

# Rediseño, análisis y simulación mecánica del comportamiento de una lente sólida elástica SEL de apertura máxima

J. González-García, F. Iturbide-Jiménez, A. Santiago-Alvarado, V. H. Castillejos-Reyes,  
R. M. Cruz-Sánchez, V. I. Moreno-Oliva\* y E. A. López-López

*Universidad Tecnológica de la Mixteca UTM,*

*Km 2.5 Carretera a Acatlima, Huajuapán de León Oaxaca, C. P. 69000, México,*

*\*Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec,*

*Oax., 70760, México,*

*e-mail: santigo@mixteco.utm.mx*

Received 9 January 2013; accepted 29 July 2013

Un tipo de lente adaptiva es la lente conocida como Lente Sólida Elástica (SEL), la cual está formada por un cuerpo principal elástico de PDMS Sylgar 184 y por una montura elaborada en aluminio que permite aplicarle fuerzas radiales a dicho material elástico, permitiendo de esta manera que los parámetros geométricos de la lente cambien. En trabajos previos se reportó la construcción y funcionamiento óptico de una SEL; la montura de esta lente presenta algunos inconvenientes mecánicos que generan que la imagen formada contenga aberraciones adicionales cuando se considera la apertura completa de la lente. Para mejorar el desempeño de este tipo de lente adaptiva, se presenta un estudio de optimización y rediseño de la montura mecánica que permite que las fuerzas radiales aplicadas sean más homogéneas sobre el material elástico para una apertura máxima de la SEL, tal y como lo muestran los resultados del análisis mecánico realizados en Solidwork<sup>®</sup>.

*Descriptores:* Lente sólida elástica; lente sintonizable; diseño de una lente sintonizable.

One type of adaptive lens known as the Solid Elastic Lens (SEL) is composed mainly of PDMS sylgar 184 elastic body and a mount made of aluminum. Radial forces can be applied to this elastic body thereby allowing the geometric parameters of the lens to change. Previous studies reported the construction and the optical performance of a SEL; the mount of this lens has some inconvenient mechanical drawbacks which cause additional aberrations in the image produced when the entire aperture of the lens is considered. In order to improve the performance of this type of adaptive lens, a study is presented of the optimization and redesign of the mechanical mount to enable the radial forces applied to be more homogenous on the elastic material for maximum aperture of the SEL, as shown in the results of the mechanical analysis done in Solidwork<sup>®</sup>.

*Keywords:* Solid elastic lens; tunable lens; mechanical design of tunable lens.

PACS: 78.20.Bh; 7.05.Tp; 2.70.Dh; 42.70.Jk

## 1. Introducción

En los últimos años ha habido un gran desarrollo de la óptica adaptiva refractiva, tal es así que en la actualidad existen diferentes tipos de lentes adaptivas como las lentes líquidas, electro-húmedas, cristal líquido, etc. [1-6], una lente adicional de este tipo es la lente llamada lente sólida elástica (SEL). La SEL (de sus siglas en inglés: Solid Elastic Lens), fue creada a partir de diseñar, construir y analizar un modelo optomecánico que imitará el funcionamiento real del ojo humano mediante el uso de una lente adaptativa del tipo sólida [7]. Esta lente se basa en el principio de funcionamiento del cristalino humano, el cual se deforma al aplicarle fuerzas radiales sobre sus bordes por los músculos ciliares, enfocando así los objetos que se encuentran a diferentes distancias. En el caso del diseño de la SEL, las fuerzas radiales son aplicadas mediante una montura mecánica que jala un conjunto de mordazas incrustadas en la periferia de un material elástico que forma el cuerpo de una lente del tipo biconvexa.

