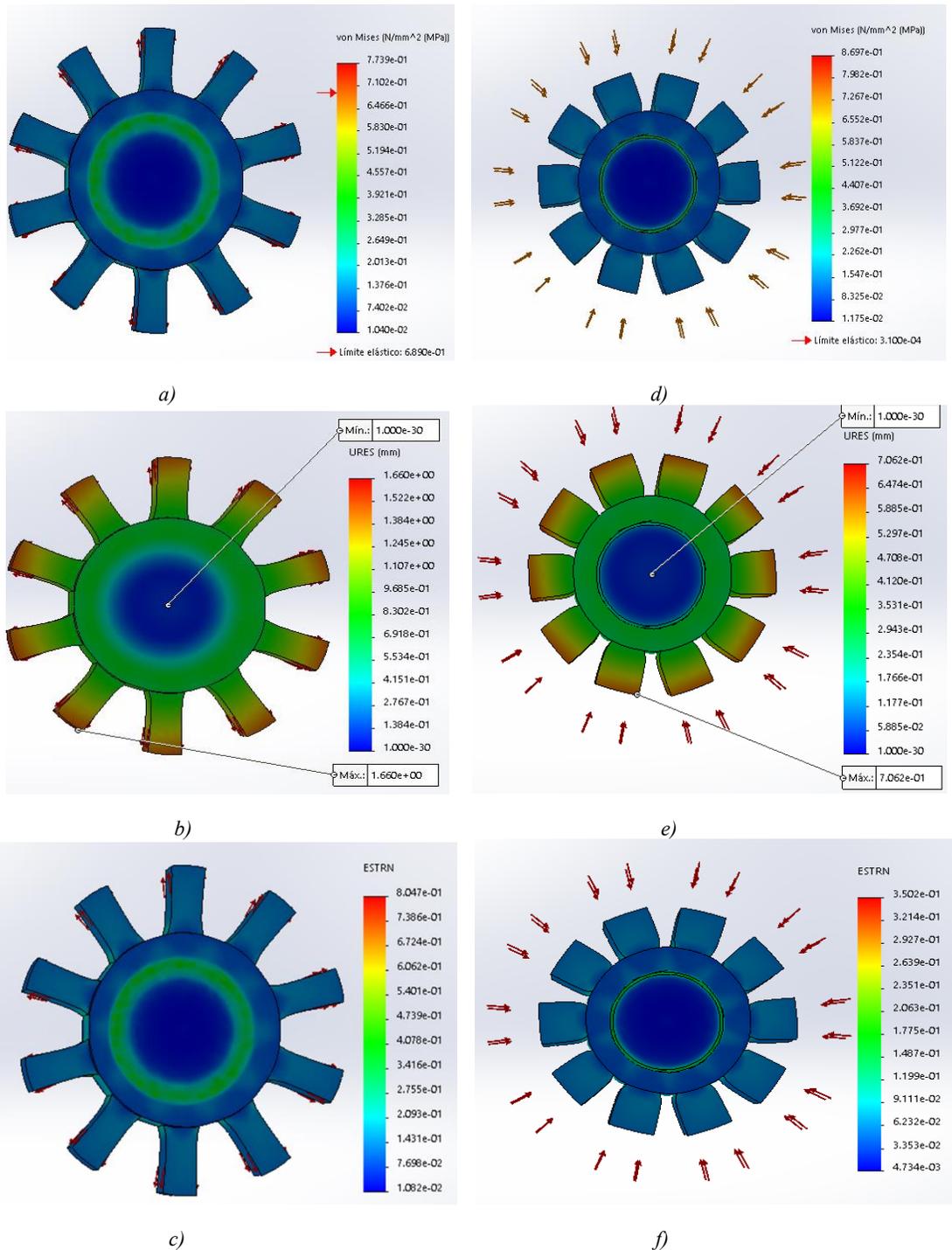


Figura 4.5. Resultados de la simulación del SEL en SolidWorks®: a)-c) tensiones, desplazamientos y deformaciones unitarias cuando se aplica una fuerza lineal de tensión de 1.689 N por brazo; d)-f) tensiones, desplazamientos y deformaciones unitarias cuando se aplica una fuerza lineal de compresión de 1.907 N por brazo.

Una visualización detallada de los resultados de las simulaciones hechas, se muestran en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9. Donde, se observan las distribuciones de tensión y de desplazamiento de las superficies anterior y posterior cuando se aplica una fuerza de tensión lineal por brazo de magnitud: 0.022 N, 0.428 N, 0.965 N, 1.689 N y una fuerza de compresión lineal por brazo de magnitud: 0.127N, 0.537 N, 1.120 N y 1.907 N.

En cada imagen de las figuras también se muestran los puntos de los valores máximos y mínimos de la distribución de tensiones y de desplazamientos por cada fuerza lineal aplicada sobre el SEL. Los resultados revelan una distribución de tensiones más significativa en la superficie posterior de la lente en todos los casos. Las vistas de perfil de la pieza, permite visualizar los cambios en los radios de curvatura de la superficie, en particular el de la superficie posterior, que experimenta un mayor cambio en su curvatura debido a la aplicación de fuerzas lineales de ambos casos.

Por otro lado, los resultados también muestran que existe un mayor desplazamiento de las superficies cuando se aplican fuerzas lineales de compresión y una mayor deformación en la superficie anterior que en la superficie posterior.

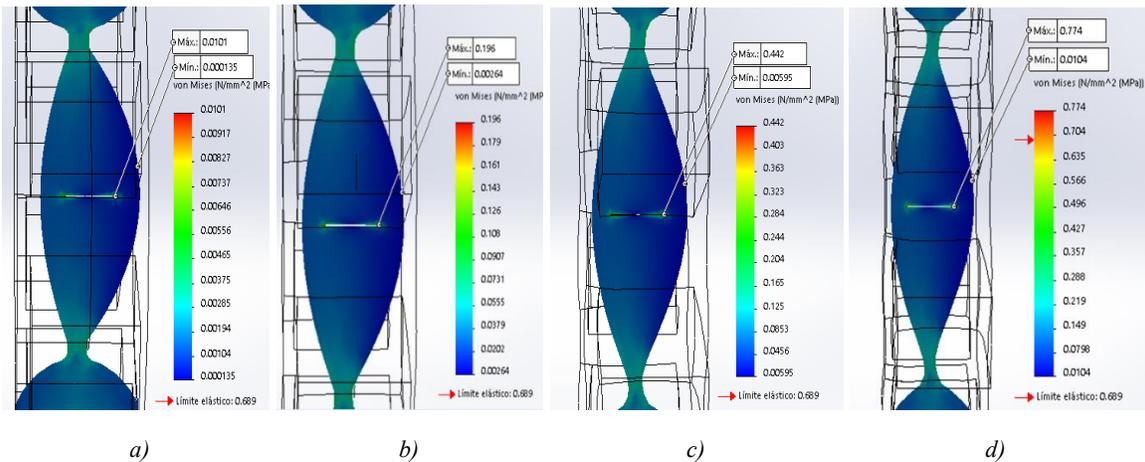


Figura 4.6. Distribución de tensiones sobre el SEL cuando se aplica una fuerza lineal de tensión a cada brazo de: a) 0.022 N, b) 0.428 N, c) 0.965 N y d) 1.689 N.

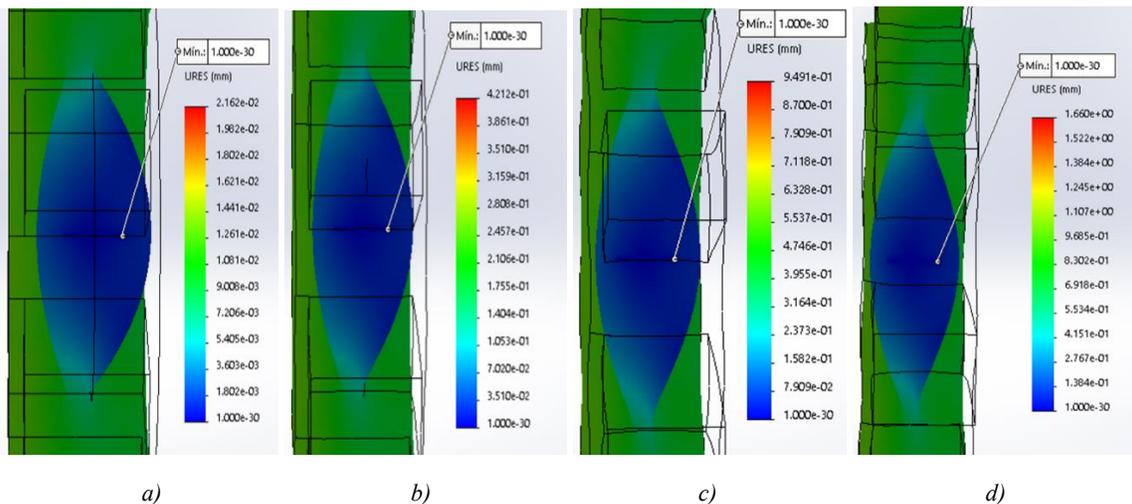


Figura 4.7. Desplazamiento total del SEL cuando se aplica una fuerza lineal de tensión a cada brazo de: a) 0.022 N, b) 0.428 N, c) 0.965 N y d) 1.689 N.

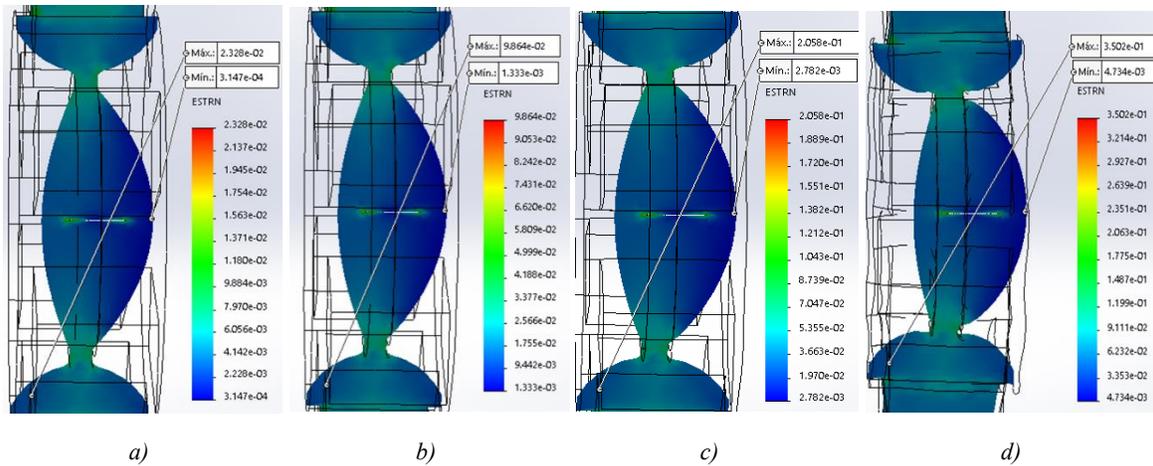


Figura 4.8. Distribución de tensiones sobre el SEL cuando se aplica una fuerza lineal de compresión a cada brazo de: a) 0.127 N, b) 0.537 N, c) 1.120 N y d) 1.907 N.

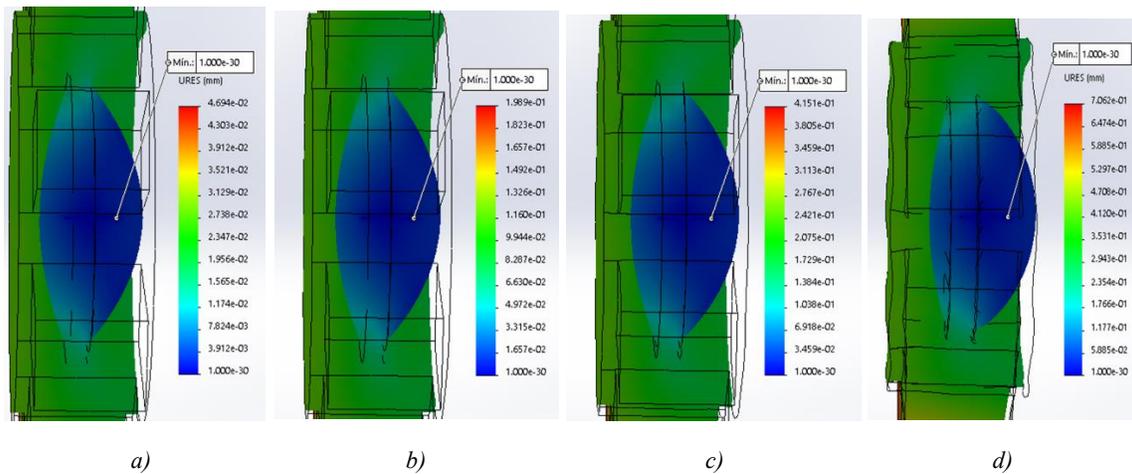


Figura 4.9. Desplazamiento total del SEL cuando se aplica una fuerza lineal de compresión a cada brazo de: a) 0.127 N, b) 0.537 N, c) 1.120 N y d) 1.907 N.

Otro resultado que ofrecen las simulaciones son los datos numéricos de los desplazamientos en cada coordenada tridimensional de los puntos nodales que forman el mallado de la pieza.

La reconstrucción de las nuevas superficies de la lente sólida deformable por cada fuerza lineal aplicada se generó utilizando un código creado en Matlab®, el cual permitió leer los datos numéricos de los resultados de los desplazamientos para los puntos de los nodos superficiales en los ejes X e Y en forma de vectores columna.

La comparación de cada uno de los perfiles de las superficies generadas cuando el SEL es sometido a cada fuerza lineal de tensión/compresión proporcionada por el código en Matlab®, se muestran en las gráficas de las figuras 4.10 y 4.11. En dichas figuras, se observan los cambios aparentes de la curvatura de las superficies cónicas del SEL debido a la deformación producida por la aplicación de las fuerzas lineales en cada uno de los brazos.

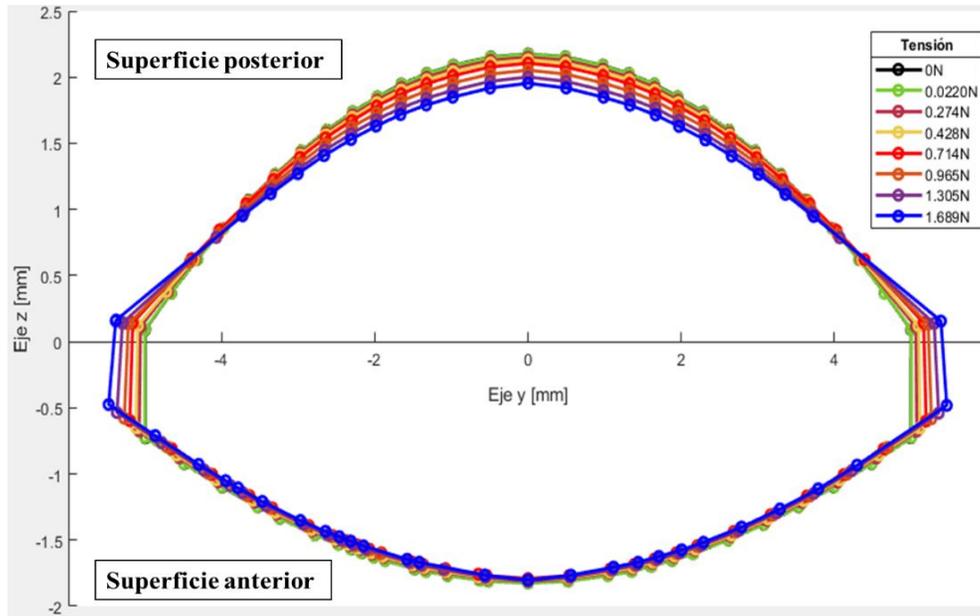


Figura 4.10. Cambio en los perfiles de las superficies del SEL. Cada color representa la superficie formada a una determinada magnitud de fuerza de tensión lineal aplicada a cada brazo del SEL.

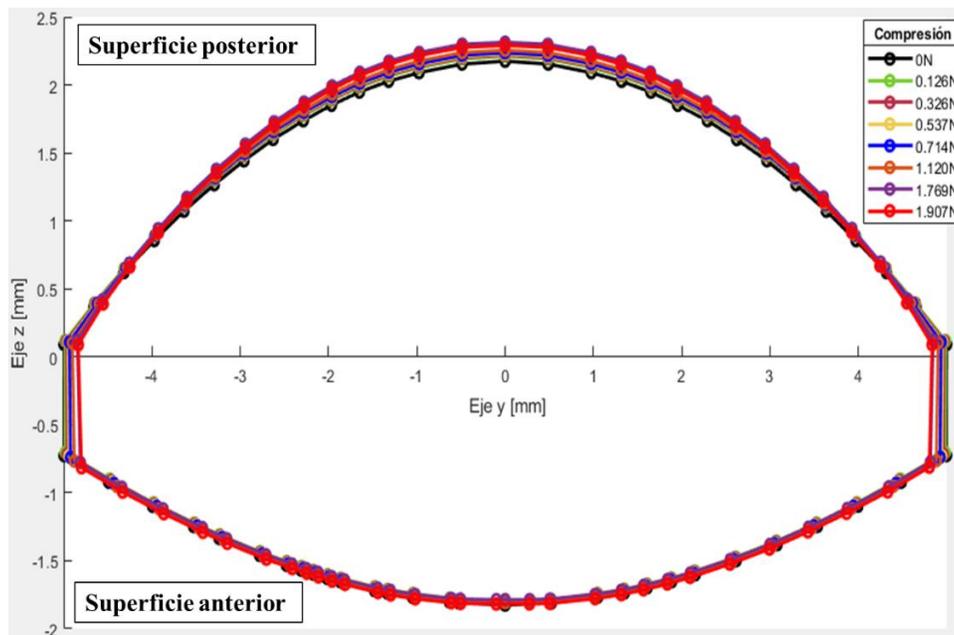


Figura 4.11. Cambio en los perfiles de las superficies del SEL. Cada color representa la superficie formada a una determinada magnitud de fuerza de compresión lineal aplicada a cada brazo del SEL.

4.1.1. Relación entre los cambios de curvatura de la lente sólida de PDMS con los esfuerzos aplicados

Mediante las simulaciones hechas en la sección 4.1 y un análisis de datos utilizando un nuevo código programado en Matlab®, se llevó a cabo un proceso de ordenamiento de los puntos que componen cada superficie. El objetivo de este proceso fue ubicar todas las superficies en un nuevo origen de coordenadas común, como se muestra en las gráficas de las figuras 4.12 y 4.13.

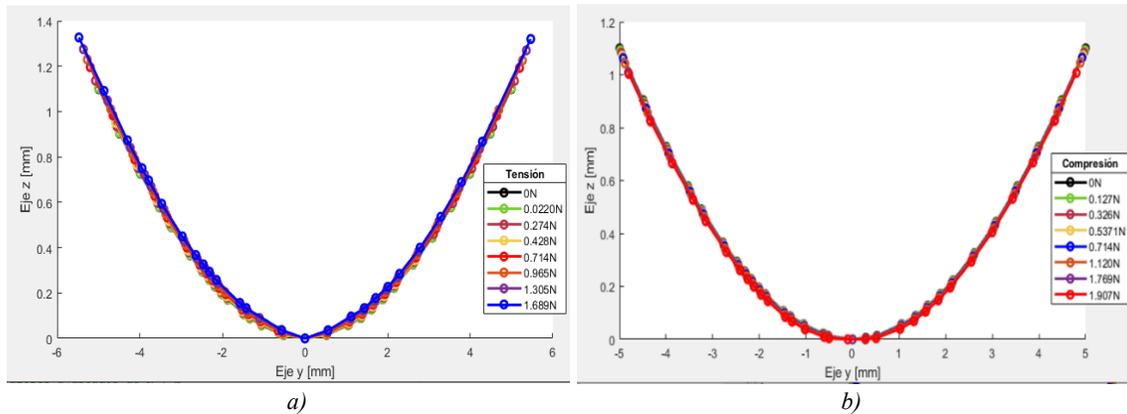


Figura 4.12. Gráfica de puntos que forman cada superficie anterior con el cambio de origen de coordenadas cuando son aplicadas fuerzas de a) tensión y b) compresión.

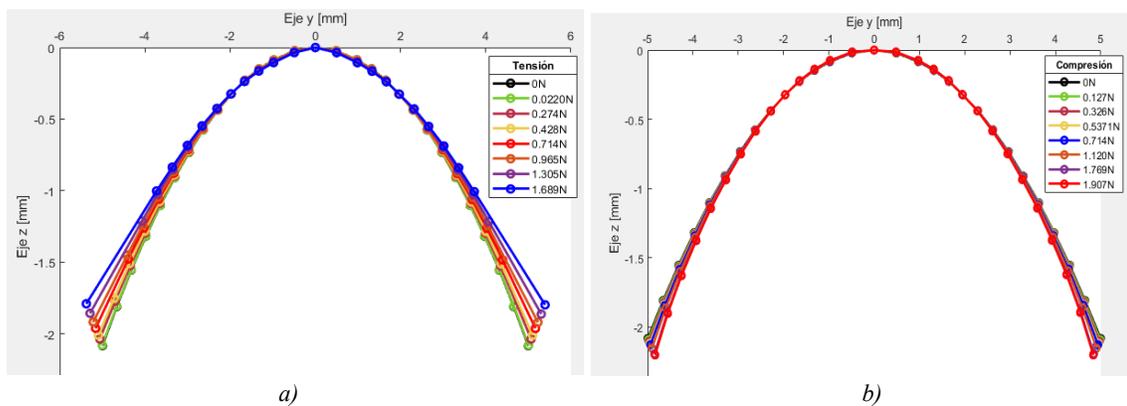


Figura 4.13. Gráfica de puntos que forman cada superficie posterior con el cambio de origen de coordenadas cuando son aplicadas fuerzas de a) tensión y b) compresión.

Una vez reordenados los puntos de cada superficie, se hizo un ajuste en cada una de las curvas a la ecuación (4.1) y con ello se obtuvo el valor del radio de curvatura (R) y la constante de conicidad (k) que mejor se ajusta a las curvas. Dicho ajuste se realizó mediante el método de mínimos cuadrados con el comando "lsqcurvefit" que proporciona Matlab®, el cual utiliza un algoritmo de optimización para minimizar la función de error. Como resultado, se obtuvo un error estándar promedio de los ajustes para las superficies posterior y anterior de 0.004696 y 0.0045587 respectivamente.

En las figuras 4.14 y 4.15, se muestran las gráficas de las variaciones de los valores de los radios de curvatura para la superficie anterior y posterior con respecto a la fuerza de tensión y compresión aplicada.

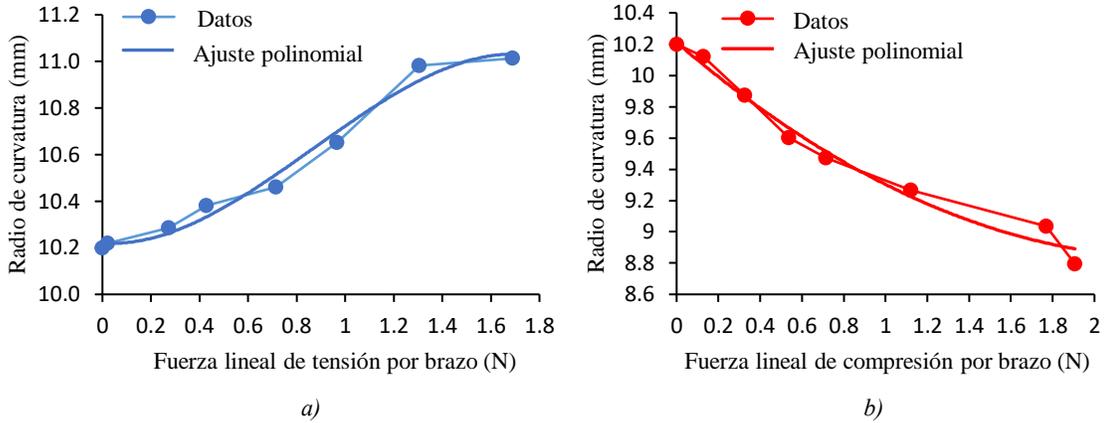


Figura 4.14. Variación del radio de curvatura de la superficie anterior y curva que mejor se ajusta a los datos cuando se aplican fuerzas de: a) tensión y b) compresión en cada brazo del SEL.

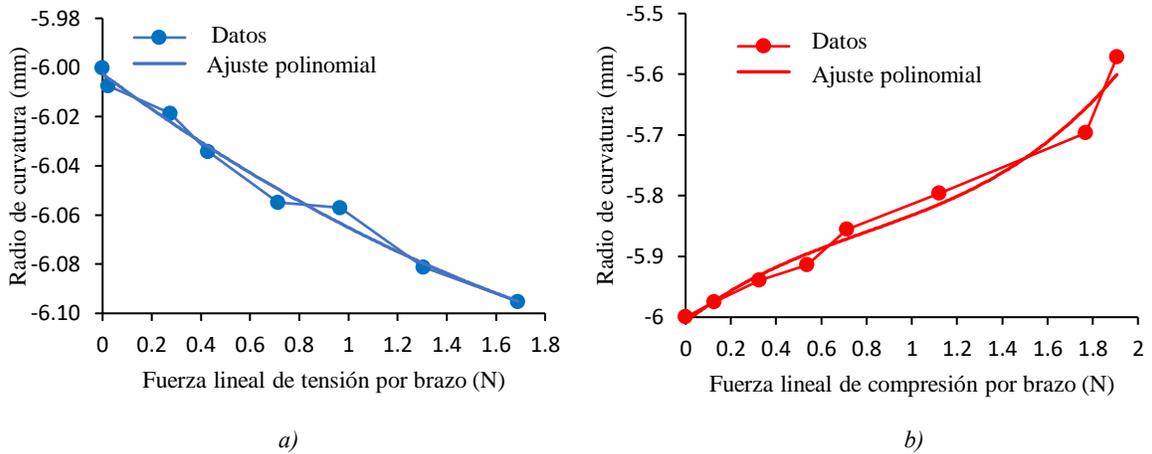


Figura 4.15. Variación del radio de curvatura de la superficie posterior y curva que mejor se ajusta a los datos cuando se aplican fuerzas de: a) tensión y b) compresión sobre cada brazo del SEL.

En las gráficas también se muestran las curvas que mejor se ajustan a las variaciones del radio de curvatura cuando el sistema se encuentra en estado de tensión o compresión. A continuación, se presentan las ecuaciones resultantes de este ajuste que describen los cambios en la curvatura de la superficie anterior del SEL en función de las fuerzas de tensión (F_t) y compresión (F_c) aplicadas en cada brazo:

$$R_{At} = -0.3594F_t^3 + 0.9355F_t^2 - 0.0749 + 10.22, \quad (4.2)$$

$$R_{Ac} = 0.2383F_c^2 - 1.147F_c + 10.21, \quad (4.3)$$

donde R_{At} y R_{Ac} son los radios de curvatura de la superficie anterior para las fuerzas aplicadas respectivamente. Las desviaciones estándar obtenidas para este conjunto de ecuaciones fueron de 0.05576 y 0.0788.

De igual manera, el par de ecuaciones que describen los cambios de radio de curvatura de la superficie posterior en función de la fuerza lineal aplicada en cada brazo del SEL son:

$$R_{pt} = 0.01123F_t^2 - 0.07366F_t - 6.003, \quad (4.4)$$

$$R_{Pc} = 0.0825F_c^3 - 0.1979F_c^2 + 0.2907F_c - 6.007, \quad (4.5)$$

donde ahora R_{Pt} y R_{Pc} son los radios de curvatura de la superficie posterior para las fuerzas de tensión y compresión aplicadas. Las desviaciones estándar obtenidas para este par de ecuaciones fueron de 0.0645 y 0.0298 respectivamente.

Por otro lado, en las figuras 4.16 y 4.17, se muestran las gráficas con los cambios de la constante de conicidad para cada superficie en relación con la fuerza de tensión y compresión aplicada. Además, también se realizó un proceso de ajuste de curvas utilizando los datos recopilados, lo que permitió obtener expresiones que describen estos cambios en las constantes de conicidad.

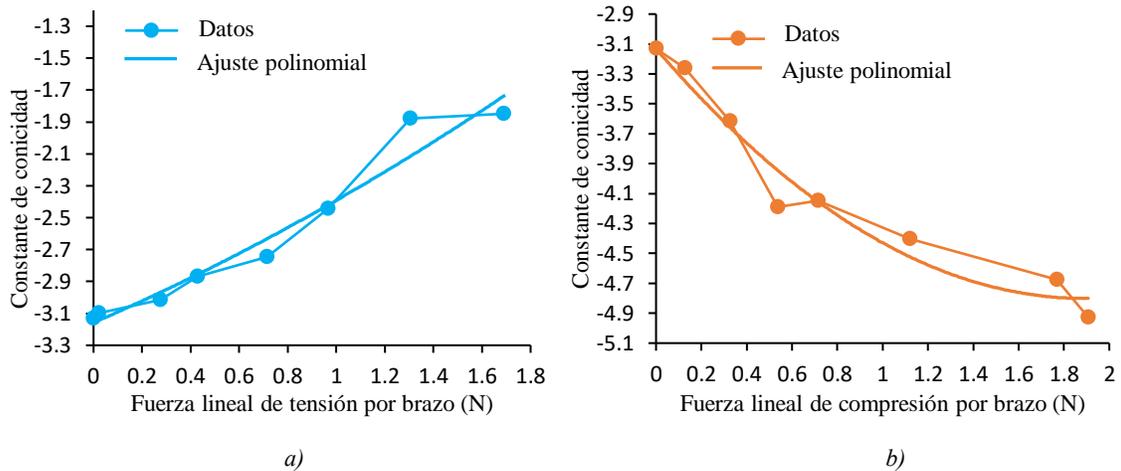


Figura 4.16. Variación de la constante de conicidad de la superficie anterior y curva que mejor se ajusta a los datos cuando se aplican fuerzas de: a) tensión y b) compresión en cada brazo del SEL.

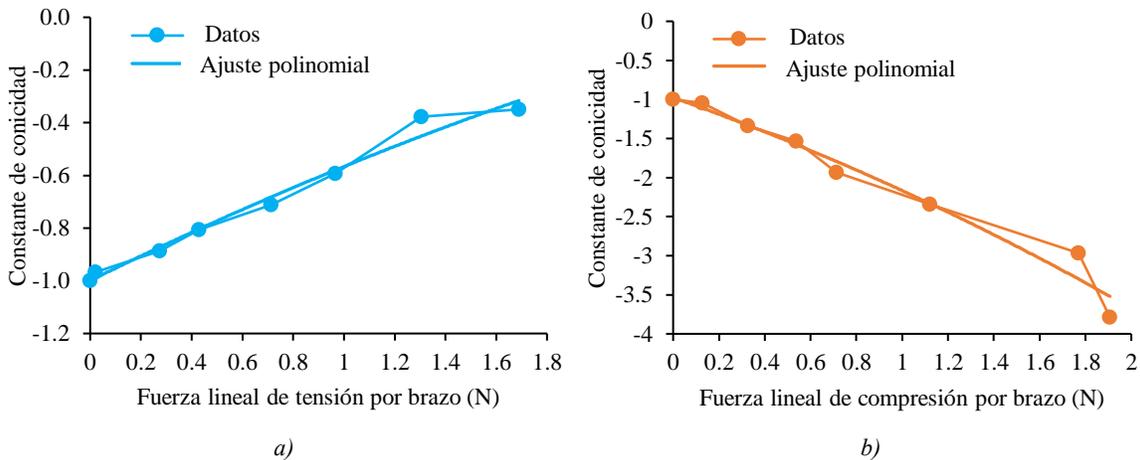


Figura 4.17. Variación de la constante de conicidad de la superficie posterior y curva que mejor se ajusta a los datos cuando se aplican fuerzas de: a) tensión y b) compresión en cada brazo del SEL.

Los cambios de la constante de conicidad de la superficie posterior en función de la fuerza lineal de tensión y compresión aplicadas están dados por las siguientes expresiones:

$$k_{At} = 0.1075F_t^2 + 0.6592F_t - 3.158, \quad (4.6)$$

$$k_{Ac} = 0.465F_c^2 - 1.764F_c - 3.132, \quad (4.7)$$

donde k_{At} y k_{Ac} son las constantes de conicidad de la superficie anterior para las fuerzas de tensión y compresión aplicadas. Las desviaciones estándar obtenidas fueron de 0.1307 y 0.1502 respectivamente.

Para la superficie posterior, las ecuaciones que describen el cambio en la constante de conicidad en función de la fuerza lineal aplicada se muestran a continuación:

$$k_{Pt} = -0.04112F_t^2 + 0.4738F_t - 0.9992, \quad (4.8)$$

$$k_{Pc} = -0.1579F_c^2 - 1.0323F_c - 0.9768, \quad (4.9)$$

donde k_{Pt} y k_{Pc} son las constantes de conicidad de la superficie posterior para las fuerzas de tensión y compresión aplicadas. Las desviaciones estándar para este caso fueron de 0.04048 y 0.2056.

4.2. Simulación del comportamiento óptico de la lente sólida de PDMS

Para llevar a cabo las simulaciones del comportamiento óptico, se empleó el software comercial de diseño óptico Zemax®. En dicho software, se generaron las superficies que componen el SEL utilizando los radios de curvatura y las constantes de conicidad que se obtuvieron en la sección anterior. Estos parámetros están relacionados con la fuerza lineal que la montura aplica a cada brazo del SEL.

La primera superficie se creó incorporando los datos de la tabla 3.1 del capítulo 3, la cual proporcionan los parámetros geométricos de la lente en su estado inicial, es decir, cuando no se le aplica ninguna fuerza lineal. La Figura 4.18 muestra el diseño del SEL generado con Zemax® en diferentes vistas, con un diámetro de apertura de 10 mm y un espesor de 4 mm.

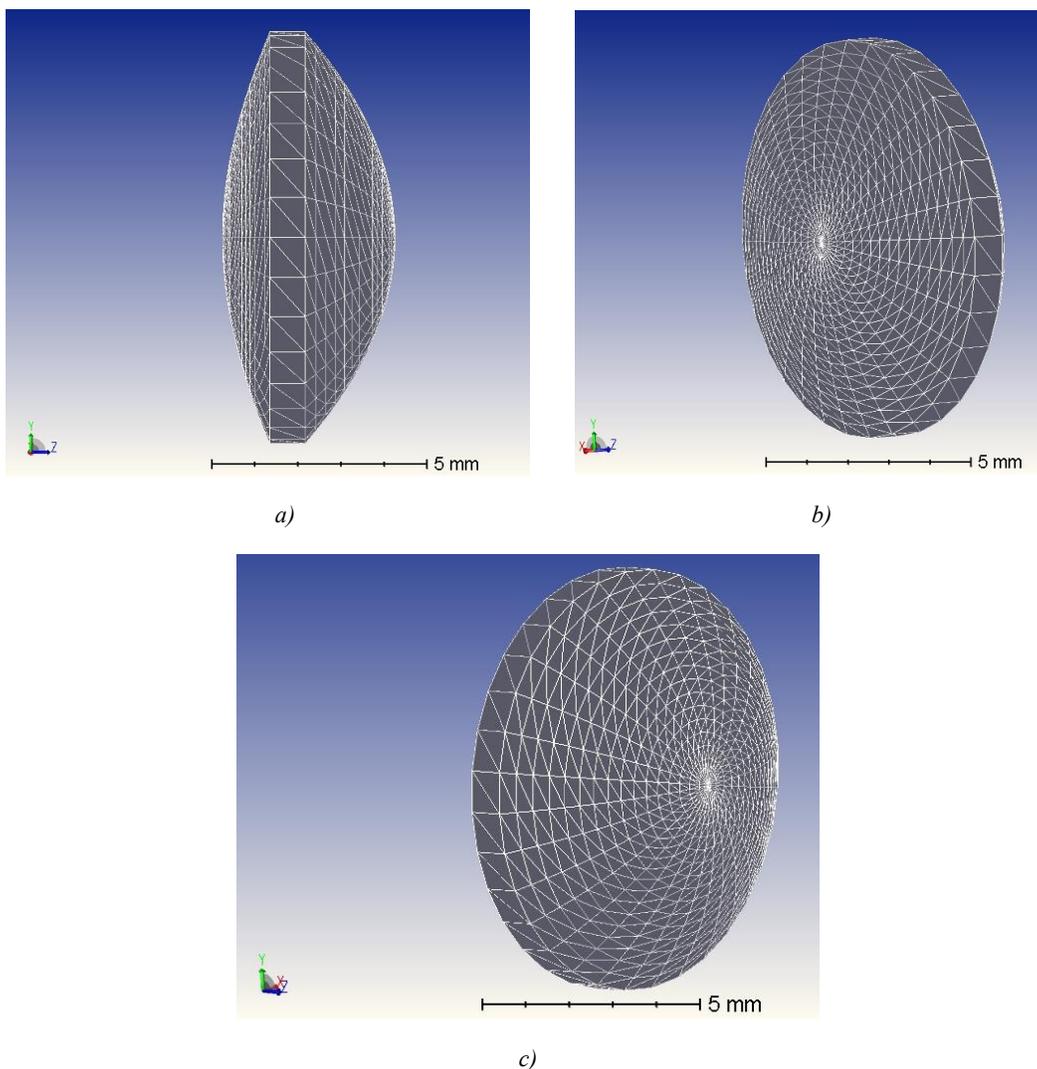


Figura 4.18. Diseño del SEL hecho en Zemax®: a) vista de perfil, b) vista frontal y c) vista posterior.