En los últimos años se han reportado tres tipos de lentes sólidas sintonizables: 1) microlente sólida sintonizada térmicamente [8]; 2) lente sólida elástica de apertura máxima sintonizada mecánicamente [9,10] con un diámetro efectivo de

30 mm y 3) una lente sólida sintonizada por medio de un actuador [11]. En este último tipo de lente se considera un diámetro efectivo de 8 mm de un diámetro inicial de 20 mm, cuyo funcionamiento por consecuencia se considera en la zona paraxial. Los resultados obtenidos de la caracterización del segundo tipo de lente [7] muestran el comportamiento adaptivo, modificando su distancia focal al aplicarle fuerzas radiales mecánicamente, cambiando de esta manera sus parámetros geométricos: grosor, radios de curvatura y diámetro. Las aberraciones del frente de onda generadas por esta lente, al cambiar los parámetros geométricos, fueron cuantificadas al analizar los interferogramas obtenidos experimentalmente con un interferómetro de difracción por punto [10]. El diseño construido de este tipo de lente [7,9] con un sistema mecánico, presenta el problema de generar aberraciones adicionales a la lente misma, debido al diseño de la montura, la cual no transmite de manera homogénea las fuerzas radiales aplicadas al material elástico que forma a la lente, además de que ésta montura fue diseñada para formar parte de un sistema de un modelo del ojo humano, por lo que debe realizarse un rediseño de la montura de la lente que permita: 1) corregir de manera significativa el problema mecánico presente y 2) su uso en cualquier sistema óptico en general.

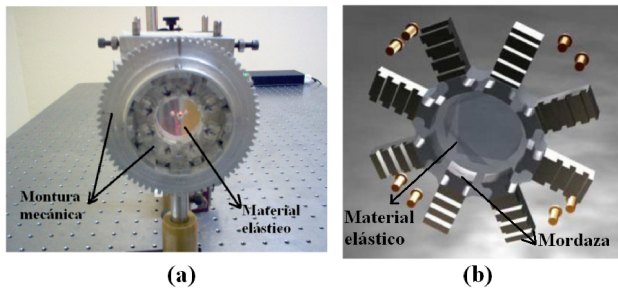


FIGURA 1. Lente Sólida Elástica SEL: a) fotografía de lente construida y b) esquema de la lente y mordazas.

## 2. Diseño original de la SEL

La SEL es un sistema compuesto por una montura mecánica que permite la aplicación de fuerzas radiales por medio de un sistema de 8 mordazas incrustadas dentro del material (PDMS) que forma el cuerpo de la lente, (Fig. 1a). Las fuerzas radiales son aplicadas en los bordes de la SEL para deformarla, (Fig. 1b). El material elástico de la lente permite la deformación y recuperación de la forma original de la lente cuando las fuerzas radiales son suprimidas.

Los problemas presentes en el sistema completo de la SEL (montura-lente) son los siguientes:

1. La geometría y distribución de las mordazas, ver Fig. 2, provoca que el desplazamiento radial de las mordazas no se transmita a toda la periferia de la lente de forma homogénea.
2. La cantidad de puntos sobre los cuales se aplican las fuerzas radiales a la SEL no son suficientes, ya que la lente al ser estirada por medio de la montura, no se extiende en forma homogénea sobre toda su periferia, lo que provoca a su vez que la imagen generada por la lente de una fuente puntual al infinito (llamada diagrama de mancha), esté deformada, tal y como se muestra en la Fig. 3.
3. El mecanismo del engrane de la montura, mostrada en la Fig. 1a, al momento de girarlo de forma manual (aplicación de las fuerzas radiales y por consecuencia desplazamiento radial de la SEL), no cuenta con un seguro que le permita al engrane permanecer estático, para fijar la lente en esa deformación o estiramiento radial.
4. El molde empleado en el proceso de fabricación e inyectado de la mezcla debe garantizar que la mezcla cubra completamente el cuerpo de la lente y las mordazas, lo cual permitirá una transmisión homogénea de las fuerzas sobre el cuerpo de la lente por parte del sistema mecánico. Ya que como se observa en la Fig. 3, la deformación de la lente en las regiones de las mordazas no es igual, existen algunas mordazas que provocan mayores deformaciones debido a un mejor contacto y que en ellas se transmite mayormente la fuerza aplicada.