En la simulación, se obtuvo una distancia focal efectiva sin aplicarle ninguna fuerza al SEL de 9.9268 mm. Para una fuerza de tensión lineal de 1.6865 N aplicada en cada brazo del SEL, se obtuvo una distancia focal efectiva de 10.2119 mm. Mientras que cuando se aplica una fuerza de compresión lineal en cada brazo del SEL de 1.907 N, se obtuvo una distancia focal efectiva de 9.073 mm. En la Figura 4.19, se muestran los diagramas de la simulación en Zemax®, en donde se obtuvieron dichas distancias focales y en la Figura 4.20, se muestran las gráficas de la variación de la distancia focal efectiva de acuerdo con la fuerza lineal aplicada.

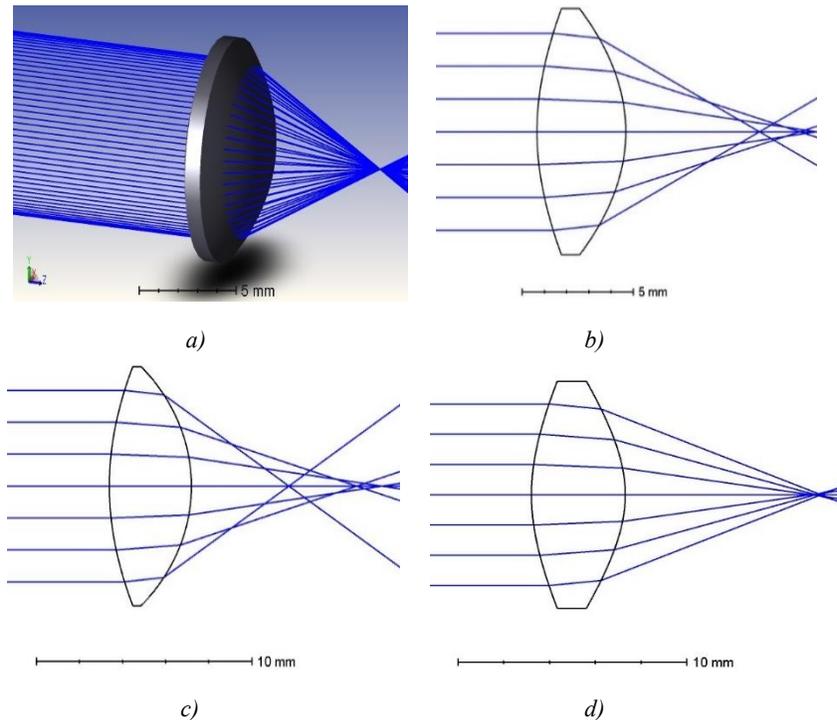


Figura 4.19. Simulación en Zemax® del SEL: a) vista 3D del trazo de rayos, b) estado normal, c) bajo tensión a una fuerza lineal en cada brazo de 1.6865 N y d) bajo compresión a una fuerza lineal en cada brazo de 1.907 N.

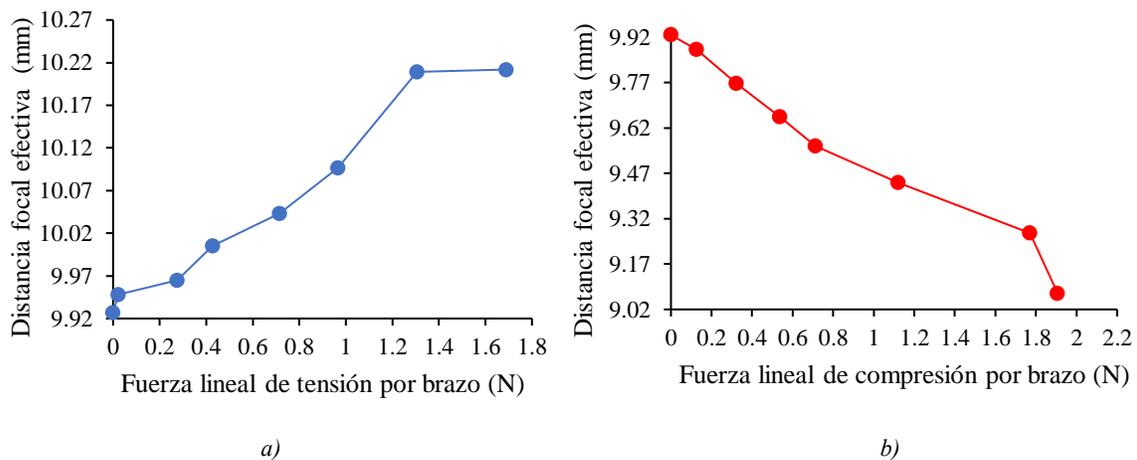


Figura 4.20. Variación de la distancia focal efectiva del SEL de acuerdo con: a) la fuerza lineal de tensión aplicada a cada brazo y b) la fuerza lineal de compresión aplicada a cada brazo.

4.3. Mediciones de la distancia focal posterior ($d.f.p$) de la lente sólida de PDMS al aplicarle estímulos mecánicos de compresión y tensión

En esta sección, se describe el procedimiento y los resultados para la medición de las distancias focales posteriores de la lente sólida de PDMS al someterse a las fuerzas lineales de tensión y compresión proporcionadas por el sistema opto-mecatrónico.

Para obtener los valores de las distintas distancias focales posteriores del SEL, se empleó el arreglo experimental del diagrama de la Figuras 4.21 y la fotografía de la Figura 4.22.

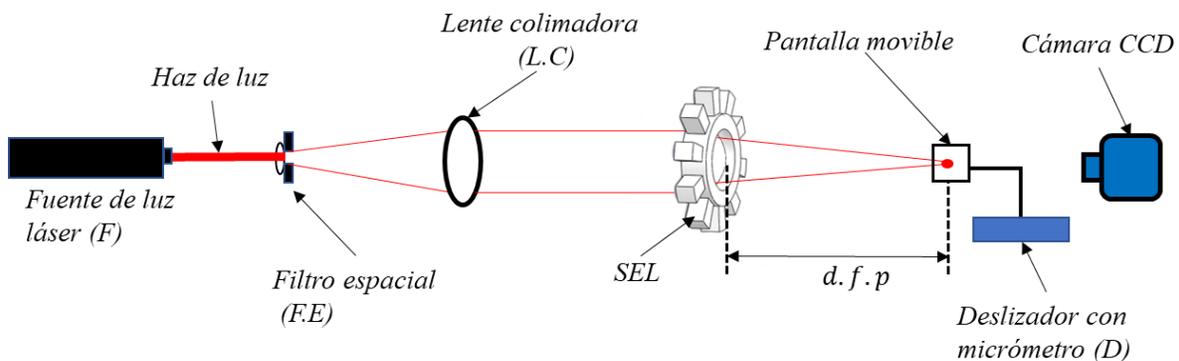


Figura 4.21. Diagrama del arreglo experimental implementado para medir las distancias focales posteriores del SEL.

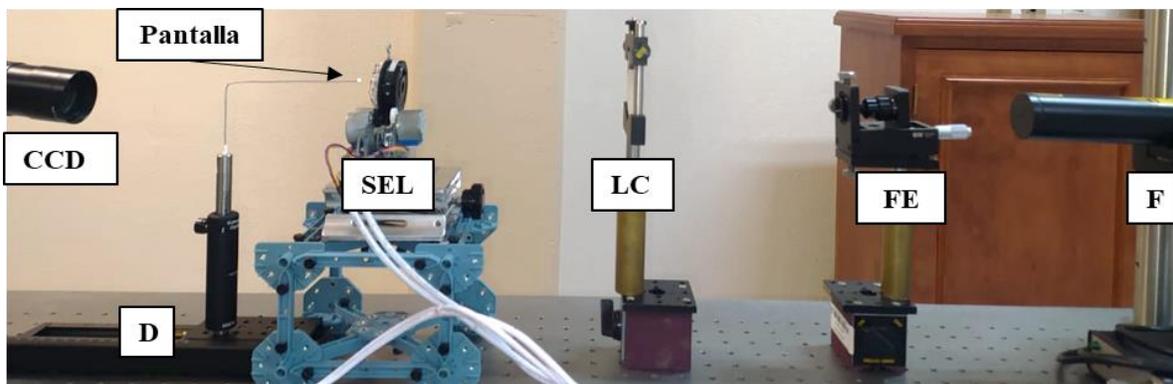


Figura 4.22. Arreglo experimental para medir las distancias focales posteriores del SEL.

En el arreglo experimental de la Figura 4.22, se utilizó como fuente de luz un láser de He-Ne (F) con una longitud de onda de 632.8 nm, se utilizó un sistema de filtro espacial (FE), el cual cuenta con un objetivo de microscopio y un pinhole de la marca comercial Edmund®, también se utilizó una lente de la marca comercial Thorlabs® como sistema de colimación (LC), la montura opto-mecatrónica donde se colocó el SEL, una pantalla de tamaño de 6x6 mm de papel pergamino vegetal, el cual se sostuvo mediante un poste y un soporte para postes, que a su vez, fue acoplado a un micrómetro con plataforma deslizante (D). Al final, fue incorporada una cámara CCD que enfoca directamente sobre la pantalla.

Para determinar las distancias focales posteriores, se hizo un análisis de manchas formadas en la pantalla y que fueron capturadas por la cámara CCD. La menor mancha donde se concentró la mayor

intensidad de luz correspondió al punto focal. Una vez encontrado el punto focal, la distancia focal posterior ($d.f.p$), se determinó midiendo la distancia entre el vértice de la superficie posterior de la lente hasta la pantalla.

Para poder encontrar el primer punto focal, que correspondió al punto focal cuando la lente se encuentra en su estado normal, es decir, sin aplicarle ningún tipo de esfuerzo, la pantalla se movió hacia delante y hacia atrás en un solo eje hasta encontrar el punto de luz más pequeño mejor definido y con mayor intensidad. El movimiento de la pantalla se realizó mediante un micrómetro con una plataforma deslizante, el cual contiene una perilla que, al completar un giro, la plataforma junto con la pantalla se deslizaba $500 \mu\text{m}$ de su posición inicial (ver Figura 4.23). El valor en donde el micrómetro indicó una vez encontrado el punto focal para el SEL en su estado normal, se estableció como valor de referencia inicial.

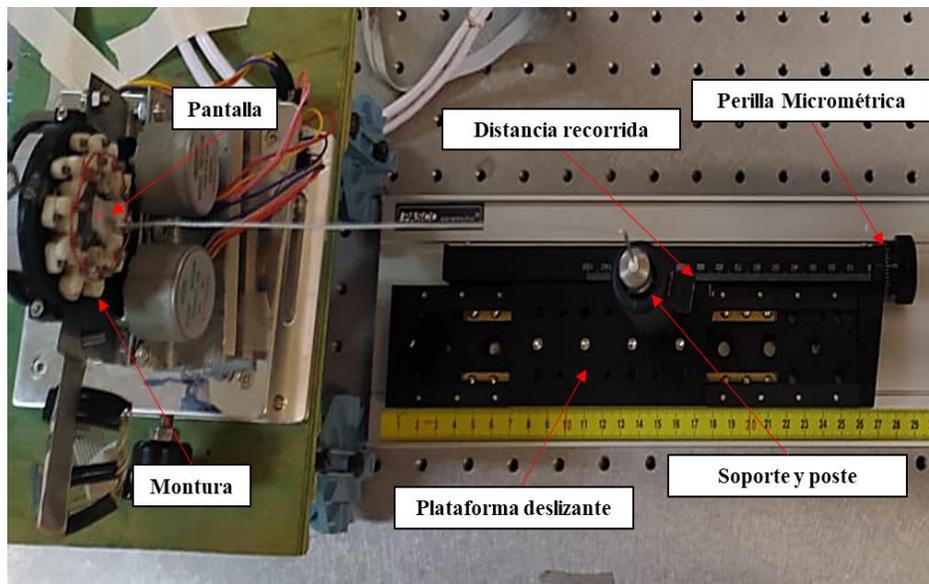


Figura 4.23. Fotografía que muestra de manera detallada el mecanismo de desplazamiento de la pantalla para obtener los puntos focales.

La distancia focal posterior que correspondió al estado normal del SEL, cuando se mantienen sus parámetros geométricos iniciales, se determinó midiendo la distancia del vértice de la superficie posterior del SEL a la pantalla utilizando la parte para medir superficies de profundidad de un vernier.

Posteriormente, se midieron los siguientes puntos focales correspondientes a cada fuerza de tensión y compresión aplicadas al SEL, desplazando la pantalla. Luego sumando y restando las distancias desplazadas a la distancia focal posterior inicial a partir del valor de referencia que el micrómetro indicó, se encontraron los valores de cada distancia focal posterior. En la Figura 4.24, se muestra una secuencia de imágenes capturadas con la cámara CCD durante el proceso en el cual se encuentra el punto focal cuando se aplica a cada brazo del SEL una fuerza de tensión lineal de 1.305 N , mediante el desplazamiento de la pantalla alejándose del SEL. El diámetro de la mancha de mayor intensidad fue de 0.613 mm , con una distancia focal posterior medida de aproximadamente 9.333 mm .

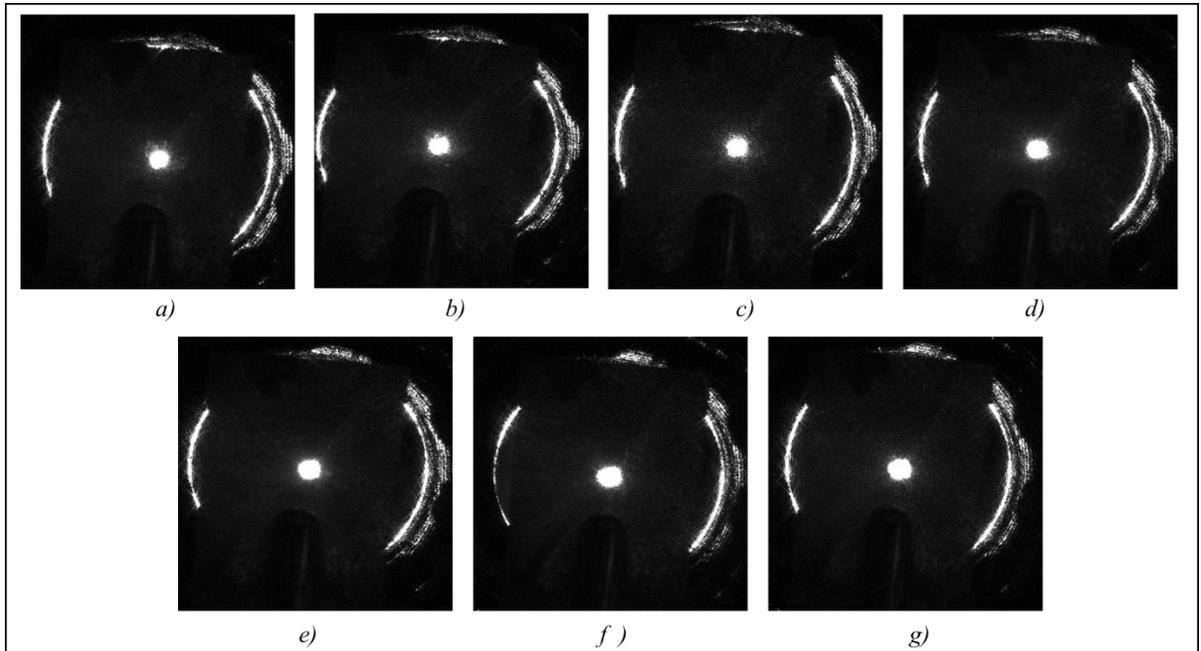


Figura 4.24. Secuencia de imágenes de las manchas de luz generadas cuando se aplica una fuerza lineal de tensión a cada brazo del SEL de: a) 0 N, b) 0.022 N, c) 0.274 N, d) 0.428 N, e) 0.714 N, f) 0.965 N y g) 1.305 N. En este caso, la imagen g) muestra el punto focal, en el cual, el contorno de la mancha central está completamente definido y que corresponde a la fuerza total de tensión máxima aplicada al SEL, con una longitud focal posterior medida de aproximadamente 9.333 mm y con un diámetro de la mancha de aproximadamente 0.613 mm.

Por otro lado, en la Figura 4.25 también se muestra otra secuencia de imágenes capturadas con la cámara CCD, durante el proceso, en el cual se encuentra el punto focal cuando la montura optomecánica ejerce sobre cada brazo del SEL una fuerza de compresión lineal de 1.769 N, mediante el desplazamiento de la pantalla hacia el SEL. El diámetro de la mancha de mayor intensidad capturada fue de 1.011 mm, con una distancia focal posterior medida de aproximadamente 5.570 mm.

Es importante notar que en las figuras 4.24 y 4.25, las imágenes de los incisos a)-f) presentan manchas de luz que no están completamente definidas ni en el contorno ni en el centro. Sin embargo, en las imágenes de los incisos g), se obtienen las manchas con mayor intensidad y definición. Estas últimas corresponden a las fuerzas máximas de tensión y compresión introducidas por el sistema optomecánico.

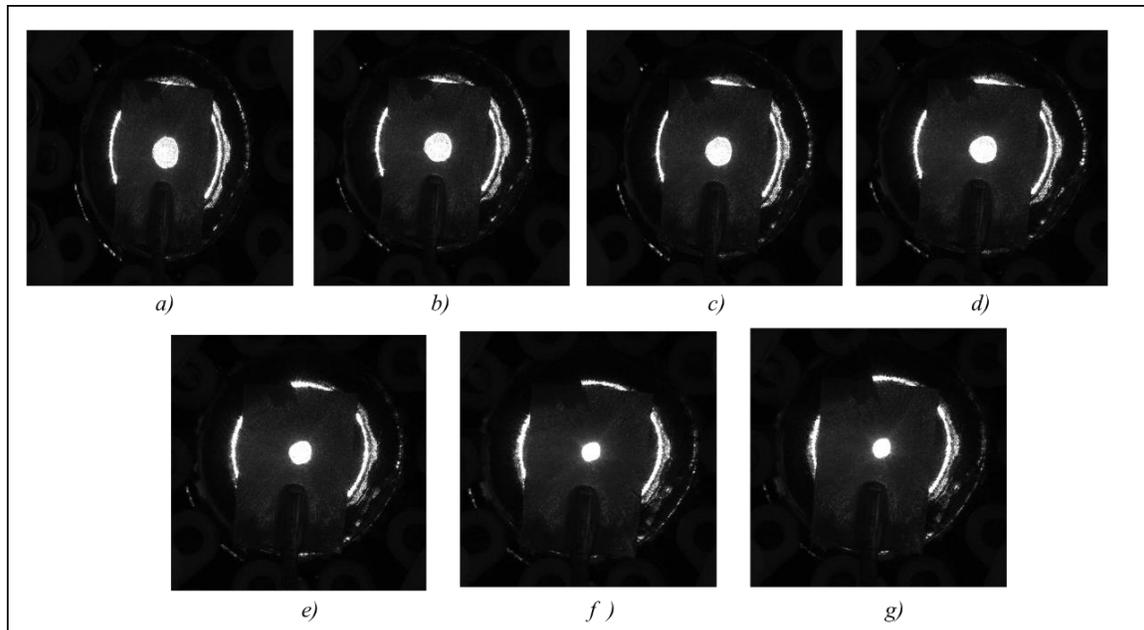


Figura 4.25. Secuencia de imágenes de las manchas de luz generados cuando se aplica una fuerza lineal de compresión a cada brazo del SEL de a) 0 N, b) 0.127 N, c) 0.322 N, d) 0.537 N, e) 0.714 N, f) 1.120 N y g) 1.769 N. La imagen g) representa la medición del punto focal, en el cual, el contorno de la mancha central que se genera está completamente definido y que corresponde a la fuerza total de compresión máxima aplicada al SEL, con una longitud focal posterior medida de aproximadamente 5.570 mm y con un diámetro de la mancha de aproximadamente 1.011 mm.

Los valores de las fuerzas aplicadas en el SEL para modificar las distancias focales se basaron en las mediciones previamente adquiridas en la sección anterior. Estas mediciones se determinaron a partir del ángulo recorrido por el engrane principal 1, el cual fue activado mediante los motores a paso de la montura opto-mecatrónica.

Los distintos valores medidos de las distancias focales posteriores y el diámetro promedio de la mancha generada de cada foco por cada valor de ángulo recorrido por el engrane principal 1, par de torsión y magnitud de la fuerza lineal de tensión/compresión aplicada a cada brazo del SEL, se presentan en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1. Valores de la distancia focal posterior del SEL cuando se le aplican distintas magnitudes de fuerza de tensión, por cada ángulo recorrido por el engrane principal de la montura opto-mecatrónica.

Ángulo recorrido por engrane principal 1	Par de torsión τ_1	Fuerza lineal de tensión por brazo F_t	Distancia focal posterior (d. f. p)	Diámetro de mancha
0°	0 N·mm	0 N	8.667 mm	0.733mm
1.212°	1.870 N·mm	0.022 N	8.834 mm	0.693 mm
2.424°	23.307 N·mm	0.274 N	8.912 mm	0.635 mm
3.637°	36.35 N·mm	0.428 N	9.039 mm	0.452 mm
4.849°	60.60 N·mm	0.714 N	9.103 mm	0.593 mm
6.061°	81.92 N·mm	0.965 N	9.092 mm	0.632 mm
7.274°	110.76 N·mm	1.305 N	9.330 mm	0.613 mm

Tabla 4.2. Valores de la distancia focal posterior del SEL cuando se le aplican distintas magnitudes de fuerza de compresión, por cada ángulo recorrido por el engrane principal de la montura opto-mecatrónica.

Ángulo recorrido por engrane principal 1	Par de torsión τ_2	Fuerza lineal de compresión por brazo F_c	Distancia focal posterior (d. f. p)	Diámetro de mancha
0°	0 N·mm	0 N	8.667 mm	0.733 mm
1.212°	11.923 N·mm	0.127 N	8.549 mm	0.750 mm
2.424°	26.869 N·mm	0.322 N	8.4457 mm	0.773 mm
3.637°	39.375 N·mm	0.537 N	7.973 mm	0.955 mm
4.849°	47.373 N·mm	0.714 N	7.757 mm	0.978 mm
6.061°	59.251 N·mm	1.120 N	7.523 mm	1.017 mm
7.274°	78.004 N·mm	1.769 N	7.196 mm	1.011 mm

En las gráficas de las figuras 4.26 y 4.27, se muestra la variación de la distancia focal posterior con respecto a los distintos valores de fuerzas lineales de tensión y compresión aplicadas a los brazos del SEL.

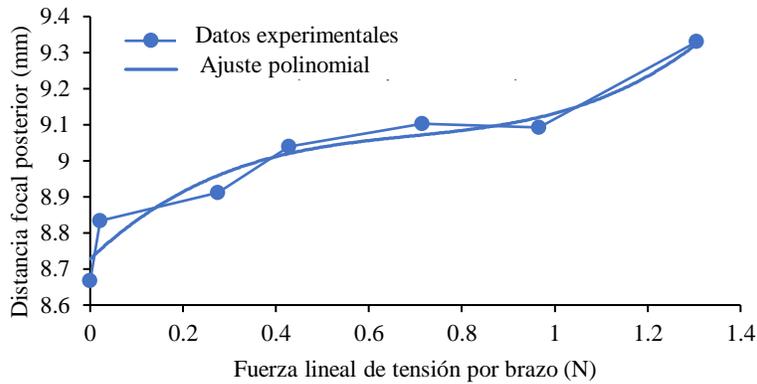


Figura 4.26. Variación de las distancias focal posterior con respecto a la fuerza lineal de tensión que el sistema opto-mecatrónico aplica sobre cada brazo del SEL.

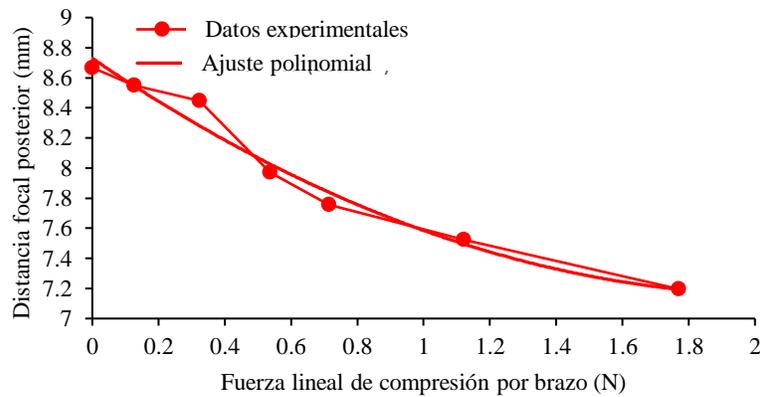


Figura 4.27. Variación de las distancias focal posterior con respecto a la fuerza lineal de compresión que el sistema opto-mecatrónico aplica sobre cada brazo del SEL.

Se realizó un ajuste de curvas, que representan los cambios en la distancia focal en función de la tensión o compresión que el sistema opto-mecatrónico aplica, los cuales también se muestra en cada una de las gráficas de las figuras 4.28 y 4.29. Las ecuaciones obtenidas se muestran a continuación:

$$d.f.p_t = 0.7531F_t^3 - 1.564F_t^2 + 1.214F_t + 8.728, \quad (4.10)$$

$$d.f.p_c = 0.7531F_c^2 - 1.502F_c + 8.729, \quad (4.11)$$

donde F_t y F_c son las fuerzas de tensión y compresión y $d.f.p_t$ y $d.f.p_c$ son la distancia focal posterior para las fuerzas lineales aplicadas respectivamente. Se obtuvo una desviación estándar para el ajuste a las ecuaciones de 0.06947 y 0.1013 respectivamente.

En las gráficas de las figuras 4.28 y 4.29 se presenta la variación de los valores del diámetro de la mancha generada al encontrar el punto focal al aplicarle fuerzas de tensión y compresión, respectivamente.

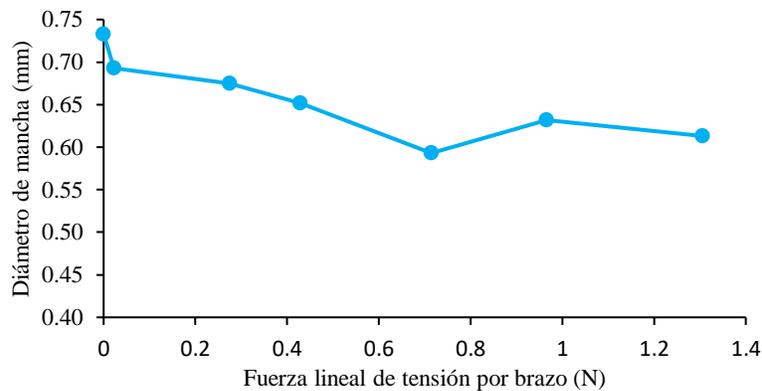


Figura 4.28. Variación del diámetro de la mancha generada de cada punto focal al aplicarle distintas fuerzas de tensión a los brazos de la lente.

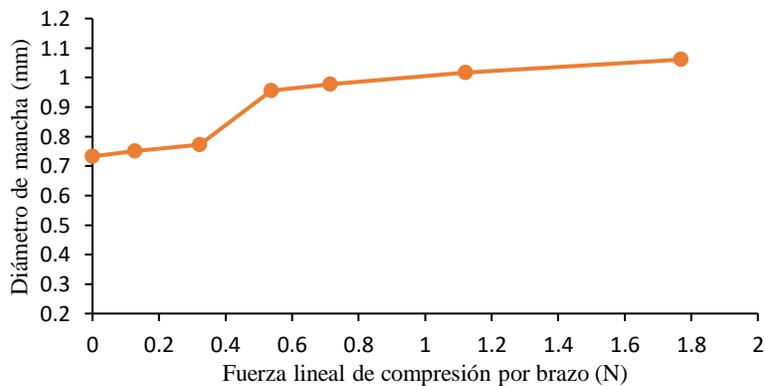


Figura 4.29. Variación del diámetro de la mancha generada de cada punto focal al aplicarle distintas fuerzas de compresión a los brazos de la lente.

4.4. Desempeño y caracterización óptica

Como se mencionó en la sección 2.7, existen diferentes métodos de caracterización para poder evaluar el desempeño óptico de una lente o sistema óptico en general. En este trabajo se optó por la caracterización del SEL a través de la obtención del frente de onda para analizar las aberraciones presentes. Se utilizó un sensor de frente de onda tipo Shack-Hartmann para obtener el frente de onda generado por el SEL cuando se le hace incidir un frente de onda plano. Esto permitió la determinación de los coeficientes de Zernike y la identificación de las distintas aberraciones presentes en la lente sólida bajo la influencia de diferentes fuerzas lineales de tensión y de compresión.

El arreglo experimental empleado para la obtención de los coeficientes de Zernike se muestra en la Figura 4.30. Se utilizó un diodo láser de COHERENT® con potencia variable como fuente de luz (F), con una longitud de onda de 405 nm. El arreglo incluyó un sistema de filtro espacial (FE) con un objetivo de microscopio y un pinole de la marca Edmund®. Como sistema de colimación (LC), se utilizó una lente plano-convexa con una distancia focal de 75 mm, junto con un sensor de frente de onda Shack-Hartmann (SH) de la marca comercial THORLABS®.

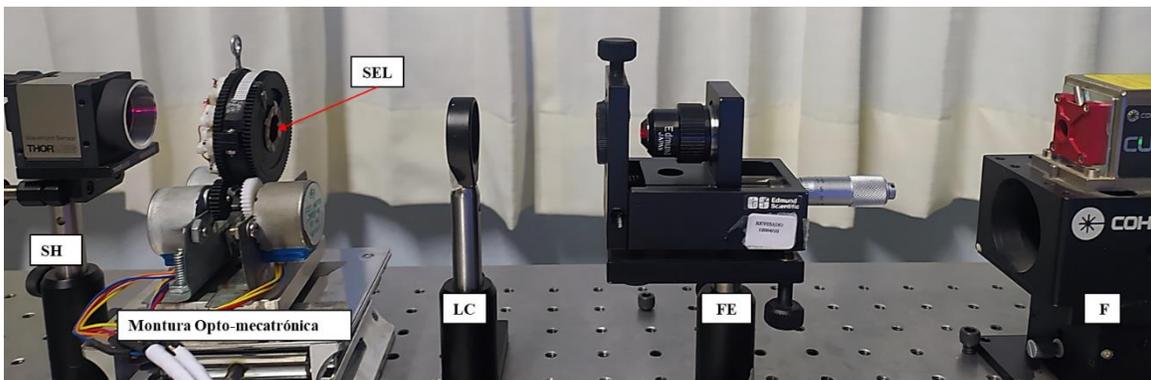


Figura 4.30. Arreglo experimental para la obtención de los coeficientes de Zernike, donde se utilizó una fuente de luz láser (F), un sistema de filtro espacial (FE), una lente para colimar (LC), la montura opto-mecatrónica donde se colocó el SEL y el sensor de frente de onda Shack-Hartmann (SH).

Con la fuente de luz del láser y el sistema de colimación se generó un frente de onda plano, el cual se hizo incidir en la lente elástica. El frente de onda generado después de pasar a través del SEL fue reconstruido por el sensor de Shack-Hartman colocado frente a la montura. Para las mediciones, se tomaron en cuenta las diferentes condiciones del SEL, primero para su estado normal y después aplicando las fuerzas lineales de tensión y compresión mediante la montura opto-mecatrónica.

Los coeficientes de aberración de Zernike que se obtuvieron con el sensor de Shack-Hartman se representan cumpliendo la norma estándar ANSI Z80.28-2004 [18]. En las figuras 4.31 y 4.32, se muestran los valores de los primeros 15 coeficientes de Zernike de los frentes de onda generados por el SEL al aplicar distintas magnitudes de fuerzas de tensión y compresión, respectivamente. Los diferentes tonos de color en los histogramas representan el valor del coeficiente correspondiente a cada una de las fuerzas ejercidas sobre los brazos de la lente.

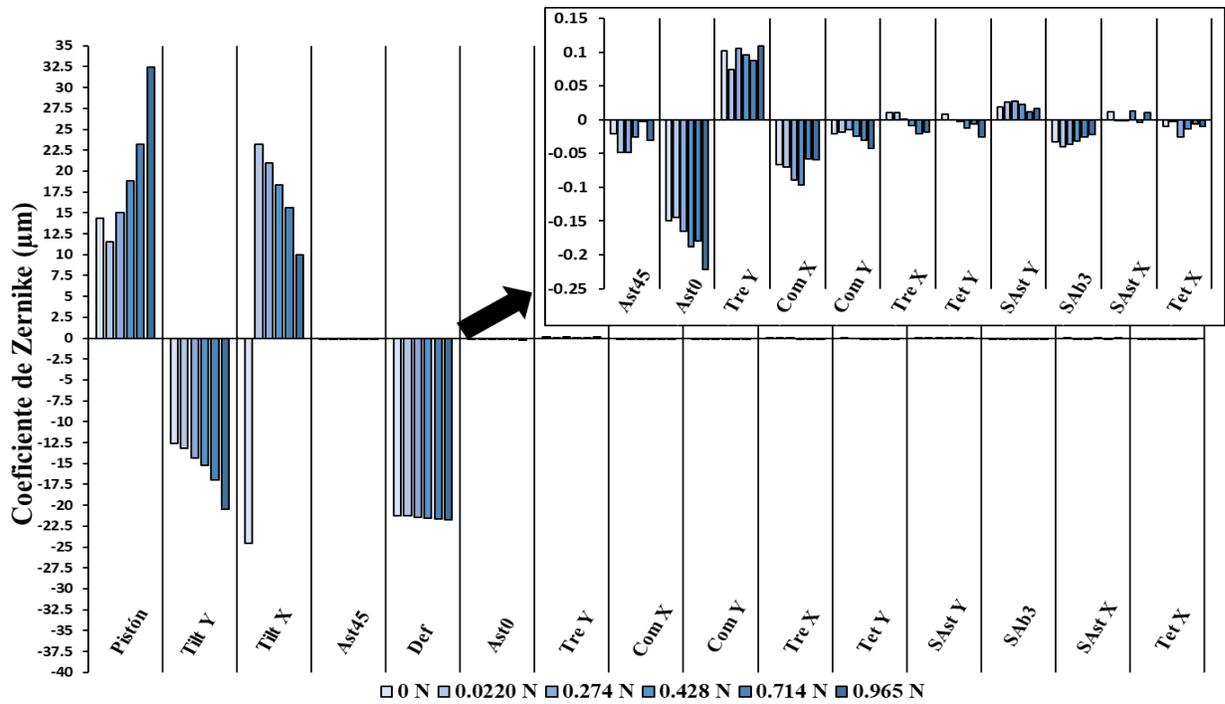


Figura 4.31. Coeficientes de Zernike obtenidos mediante el sensor de frente de onda Shack-Hartmann de THORLABS® cuando el SEL es sometido a distintas magnitudes de fuerza lineal de tensión. Cada uno de los tonos de color de los histogramas indica el coeficiente correspondiente a una determinada fuerza de tensión lineal aplicada a cada brazo del SEL.