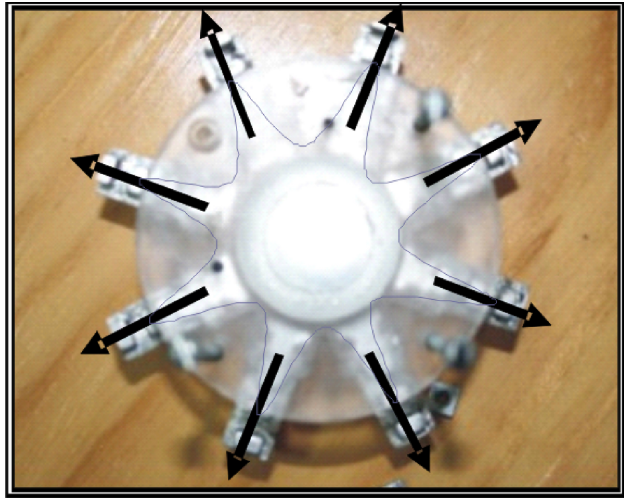


FIGURA 2. Elongación de la Lente Sólida Elástica al aplicar fuerzas por medio de las mordazas.

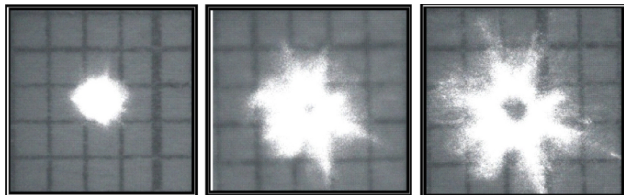


FIGURA 3. Diagrama de manchas generadas por la lente adaptiva SEL a medida que aumentan las fuerzas radiales aplicadas.

En los diagramas de manchas mostrados en la Figura 3, se aprecia la alta capacidad adaptiva que presenta este tipo de lente, de ahí la importancia que tiene el hacer un rediseño de la montura para atenuar la deformación de la imagen generada por los esfuerzos aplicados de manera desigual con la montura y no por aberraciones de la lente misma. En la siguiente sección se presenta una propuesta de diseño de la montura mecánica la cual disminuirá y optimizará el funcionamiento óptico de la SEL.

## 3. Nuevo diseño de la montura de la SEL

En la sección anterior se especificó la problemática a solucionar para mejorar el desempeño de la lente, para esto, se aplicó la técnica de análisis de Valor que consiste en definir y analizar las funciones de cada una de las piezas que conforman el modelo opto-mecánico. A partir de establecer claramente las funciones de cada elemento, posteriormente se establecen los requerimientos de diseño que da lugar al diseño de 4 propuestas, de las cuales se seleccionó la más apta para su fabricación, de acuerdo con los materiales, herramientas y maquinaria con la que se cuenta.

La metodología seleccionada para el rediseño de la montura de la SEL corresponde a la propuesta por Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger [12], empleada en el desarrollo de productos que consideran innovación conceptual de diseño (la cual consta de seis fases, y de ellas solo se han tomado cinco

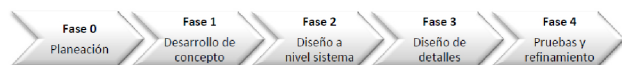


FIGURA 4. Metodología de desarrollo de productos de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger para la elaboración del rediseño de la SEL.

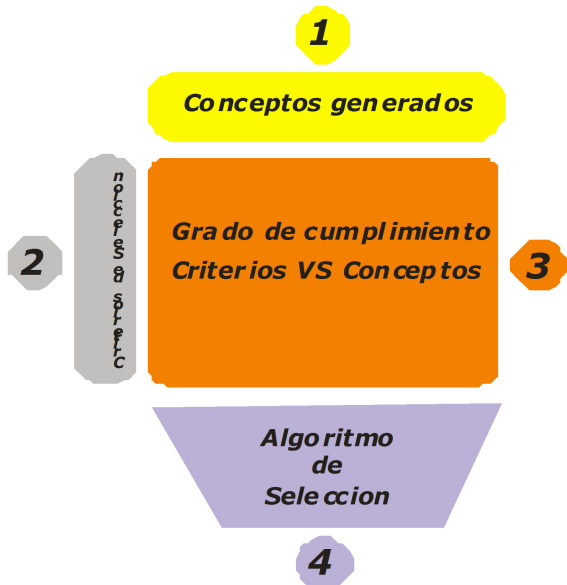


FIGURA 5. Método de selección ponderado Pahl & Beitz.