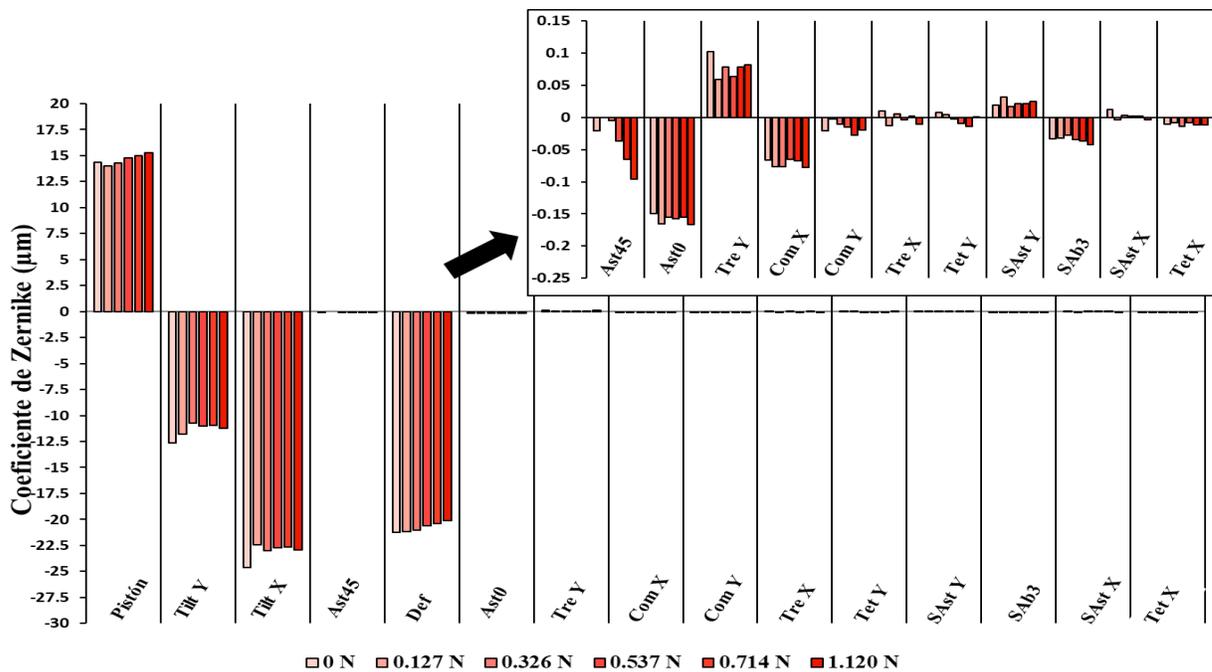


Figura 4.32. Coeficientes de Zernike obtenidos mediante el sensor de frente de onda Shack-Hartmann de THORLABS® cuando el SEL es sometido a distintas magnitudes de fuerza lineal de compresión. Cada uno de los tonos de color de los histogramas indica el coeficiente correspondiente a una determinada fuerza de compresión lineal aplicada a cada brazo del SEL.

Los frentes de onda reconstruidos por el sensor Shack-Hartmann en vista tridimensional que genera el SEL cuando se aplican las cinco magnitudes de fuerza de tensión y compresión a cada brazo se presentan en las figuras 4.33 y 4.34.

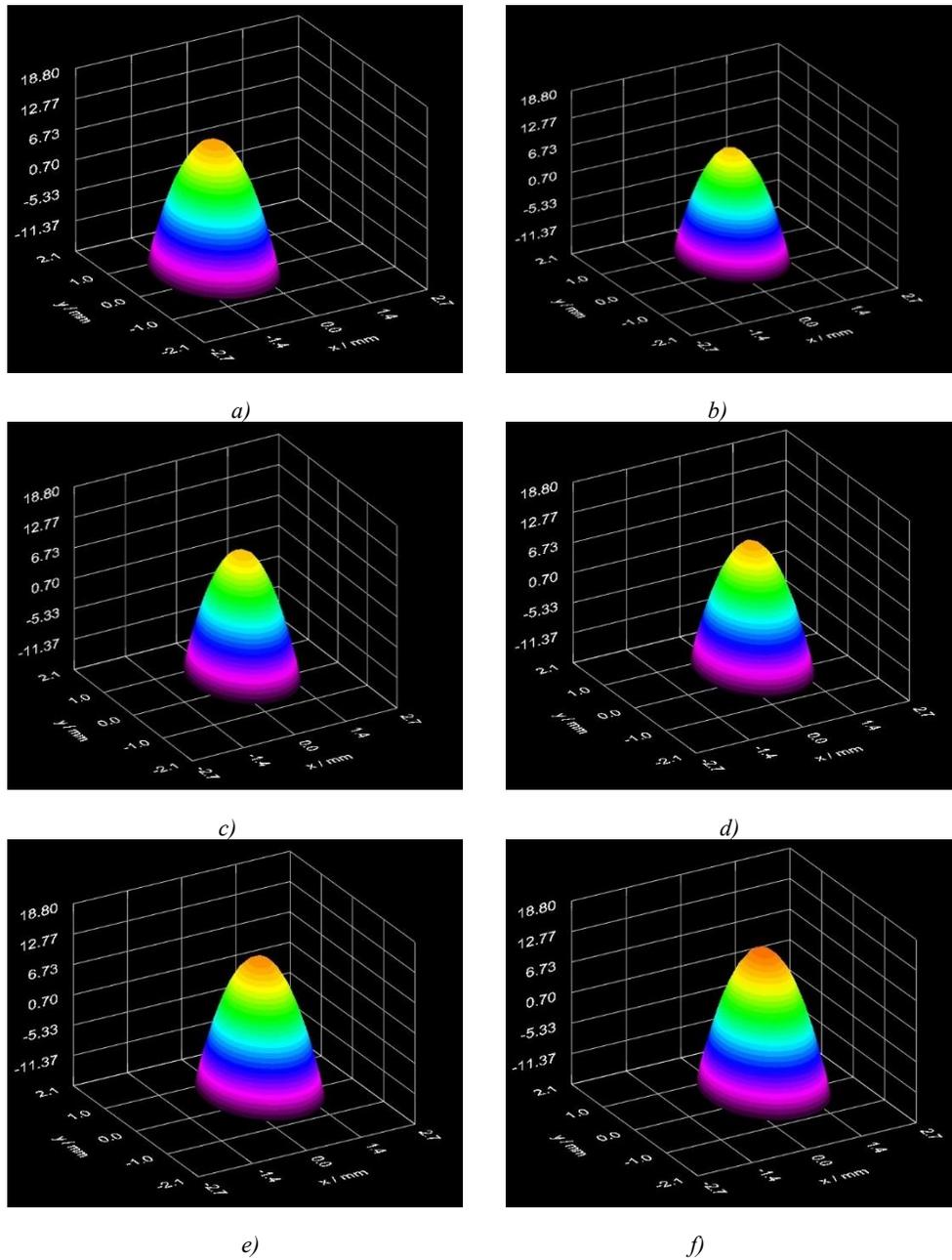
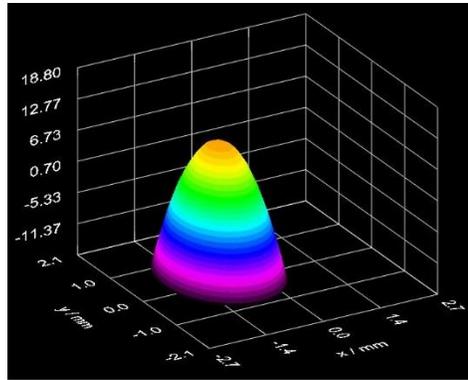
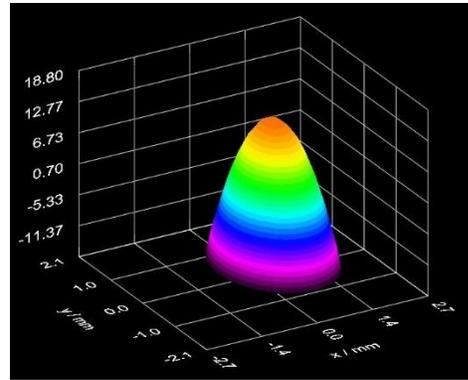


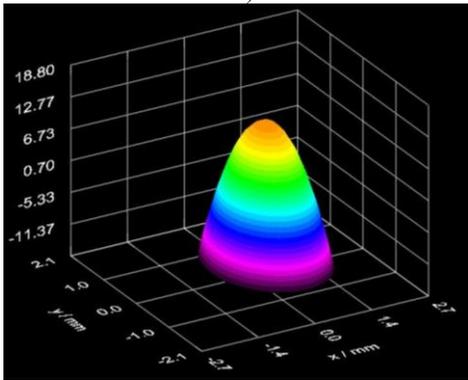
Figura 4.33. Frentes de onda reconstruidos por el sensor Shack-Hartman de THORLABS® en vista tridimensional, generados cuando los brazos del SEL están sometidos a una fuerza lineal de tensión de: a) 0 N, b) 0.0220 N, c) 0.274 N, d) 0.428 N, e) 0.714 N y f) 0.965 N.



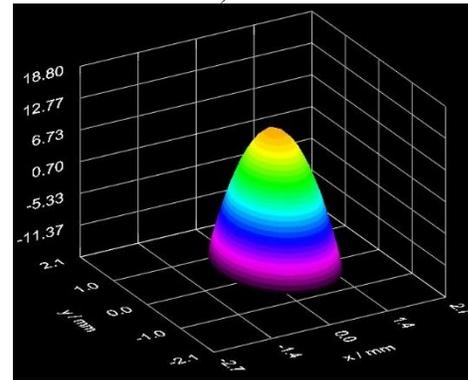
a)



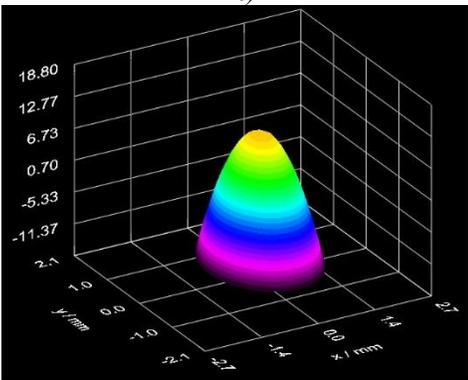
b)



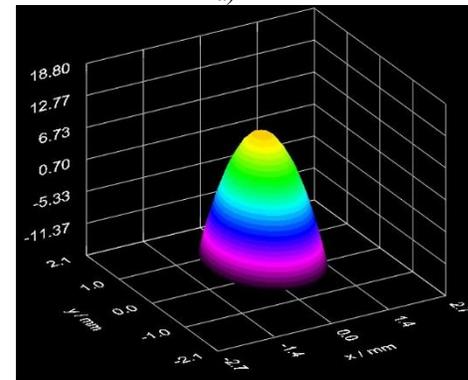
c)



d)



e)



f)

Figura 4.34. Frentes de onda reconstruidos por el sensor Shack-Hartman de THORLABS® en vista tridimensional, generados cuando los brazos del SEL están sometidos a una fuerza lineal de compresión de: a) 0 N, b) 0.127 N, c) 0.32 N, d) 0.537 N, e) 0.714 N y f) 1.120 N.

4.5. Adquisición de imágenes

Además de contar con resultados de las distancias focales y las aberraciones presentes de una lente con ciertas características, también es importante realizar un análisis de imágenes. En esta sección se muestran las imágenes adquiridas de algunos objetos vistos a través de la lente sintonizable (SEL) en su estado normal y cuando se le aplican las fuerzas lineales de tensión/compresión mediante la montura opto-mecatrónica.

En una primera prueba, se colocó un objeto con forma de figura animada a una distancia de aproximadamente 16 cm frente al sistema SEL-montura opto-mecatrónica. Para las capturas, se posicionó detrás una cámara CCD de la marca IMAGENSOURCE® modelo DMK 41BF06 a una distancia aproximada de 20 cm detrás de la lente. En la Figura 4.35, se presentan las imágenes capturadas de la figura animada por la cámara CCD cuando el SEL se encuentra en su estado normal y cuando se le aplican cuatro diferentes magnitudes de fuerzas de tensión y compresión.

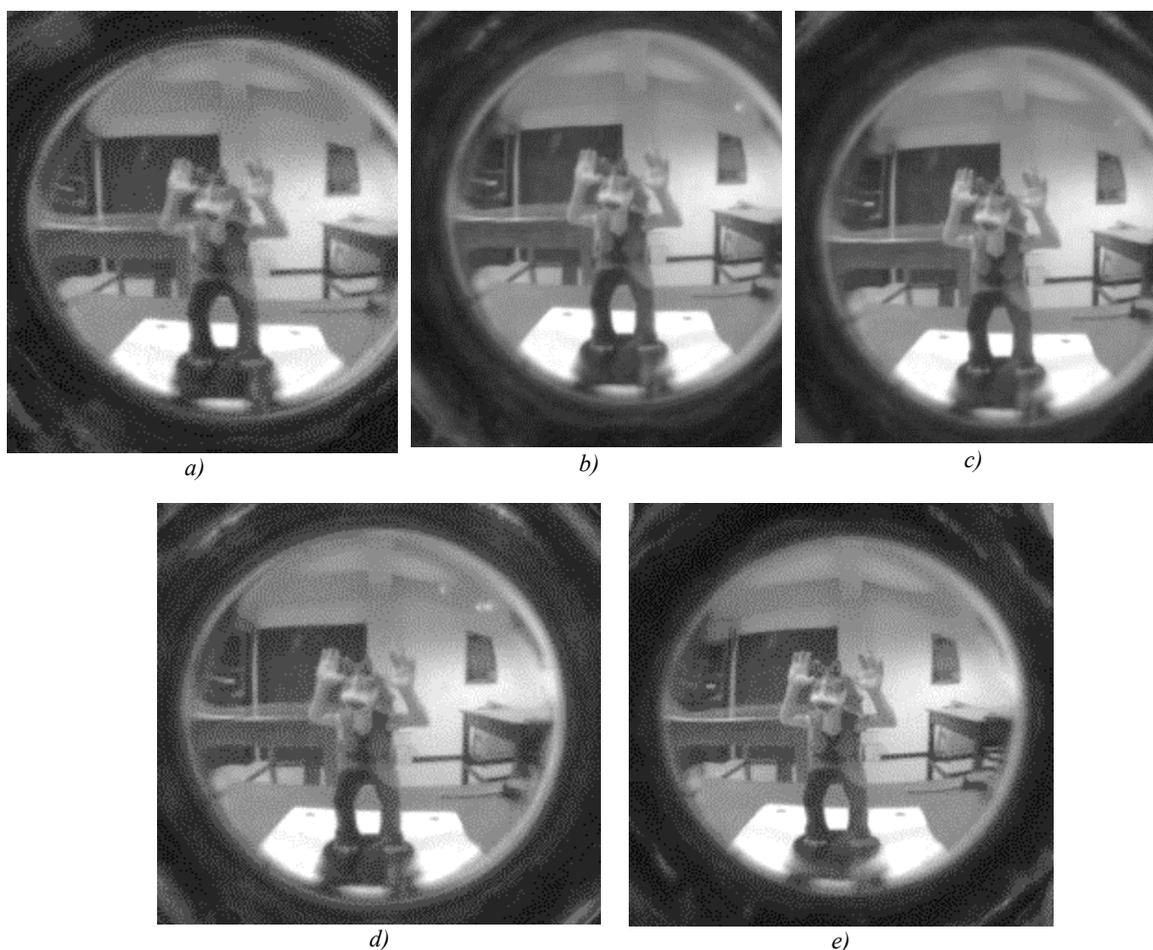


Figura 4.35. Imágenes adquiridas cuando los brazos del SEL se someten a fuerzas de tensión de: a) 0.965 N y b) 0.274 N. c) Imagen adquirida cuando el SEL se encuentra en su estado normal. Imágenes adquiridas cuando los brazos del SEL se someten a fuerzas de compresión de: d) 0.326 N y e) 1.120 N.

Otra prueba realizada, consistió en colocar imágenes impresas a una distancia de 18 cm frente a la lente. Las imágenes observadas cuando la lente es sometida a una fuerza máxima de tensión, en su estado normal (sin aplicar ninguna fuerza) y a una fuerza de compresión máxima, se muestran en la Figura 4.36.

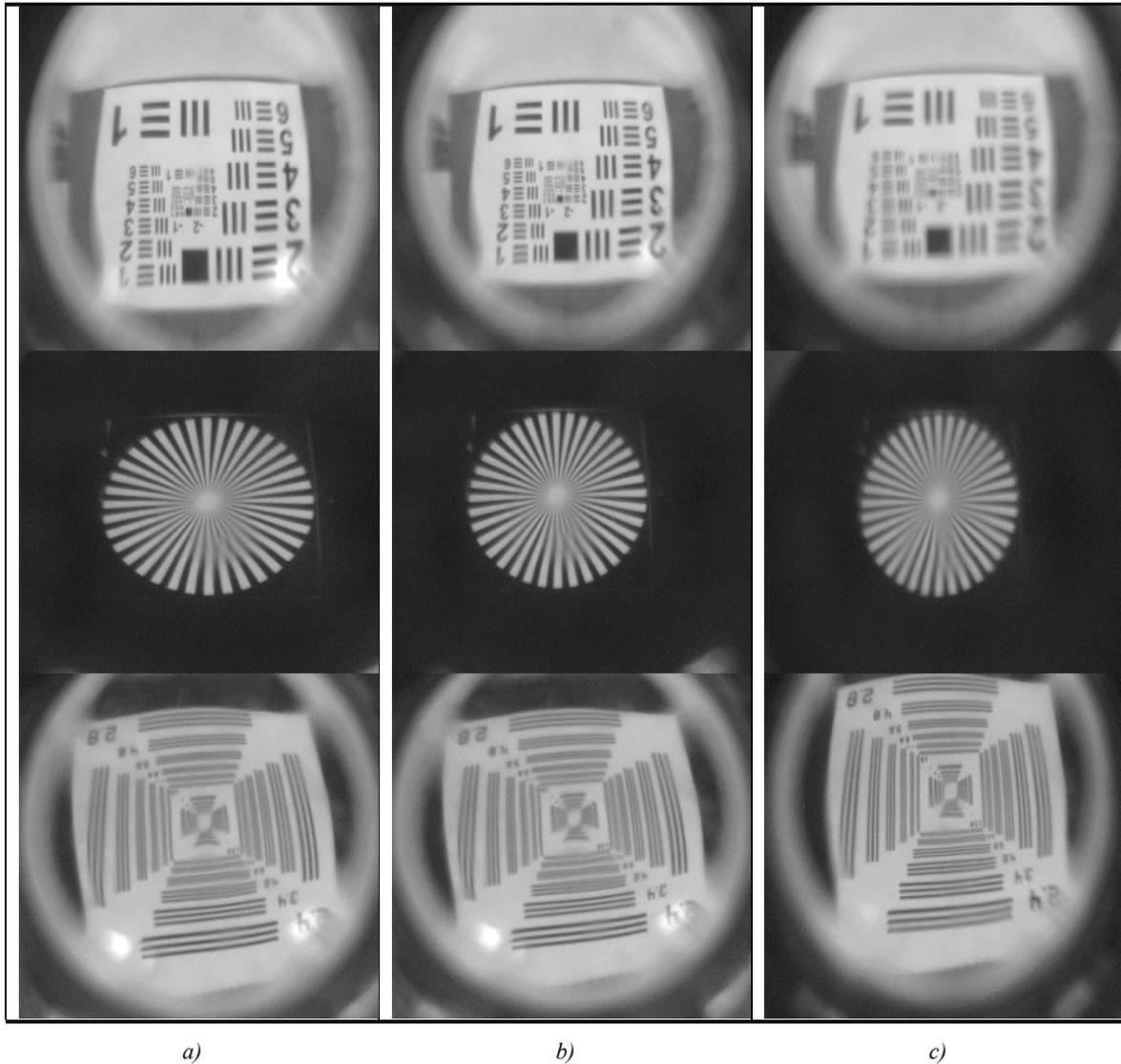
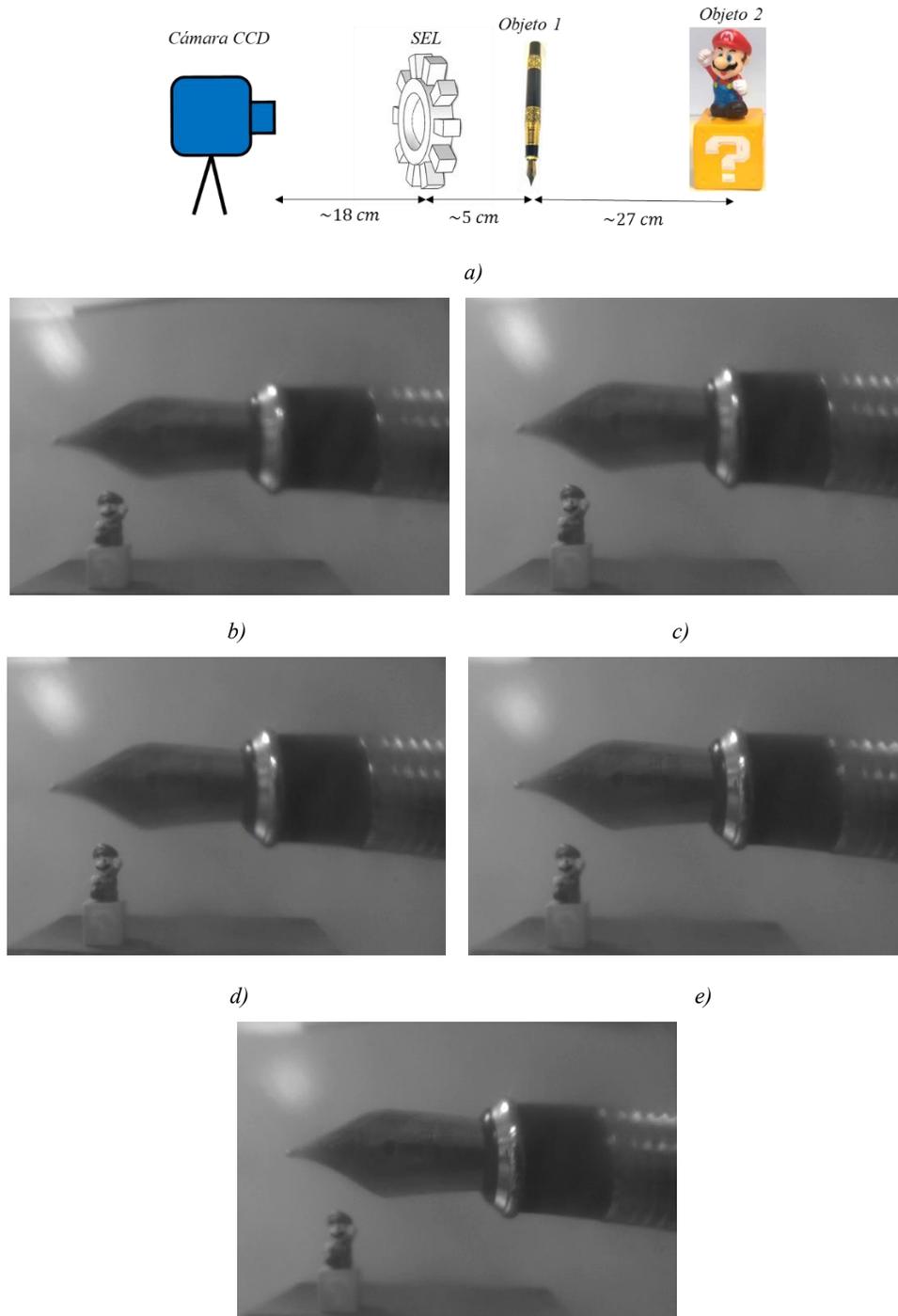


Figura 4.36. Tres series de imágenes capturadas por la cámara CCD a través del SEL: a) cuando se le aplica una fuerza de tensión a cada brazo del SEL de 0.965 N, b) cuando no está sometido a ninguna fuerza y c) cuando se le aplica una fuerza de compresión a cada brazo del SEL de 1.120 N de magnitud.

Con el fin de probar el rendimiento de enfoque del SEL, se realizó una última prueba para la adquisición de imágenes. En esta prueba, se colocaron dos objetos a diferentes distancias frente al sistema SEL-montura opto mecatrónica. El primer objeto fue una pluma estilográfica, colocada a una distancia de aproximadamente 5 cm, y el segundo objeto fue una figura animada ubicada a una distancia de aproximadamente 27 cm frente al SEL. El diagrama experimental de esta prueba se muestra en la Figura 4.37a). Las imágenes b)-d) de la Figura 4.37 muestran las capturas de los dos

objetos cuando el SEL está sometido a una fuerza máxima tensión, cuando se encuentra en su estado normal y cuando se aplica una fuerza máxima de compresión, respectivamente.



f)
 Figura 4.37. a) Montaje experimental para la adquisición de imágenes de 2 objetos colocados a 5 cm y 27 cm delante del SEL utilizando una cámara CCD situada a 20 cm detrás de la montura. Capturas de los dos objetos cuando cada brazo del SEL es sometido a una fuerza lineal de tensión de: b) 0.965 N y c) 0.428 N, d) ninguna fuerza y a una fuerza lineal de compresión de: e) 0.537 N y f) 1.120 N.

Capítulo 5. Discusión y conclusiones

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos del comportamiento mecánico y óptico de la lente de PDMS sintonizable que emula el cristalino del ojo humano. Se analizan las fuerzas que el sistema ejerce sobre la lente y los cambios geométricos que esta experimenta. Además, se realiza un análisis de los coeficientes de Zernike, que proporcionan la información sobre las aberraciones de los frentes onda reconstruidos por el sensor de frente de onda Shack-Hartmann y su relación con las imágenes adquiridas por la lente bajo distintas fuerzas. Por último, se hace una comparación entre los resultados teóricos y experimentales de la distancia focal posterior de la lente para evaluar la eficiencia de la lente sólida de PDMS y de la montura opto-mecatrónica.

5.1. Discusión de los resultados obtenidos

Los primeros resultados experimentales se mostraron en la sección 3.2.2 del capítulo 3, donde se incorporó un indicador en la montura opto-mecatrónica para medir los desplazamientos angulares específicos del engrane principal al aplicarle fuerzas tangenciales. Estos desplazamientos se registraron mediante un sensor de carga y permitieron establecer una relación entre la variación en el diámetro de la lente en función de dichas fuerzas tangenciales aplicadas manualmente al engrane principal, teniendo en cuenta las pérdidas ocasionadas por la fricción en la montura. Dichas variaciones se presentaron en términos del aumento del par de torsión generado (ver gráficas de las figuras 3.15 y 3.16). De acuerdo con las gráficas mostradas, el diámetro de la lente aumenta cuando el par de torsión del engrane principal genera fuerzas lineales de tensión al girar en sentido de las manecillas del reloj y disminuye cuando genera fuerzas lineales de compresión al girar en contra de las manecillas del reloj. Se observa en las gráficas y en las expresiones (3.9) y (3.10), que el cambio en el diámetro en relación con el par de torsión aplicada no exhibe un comportamiento lineal, si no que presenta un comportamiento cúbico. Además, en el mismo rango de desplazamiento angular del engrane, se observa que el diámetro experimenta un cambio mayor en el caso de la compresión en comparación con la tensión.

Por lo tanto, en el mecanismo de montura de esta lente, se requiere de mayor par de torsión para generar fuerzas de compresión en comparación con el par de torsión necesario para generar fuerzas de tensión dentro del mismo rango de desplazamientos angulares del engrane principal. Esta diferencia se atribuye principalmente a las propiedades mecánicas del material (PDMS) con el cual se fabrica la lente.

Una vez cuantificados los pares de torsión que se producen en la montura, fue posible hacer un estudio con el sistema opto-mecatrónico completo, es decir, incorporando el sistema de motores a paso. De esta manera, se obtuvo una relación entre la variación del par de torsión generada por el sistema y la corriente consumida por los motores (figuras 3.24 y 3.25).

En estas relaciones, se muestran que existe un mayor consumo de corriente cada vez que se requiera de un mayor par de torsión, y se nota que este aumento es más significativo cuando se aplican fuerzas de compresión en comparación con las fuerzas de tensión. Además, se percibe que el sistema en un estado de compresión requiere un rango de variación de corriente menor en comparación con su estado de tensión, lo que implica que el sistema es más preciso en la aplicación de fuerzas lineales de tensión. Se debe destacar que los cambios en el par de torsión con respecto a la corriente consumida son inicialmente pequeños, pero a partir de un valor en la corriente de 0.34 A el cambio se vuelve más significativo.

Por otro lado, los cálculos de fuerzas lineales que el sistema opto-mecatrónico ejerce sobre cada brazo de la lente, basado en las observaciones del cambio en los diámetros cuando son accionados los motores, revelan que el sistema ofrece un mayor rango para la aplicación de fuerzas lineales de compresión en comparación con las de tensión. Esto se evidencia en las magnitudes de 1.305 N para la tensión y 1.769 N para la compresión, correspondientes a un desplazamiento angular máximo del engrane principal de 8.48° que el sistema permite.

En la sección 4.1, se presentaron los resultados de las simulaciones mecánicas realizadas en SolidWorks, donde se incluyen las variaciones de los radios de curvatura y las constantes de conicidad de la lente en función de la cantidad de fuerza de tensión y compresión aplicada (cantidades calculadas a partir de las mediciones realizadas en el capítulo 3). A continuación, se muestran las gráficas que comparan las variaciones en los radios de curvatura y las constantes de conicidad de ambas superficies con respecto a las fuerzas de tensión y compresión distribuidas en cada brazo de la lente.

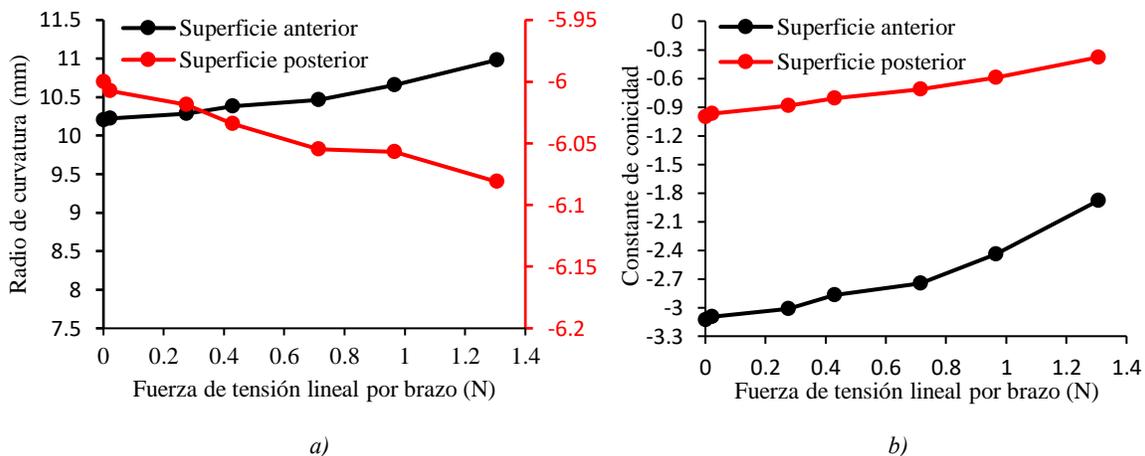


Figura 5.1. Comparación de la variación de: a) el radio de curvatura y b) la constante de conicidad de la superficie anterior y posterior cuando la montura opto-mecatrónica ejerce en cada brazo de la lente una determinada fuerza de tensión lineal.

En las gráficas de la Figura 5.1, cuando la lente se encuentra en estado de tensión, se puede observar que el rango de variación en los radios de curvatura de la superficie anterior es mayor que en la superficie posterior. El rango del radio de curvatura de la superficie anterior va de 10.2 mm a 10.98 mm, mientras que para la superficie posterior es de -6 mm a -6.0812 mm con la aplicación de una fuerza lineal de tensión por brazo que va de 0 N a 1.3 N. También, se nota un mayor rango de variación en la constante de conicidad en la superficie anterior en comparación con la superficie posterior. El rango en la superficie anterior va de -3.1316 a -1.879, mientras que, en la superficie posterior, el rango es de -1 a -0.377. Por tanto, existe mayor rango de deformación en la superficie anterior cuando la lente se encuentra en estado de tensión. Esta diferencia puede estar influenciada por el radio de curvatura, es decir, la cantidad de material presente en diferentes zonas de la lente. Las gráficas mostradas en las figuras 4.12 y 4.13 de la sección 4.1, indican un mayor cambio en la superficie posterior que en la superficie anterior cuando se aplican fuerzas de tensión. Sin embargo, es importante destacar que la deformación es mayor en los extremos de la lente y no en la región paraxial que describen los radios de curvatura. Además, hay que tomar en cuenta que los cambios en las constantes de conicidad se hacen notar más en la superficie posterior que en la superficie anterior.

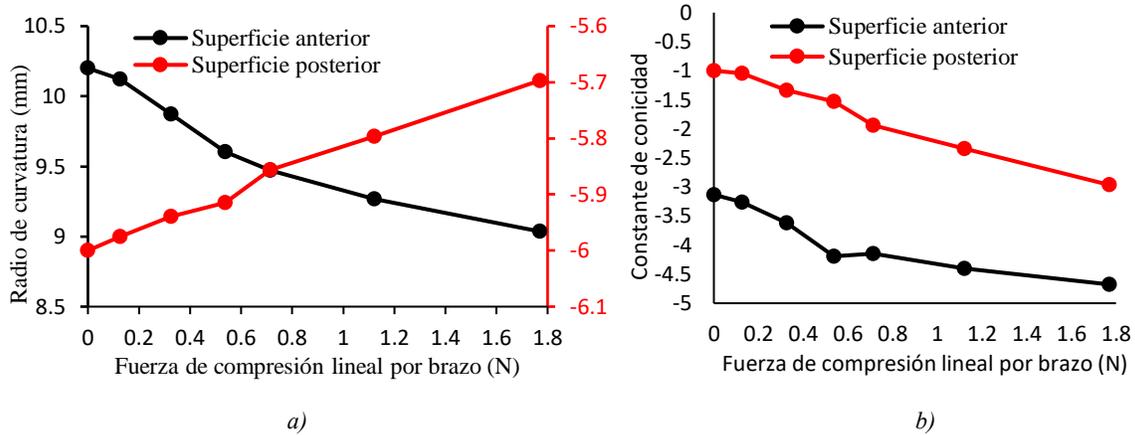


Figura 5.2. Comparación de la variación de: a) el radio de curvatura y b) la constante de conicidad de la superficie anterior y posterior cuando la montura opto-mecatrónica ejerce en cada brazo de la lente una determinada fuerza de compresión lineal.

De igual manera, en las gráficas de la figura 5.2, se muestra una comparación de las variaciones de los radios de curvatura y las constantes de conicidad entre la superficie anterior y la superficie posterior, ahora para el caso en el que la lente se encuentra en estado de compresión. En este caso el rango de variación para ambas superficies es similar. El radio de curvatura de la superficie anterior disminuye de 10.2 mm a 9.036 mm, y el radio de curvatura de la superficie posterior disminuye de -6 mm a -5.6969 mm a un rango de fuerza lineal de compresión que va de 0 N a 1.76 N. En cuanto a la constante de conicidad, se muestra un mayor rango en la superficie posterior en comparación con la superficie anterior, además de una distribución más uniforme. El valor de la constante de conicidad para la superficie anterior va de -3.1316 a -4.677, mientras que, para la superficie posterior, varía de -1 a -2.9639.

Las ecuaciones que mejor describe las curvas del comportamiento en los radios de curvatura y la constante de conicidad de la lente con respecto a la fuerza lineal de tensión y compresión se resumen en las tablas 5.1 y 5.2, lo que facilita un análisis más detallado de estos comportamientos. Estas ecuaciones son importantes para comprender cómo la lente responde a las fuerzas aplicadas y cómo esto afecta su rendimiento óptico y geométrico.

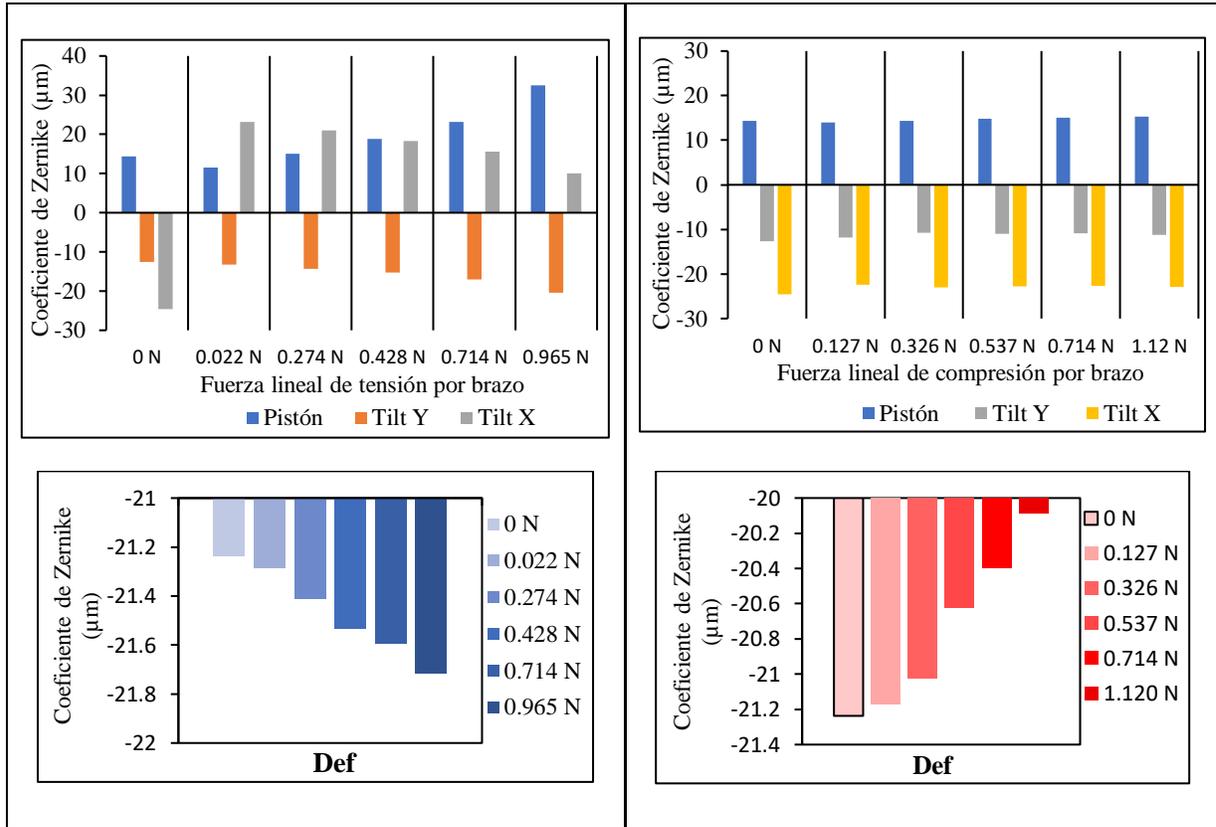
Tabla 5.1. Ecuaciones que describen el cambio en los radios de curvatura para cada superficie en función de la fuerza lineal aplicada en cada brazo de la lente.

Fuerza lineal	Radio de curvatura superficie anterior (R_A)	Radio de curvatura superficie posterior (R_P)
Tensión (F_t)	$R_A = -0.3594F_t^3 + 0.9355F_t^2 - 0.0749 + 10.22$ RMSE = 0.04048	$R_P = 0.01123F_t^2 - 0.07366F_t - 6.003$ RMSE = 0.0645
Compresión (F_c)	$R_A = 0.2383F_c^2 - 1.147F_c + 10.21$ RMSE = 0.2056	$R_P = 0.0825F_c^3 - 0.1979F_c^2 + 0.2907F_c - 6.007$ RMSE = 0.0298

Tabla 5.2. Ecuaciones que describen el cambio en las constantes de conicidad para cada superficie en función de la fuerza lineal aplicada en cada brazo de la lente.

Fuerza lineal	Constante de conicidad superficie anterior (k_A)	Constante de conicidad superficie posterior (k_P)
Tensión (F_t)	$k_A = 0.1075F_t^2 + 0.6592F_t - 3.158$ RMSE = 0.1307	$k_P = -0.04112F_t^2 + 0.4738F_t - 0.9992$ RMSE = 0.04048
Compresión (F_c)	$k_A = 0.465F_c^2 - 1.764F_c - 3.132$ RMSE = 0.1502	$k_P = -0.1579F_c^2 - 1.0323F_c - 0.9768$ RMSE = 0.2056

En cuanto a las aberraciones presentes en la lente sólida elástica de PDMS, en la sección 4.4 se mostraron los coeficientes de Zernike cuando es sometida a las diferentes cantidades de fuerza lineal de tensión y compresión. A continuación, se presentan las gráficas que muestran la variación de los coeficientes de Zernike para el pistón, distorsión vertical (Tilt Y), distorsión horizontal (Tilt X) y desenfoque cuando se aplican cinco de las diferentes fuerzas de tensión y compresión que el sistema opto- mecatrónico ejerce sobre cada uno de los brazos de la lente.



a)

b)

Figura 5.3. Cambios en el valor de los coeficientes de Zernike para las aberraciones de distorsión vertical (tilt Y), distorsión horizontal (tilt X) y desenfoque, cuando la lente está en estado de: a) tensión y b) compresión.

Las gráficas de la figura 5.3, muestra coeficientes de tilt elevados, los cuales aumentan cuando se aplican fuerzas de tensión y compresión. Esto aumentos pueden deberse a pequeñas inclinaciones de la montura opto-mecatrónica por desplazamiento de los engranes al momento de girar, así como a pequeños errores de alineación en el arreglo experimental. Por otro lado, en la aberración de

desenfoque se observa un aumento gradual cuando la lente se somete a las fuerzas de tensión y una disminución gradual cuando está bajo fuerzas de compresión. Además, en su estado de compresión, se muestra un mayor rango de variabilidad de los coeficientes de desenfoque que cuando se encuentra en su estado de tensión. Esta variabilidad en el desenfoque se relaciona con el módulo de tensión y compresión del material utilizado [17,48,49]. Estos resultados sugieren que la compresión de la lente puede influir en su capacidad de enfoque, tal como se muestra en las imágenes de la Figura 4.37 de la sección 4.5.

Las figuras 5.4 y 5.5, presentan los histogramas que muestran la variación de los coeficientes de Zernike para las aberraciones de astigmatismo a 45°, astigmatismos a 0° y las aberraciones de alto cuando la lente está sometida a cinco fuerzas diferentes de tensión y compresión aplicadas por el sistema opto- mecatrónico en cada uno de los brazos de la lente.

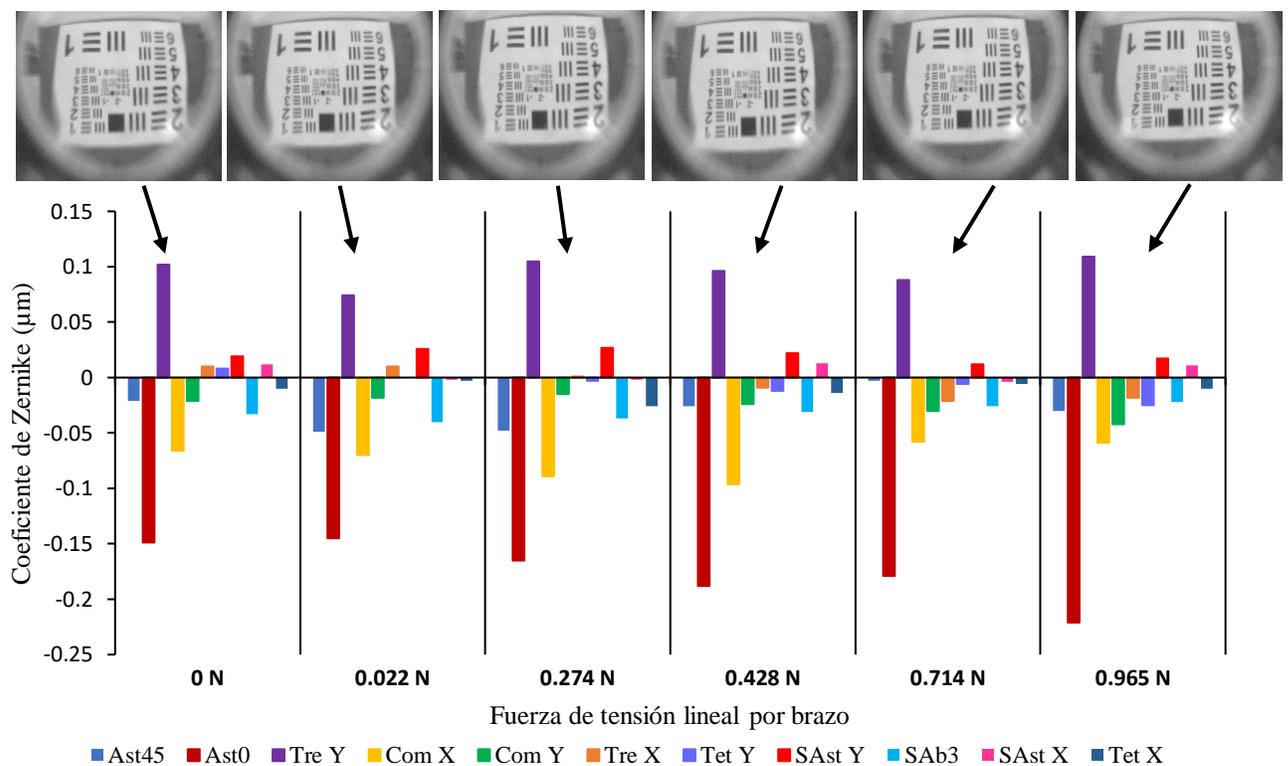


Figura 5.4. Cambios en el valor de los coeficientes de Zernike para las aberraciones de astigmatismo en 45°, astigmatismo en 0° y de alto orden cuando el sistema opto-mecatrónico aplica a cada brazo de la lente de PDMS fuerzas lineales de tensión de: 0.022N, 0.274 N, 0.428 N, 0.714 N y 0.965 N. Cada cambio en el conjunto de coeficientes se relaciona con cada imagen obtenida con la lente en su estado de tensión.

Los histogramas de la figura 5.4 muestran que, cuando el sistema no aplica ninguna fuerza, los coeficientes de mayor valor corresponden a las aberraciones de astigmatismo en 0°, trefoil vertical y coma en X. A medida que las fuerzas de tensión aumentan, el astigmatismo en 0° tiende a aumentar su valor uniformemente, mientras que los valores para el trefoil vertical y coma en X tienen variaciones pequeñas, pero no hay un aumento o disminución significativa. Por otro lado, se observan

pequeños aumentos para la aberración de coma en Y. La aberración esférica y el astigmatismo en 45° aumenta su valor inicialmente, pero va disminuyendo a medida que aumenta la tensión.

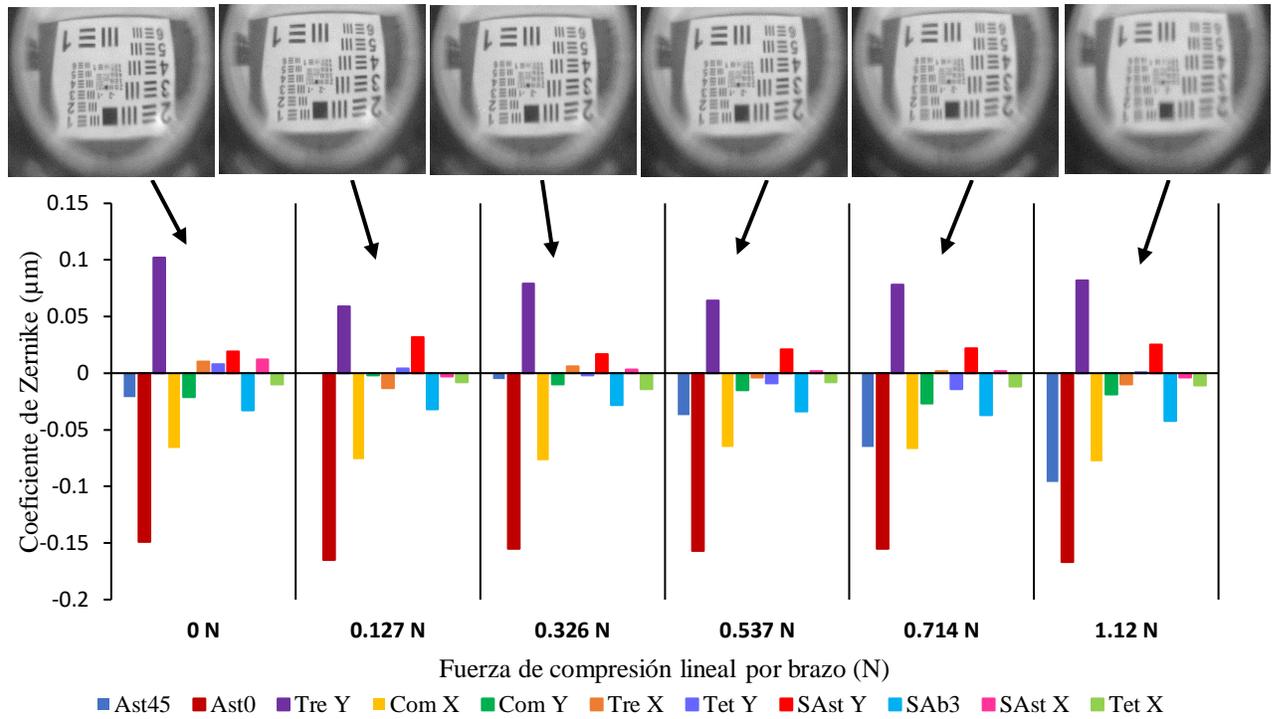


Figura 5.5. Cambios en el valor de los coeficientes de Zernike para las aberraciones de astigmatismo en 45° , astigmatismo en 0° y de alto orden cuando el sistema opto-mecatrónico aplica a cada brazo de la lente de PDMS fuerzas lineales de compresión de: 0.127 N, 0.326 N, 0.537 N, 0.714 N y 1.12 N. Cada cambio del conjunto de coeficientes se relaciona con cada imagen obtenida con la lente en su estado de compresión.

Analizando los histogramas de la Figura 5.5, cuando el sistema se encuentra en su estado de compresión, se observa que, al igual que en el caso anterior, los coeficientes de mayor valor son los de astigmatismo en 0° , trefoil vertical y coma en X. Sin embargo, el astigmatismo en 0° tiene un menor aumento a medida que se aplica compresión que cuando se aplica tensión. Se nota también que, a medida que se incrementa la fuerza de compresión, la aberración de astigmatismo en 45° experimenta un aumento significativo. Asimismo, se observa un mayor aumento en la aberración esférica y pequeños aumentos en la aberración de coma en Y. La combinación entre un aumento del astigmatismo en 0° , astigmatismo en 45° y una mayor variación en el desenfoque cuando la lente está en el estado de compresión resulta en una imagen más distorsionada en comparación con el estado de tensión. Esto se debe a que las magnitudes de las fuerzas lineales de compresión aplicadas por la montura opto mecatrónica son mayores que las de tensión. Además, en cada estado se observa una diferente interacción mecánica de los eslabones (bielas) con los brazos y los bordes de la lente.

Los resultados con respecto al cambio en los parámetros ópticos debido a las fuerzas de tensión y compresión aplicadas se ajustan a las expectativas. Por un lado, se obtuvo una primera aproximación con el comportamiento de la distancia focal efectiva mediante las simulaciones hechas en el software comercial de diseño óptico Zemax®. Estos resultados sugieren un aumento en la distancia focal

efectiva cuando la lente se somete a fuerzas de tensión y una reducción en la distancia focal efectiva cuando se somete a fuerzas de compresión. Ambos comportamientos son no lineales y se presentan en un rango focal que varía de 9.073 mm a 10.2119 mm (equivalente a 12.295 D en potencias óptica). La distancia focal efectiva de la lente en su estado normal, es decir, sin aplicar ninguna fuerza fue de 9.928 mm, y se observa un rango de variación más amplio en su estado de compresión.

Sin embargo, los resultados más significativos se centran en las mediciones experimentales de la distancia focal posterior ($d.f.p$), ya que, en ellos, al igual que en los resultados de las aberraciones, reflejan el rendimiento real del sistema opto-mecatrónico y de la lente sólida de PDMS en conjunto. Las gráficas de las figuras 4.26 y 4.27, muestran que, el aumento de la fuerza de tensión en cada brazo de la lente, la distancia focal posterior aumenta, mientras que disminuye con el aumento de la fuerza de compresión en cada brazo de la lente. Estos comportamientos se pueden representar de manera aproximada por un polinomio de tercer grado y un polinomio de segundo grado, respectivamente. A continuación, se resumen estas ecuaciones polinómicas junto con sus coeficientes en la siguiente tabla.

Tabla 5.3. Ecuaciones que describen los cambios en la distancia focal posterior en función de la fuerza lineal aplicada en cada brazo de la lente.

Fuerza lineal	Distancia focal posterior ($d.f.p$)
Tensión (F_t)	$d.f.p = 0.7531F_t^3 - 1.564F_t^2 + 1.214F_t + 8.728$ RMSE = 0.06947
Compresión (F_c)	$d.f.p = 0.7531F_c^2 - 1.502F_c + 8.729$ RMSE = 0.1013

En las gráficas siguientes, se muestran los cambios en la distancia focal posterior encontradas de manera experimental en comparación con las distancias focales posteriores obtenidas de manera teórica en función de la fuerza aplicada. Estos valores teóricos se derivaron a partir de la expresión (2.17) presentada en el capítulo 2, utilizando los cambios en los radios de curvatura (R_1, R_2) y los cambios en el espesor de la lente (d). Estos datos se obtuvieron mediante los resultados de las simulaciones mostradas en el capítulo 4. Dichas gráficas permiten apreciar la correspondencia entre los resultados experimentales y los valores teóricos predichos.

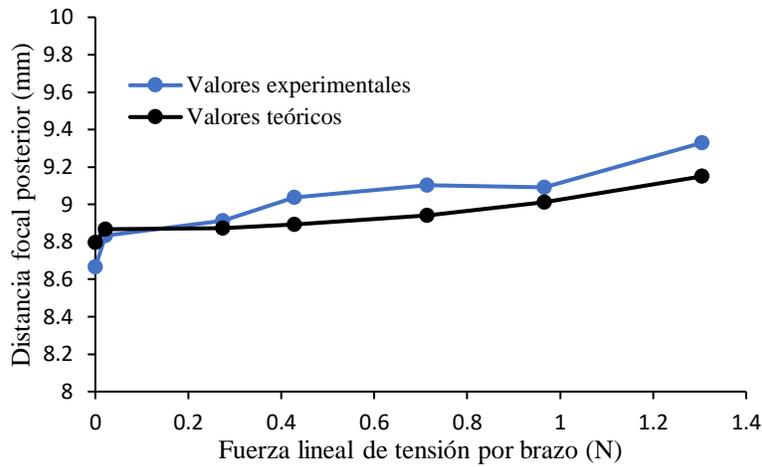


Figura 5.6. Cambios en el valor de la distancia focal posterior con respecto a la fuerza de tensión aplicada a cada brazo de la lente obtenidas de manera experimental y calculadas de manera teórica.

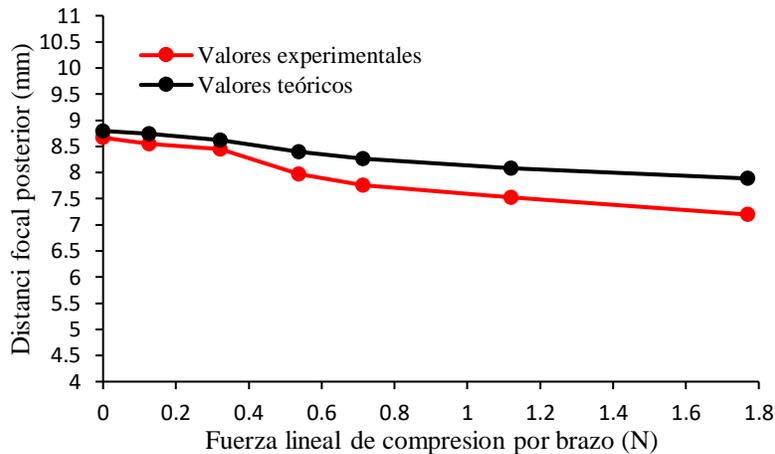


Figura 5.7. Cambios en el valor de la distancia focal posterior con respecto a la fuerza de compresión aplicada a cada brazo de la lente obtenidas de manera experimental y calculadas de manera teórica.

La gráfica de la Figura 5.6, exhibe el comportamiento de la distancia focal posterior al aplicar fuerzas de tensión. Se observa un desfase entre los valores experimentales y teóricos, en ambos casos hay un cambio abrupto en la pendiente que luego se estabiliza; esto es posible debido a las propiedades mecánicas del material, ya que el módulo del PDMS ofrece una mayor resistencia al principio de la aplicación de la tensión. El valor inicial cuando la lente no tiene aplicación de fuerza teóricamente es de 8.796 mm, mientras que, experimentalmente es de 8.667 mm. A medida que se aplica una fuerza lineal entre de 0 N y 0.3 N por brazo, la diferencia entre los valores teóricos y experimentales es mínima. Sin embargo, esta discrepancia aumenta al aplicar fuerzas mayores a 0.4 N por brazo. Con una aplicación de fuerza de tensión de alrededor 1.3 N por brazo, el valor de la distancia focal posterior teórica aumenta a un valor de 9.15 mm, en contraste con el valor experimental que llega a 9.33 mm. Esto resulta en una diferencia de 0.18 mm entre ambos. En otras palabras, se evidencia un mayor rango en la distancia focal posterior para las mediciones experimentales en comparación con

las predicciones teóricas. La desviación estándar entre los valores teóricos y experimentales de la distancia focal posterior se calculó en 0.123.

En el caso de las fuerzas de compresión mostradas en la gráfica de la Figura 5.7, también se observa un desfase entre los valores experimentales y teóricos. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, se muestran cambios en la distancia focal posterior más uniformes inicialmente. La diferencia entre los valores teóricos y experimentales es mínima con la aplicación de una fuerza lineal de compresión en cada brazo en el rango de 0 N a 0.3 N. No obstante, a medida que se aplica una fuerza mayor a 0.4 N por brazo, esta discrepancia aumenta. Con una aplicación de fuerza de compresión de alrededor 1.77 N por brazo, el valor de la distancia focal posterior teórica disminuye a un valor de 7.88 mm, mientras que el valor experimental desciende hasta un valor de 7.196 mm, esto resulta en una diferencia de 0.69 mm entre ambos valores y una desviación estándar de 0.332.

Las desviaciones estándar, que representa el desfase entre las dos curvas, para los cambios en la ($d.f.p$) en los casos en los que la lente está sometida a fuerzas lineales de tensión o compresión, indican las consideraciones no tenidas en cuenta en las predicciones teóricas. Estas consideraciones podrían incluir la fricción que ocurre en la montura, una mínima aplicación de fuerza en la lente en su estado inicial al estar sujeta (es decir, cuando la lente ya está previamente tensada o comprimida), o incluso una distribución no uniforme de las fuerzas lineales en cada brazo de la lente.

En resumen, mediante la aplicación de fuerzas lineales de tensión y compresión en los brazos de la lente sólida elástica, se obtuvo experimentalmente que es posible lograr un rango en la distancia focal posterior que va desde un valor de 7.886 mm hasta un valor de 9.33 mm (lo que equivale a 31.78 D en potencia óptica).

Por último, en el proceso de medición de la $d.f.p$, se capturaron las imágenes de los tamaños y formas de las manchas de luz al aplicar tensión y compresión en los bordes de la lente. Dichas imágenes muestran que, al aplicar tensión en la lente, las manchas de luz tienden a disminuir su diámetro. Por otro lado, al aplicar compresión, las manchas aumentan su diámetro. Estos cambios en los tamaños de las manchas de luz respaldan la evidencia del cambio en la distancia focal de la lente sólida de PDMS al aplicar estímulos mecánicos mediante la montura opto-mecatrónica, lo que demuestra a su vez su funcionamiento.

5.2. Conclusiones

En este trabajo de tesis, se hizo un estudio de las propiedades mecánicas y ópticas de una lente sintonizable sólida de PDMS. Esto se logró mediante la caracterización y uso de una montura opto-mecatrónica de bajo costo previamente diseñada y fabricada. El diseño y fabricación de la lente siguieron una metodología ya establecida, que tomó en cuenta los parámetros geométricos del cristalino del ojo humano según modelos anteriores.

Implementando un método experimental (con cálculos) y teórico (con simulaciones), fue posible evaluar el rendimiento de las componentes que integra la montura opto-mecatrónica, tales como: el consumo de corriente en los motores a paso, el desplazamiento angular y la magnitud del par de torsión del engrane principal que se requieren para poder ejercer fuerza sobre la lente a través del conjunto de sistemas biela-manivela y el conjunto de brazos adheridos. Los resultados revelan que la montura es capaz de aplicar fuerzas de tensión lineal en cada brazo de la lente en un rango de 0 a 1.305 N, cuando se produce un par de torsión en un rango de 0 a 110.76 N·mm, bajo un intervalo de consumo de corriente eléctrica en el sistema de motores a paso de 0 a 0.346 A. Caso contrario, en la aplicación de fuerzas lineales de compresión, la montura opto-mecatrónica ofrece un rango de 0 a 1.769 N, con un par de torsión en un rango de 0 a 150.09 N·mm y en un intervalo de corriente eléctrica de 0 a 0.3408 A. Esto demostró un mejor rendimiento en la aplicación de fuerzas de compresión, pero una mejor manipulación en la aplicación de fuerzas de tensión.

Las propiedades mecánicas y ópticas de la lente se resumen en los resultados de las simulaciones hechas en el software de elemento finito SolidWorks® y en los resultados experimentales, donde se encontraron expresiones que permiten conocer el comportamiento de los cambios en los radios de curvatura, las constantes de conicidad y la longitud focal en función de la fuerza aplicada. Las curvas que mejor describen el comportamiento de estos parámetros geométricos y ópticos son no lineales y pueden representarse mediante ecuaciones polinómicas de segundo y tercer grado. En general, se observa un mayor cambio en los radios de curvatura para la superficie anterior y un mayor cambio en la constante de conicidad para la superficie posterior con la aplicación de las fuerzas lineales. En un estado de compresión, se produce un mayor rango de variación en la distancia focal posterior que en un estado de tensión. La distancia focal posterior aumenta de manera cúbica con el aumento de la tensión y disminuye con el cuadrado de la fuerza lineal de compresión, alcanzando un rango de potencia óptica de 31.78 D.

Para la caracterización óptica, mediante un sensor de frente de onda tipo Shack-Hartman, fueron medidos los coeficientes de Zernike de la lente con y sin aplicar fuerzas lineales. Los coeficientes de aberración del frente de onda muestran principalmente valores altos de desenfoque, astigmatismo, trefoil y coma. Se observa, además, que los cambios son más significativos en los coeficientes de desenfoque, astigmatismo y aberración esférica cuando la lente está en estado de compresión, ya que tienden a aumentar considerablemente.

Es importante enfatizar que todos estos resultados se respaldan con la adquisición de imágenes obtenidas a través de una cámara CCD cuando la lente es sometida a tensión y compresión, donde es notable la capacidad de enfoque en dos objetos y las distorsiones en las imágenes.

En conclusión, este trabajo demuestra que es factible implementar una lente sólida sintonizable hecha de PDMS, bioinspirada en el cristalino del ojo humano, en conjunto con una montura opto-mecatrónica. Existe una clara relación entre las deformaciones de la lente sólida de PDMS y las fuerzas aplicadas, ya que es posible modificar su distancia focal y algunas aberraciones. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que existe una diferencia entre las predicciones teóricas y los resultados

experimentales, debido quizá a factores que afectan la eficiencia de la montura, tales como el desacoplamiento entre los engranes, la fricción generada en el sistema biela-manivela y la falta de herramientas más sofisticadas para evitar inclinaciones no deseadas. Estos resultados abren la puerta a futuros trabajos que busquen una mejora en la montura y en el rendimiento de la lente o inclusive para el desarrollo de nuevas propuestas que involucren diseños de monturas y la implementación de nuevos materiales para la fabricación de lentes sintonizables.

Este trabajo es parte de una serie de trabajos previos que buscan contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías en el área de formación de imágenes y las ciencias visuales [48,49,50].

Referencias

- [1] S.-Tson. Wu and H. Ren, *Introduction to adaptive lenses*. Wiley, 2012.
- [2] H. Zappe and C. Duppé, “Tunable Micro-optics.”Cambridge University Press,2016.
- [3] F. Carpi, G. Frediani, S. Turco, and R. D. De, “Bioinspired tunable lens with muscle-like electroactive elastomers,” *Adv Funct Mater*, vol. 21, no. 21, pp. 4152–4158, 2011.
- [4] D. Liang, K. Xiang, J.-W. Du, J.-N. Yang, and X.-Y. Wang, “Biomimetic optical system using polymer lenses with tunable focus,” *Optical Engineering*, vol. 53, no. 10, pp. 1–7, 2014.
- [5] A. S. Cruz-Felix, A. Santiago-Alvarado, A. Hernández-Méndez, E. R. Reyes-Pérez, and E. Tepichín-Rodríguez, “Optical performance of a PDMS tunable lens with automatically controlled applied stress,” in *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XVII*, 2016, pp. 1–8.
- [6] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, “Fundamentals of Photonics, 2nd Edition,” Wiley. 2007.
- [7] E. Hecht, “*Óptica*”, Addison-Wesley Iberoamericana, 1998.
- [8] D. Malacara, “*Optica Basica*,” *Ediciones Cientificas Universitarias*, 2015.
- [9] E.Benatti, F.(s.f).”*Óptica Geométrica (parte I)*”.
- [10] Universidad Nacional de Colombia. (s.f). “*Física de Oscilaciones Ondas y Óptica. CAPITULO 3: ÓPTICA GEOMÉTRICA*”.
- [11] G. Il Kweon and C. H. Kim, “Aspherical lens design by using a numerical analysis,” *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 51, no. 1, pp. 93–103, 2007.
- [12] M. E. Harrigan, “Effective Use of Aspheres in Lens Design,” in *1985 International Lens Design Conference*, SPIE, Feb. 1986, pp. 112–117.
- [13] A. A. Camacho P Cristina Solano, “Superficies esféricas aplicadas a la óptica,” no. 1, pp. 15–121.
- [14] D. Malacara-Hernández and Z. Malacara-Hernández, *Handbook of optical design*. 2017.
- [15] E. Lanchares, R. Navarro, and B. Calvo, “Hyperelastic modelling of the crystalline lens: Accommodation and presbyopia,” *J Optom*, vol. 5, no. 3, pp. 110–120, 2012.
- [16] S. Florida USF Tampa Graduate Theses, D. USF Graduate Theses, F. De Paoli, and D. Paoli, “Measuring Polydimethylsiloxane (PDMS) Mechanical Properties Using Flat Punch Nanoindentation Focusing on Obtaining Full Contact,” 2015.
- [17] A. S. Cruz-Félix, A. Santiago-Alvarado, J. Márquez-García, and J. González-García, “PDMS samples characterization with variations of synthesis parameters for tunable optics applications,” *Heliyon*, vol. 5, no. 12, pp. 1–6, 2019.
- [18] A. S. C. Félix, A. Santiago-Alvarado, F. Iturbide-jiménez, and B. Licona-morán, “Physical-chemical properties of PDMS samples used in tunable lenses,” *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 563–571, 2014.

- [19] Y. Mejía Barbosa, “El frente de onda y su representación con polinomios de Zernike The Wavefront and its Representation with Zernike Polynomials,” *cien. tecnol. salud. vis. ocul.*, vol. 9, no. 2, pp. 145–166, 2011.
- [20] M. Born and E. Wolf, “*Principles of Optics*”, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1999.
- [21] J. Sasián, *Introduction to aberrations in optical imaging systems*, vol. 9781107006331. 2011.
- [22] R. Fischer and T. Biljana, “Basic Optics and Optical System Specifications,” McGraw Hill Professional, 2000.
- [23] American National Standard, “Methods for Reporting Optical Aberrations of Eyes. Optical Laboratories Association”, 2000.
- [24] R. V. Olarte, “Entendiendo e interpretando las aberraciones ópticas,” *Cien. Tecnol. Salud. Vis. Ocul.*, vol. 9, no. 2, pp. 105–122, 2011.
- [25] V. N. Mahajan, *Optical imaging and aberrations: Part II: Wave diffraction optics: Second edition*, 2001.
- [26] D.-T. Van-Pham, M.-T. Nguyen, H. Nakanishi, T. Norisuye, and Q. Tran-Cong-Miyata, “Applications of Mach-Zehnder Interferometry to Studies on Local Deformation of Polymers Under Photocuring,” in *Optical Interferometry*, 2017.
- [27] G. R. Toker, *Holographic Interferometry: A Mach-Zehnder Approach*. 2017.
- [28] THORLABS. “Optical Wavefront Sensors Operation Manual”, 2018.
- [29] Universidad de Cantabria, Departamento de Ing.Estructural y Mecánica. Cinemática y dinámica de máquinas, Capítulo VI: “Engranajes y Mecánica”.
- [30] R. Norton, “DISEÑO DE MAQUINARIA: Síntesis y análisis de máquinas,” *McGraw-Hill*, 2009.
- [31] Microchip Technology. “Stepping Motors Fundamentals”, 2004.
- [32] R. Crowder, *Electric Drives and Electromechanical Systems*. 2005.
- [33] “Introduction to Stepper”. Microchip Technology WebSeminar (2007). Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.microchip.com/stellent/groups/sitecomm_sg/documents/devicedoc/en543047.pdf
- [34] “Diseño y construcción de un Plotter Router Fresadora CNC mediante motores paso a paso.” Accessed: Feb. 09, 2023. [Online]. Available: http://www.alciro.org/alciro/Plotter-Router-Fresadora-CNC_1.
- [35] “Motores Paso a Paso.” Accessed: May 09, 2023. [Online]. Available: <http://manueldelgadocrespo.blogspot.com/p/motores-pasopaso.html>
- [36] D. Askeland, P. Fulay, and W. Wright, *Ciencia e Ingeniería de Materiales 6 Ed.* 2012.
- [37] M. Andersen, O. S. Hopperstad, and A. H. Clausen, “Volumetric strain measurement of polymeric materials subjected to uniaxial tension,” *Strain*, vol. 55, no. 4, pp. 1–18, 2019.
- [38] Leyva Pacheco Miroslava, Tesis: “Rediseño de componentes optomecánicos para aplicación en ciencias visuales,” UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA, 2018.

- [39] R. Navarro, J. Santamaria, and J. Bésocos, “Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics,” 1985.
- [40] A. Santiago-Alvarado *et al.*, “Design and analysis of an adaptive lens that mimics the performance of the crystalline lens in the human eye,” in *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XV*, pp. 1–9, 2014.
- [41] The Dow Company Chemical, “The Dow Company Chemical., SYLGARD TM 184 Silicone Elastomer Technical Datasheet.” 2017.
- [42] Kiatronics.Datasheet, “28BYJ-48 – 5V Stepper Motor.”
- [43] R. L. Mott. “Resistencia de materiales” (Quinta ed.). Pearson, 2009.
- [44] F. Beer, “Mecanica vectorial para ingenieros DINAMICA,” *McGraw-Hill Interamericana*, vol. 11, 2017.
- [45] P. Kumar, *Mechanics of Materials: A Friendly Approach*. 2022.
- [46] P. C. GOPE, *Machine design: Fundamentals and applications*. 2012.
- [47] Molina P. Jaime G., *Fundamentos del Método de elemento finito*. 2010.
- [48] A. Santiago Alvarado, F. Salomón Granados Agustín, O. Huerta Carranza, B. Rafael López Raymundo, and A. Jesús Mendoza Jasso, “Dependence of the focal length of a solid elastic lens on the applied radial force,” (Artículo enviado a la revista *Opt Lasers Eng*).
- [49] A. Santiago Alvarado, F. Salomón Granados Agustín, B. Rafael López Raymundo, A. Hernández Mendez, and O. Huerta Carranza, “Development of a bio-inspired optical system that mimics accommodation and lighting regulation like the human eye,” (Artículo enviado a la revista *Applied Optics*).
- [50] Santiago Alvarado Agustín, Granados Agustín Fermín Salomón, López Raymundo Brayan Rafael, Huerta Carranza Oliver, and Cruz Martínez Victor Manuel, “Evaluación de moldes de aluminio con acabado óptico para fabricar lentes solidas elásticas”. (Poster aceptado para presentar en el LXVI Congreso Nacional de Física).