(ver Fig. 4), que son las que mejor se adecuan para la elaboración del rediseño).

Para la selección de la mejor propuesta conceptual del mecanismo de mejora se optó por la utilización del método de selección ponderado [13]. El cual consiste de cuatro pasos o fases (ver Fig. 5). El primer paso consiste en listar los conceptos a evaluar; el segundo consiste en elegir los criterios de selección; el tercero es valorar el grado de cumplimiento de cada concepto respecto de cada criterio de selección, y finalmente, mediante un algoritmo de selección se determina el mejor concepto.

Otro aspecto importante para determinar el grado de mejora de un producto es mediante un análisis de valor el cual consiste en emplear un método ordenado y creativo para aumentar el valor de un ítem. Este “ítem” puede ser un producto, un sistema, un proceso, un procedimiento, un plan, una máquina, un equipo, una herramienta, un servicio o un método de trabajo. El “Análisis de valor”, denominado también “Análisis funcional”, fue creado por L.D. Miles [14].

La aplicación de las dos metodologías (desarrollo de productos y selección ponderada) junto con un análisis de valor aplicadas al rediseño de la SEL, nos permitió generar una propuesta eficiente, óptima y funcional. Para determinar ésta, se realizaron 3 diseños de montura (ver Fig. 6), las cuales cumplían con los requerimientos iniciales de diseño mecánico y construcción del prototipo. Posteriormente se aplicó el método de valor técnico ponderado para la selección de la mejor propuesta, resultando como diseño final la propuesta de la Fig. 6(b).

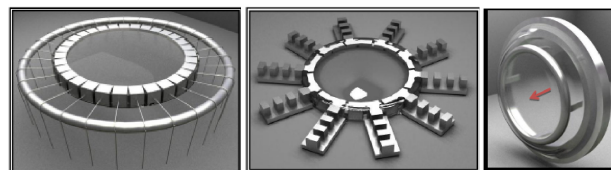


FIGURA 6. Propuestas de rediseños de monturas: a) con tensores, b) con mordazas, y c) con anillo de sujeción.

A continuación se presenta la propuesta final del rediseño de la montura de la SEL:

La propuesta final consistió en realizar dos modificaciones principales al diseño original: 1) modificación de la forma de las mordazas originales, mostrada en la Fig. 7a, en la parte superior que sujeta la lente, ver Fig. 7b, y 2) aumentar el número de mordazas a 12. Estas dos modificaciones se realizaron con el objetivo de aumentar el área de contacto entre el material elástico y las mordazas además de permitir una distribución uniforme de las fuerzas en el borde de la lente, tal y como puede observarse en la Fig. 8; al comparar el conjunto de mordazas del diseño original con el nuevo conjunto propuesto para el nuevo diseño. En la Fig. 8b se observa que las mordazas se enlazan entre sí garantizándose una mayor área de contacto lo que genera una elongación más uniforme.

Esta propuesta surgió para mejorar el contacto entre el material de la lente y las mordazas, y que éstas puedan transmitir los esfuerzos de manera eficiente, íntegra y homogénea. El análisis de valor junto con el método ponderado, permitieron optimizar el rediseño y funcionamiento, obteniendo un mejor rendimiento y mejorando el contacto entre el cuerpo de la lente y las mordazas.

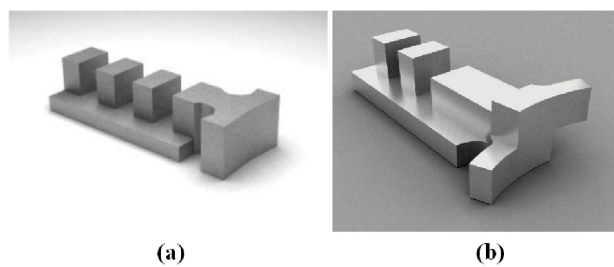


FIGURA 7. Propuesta de mordaza: a) del diseño original y b) del nuevo diseño propuesto.

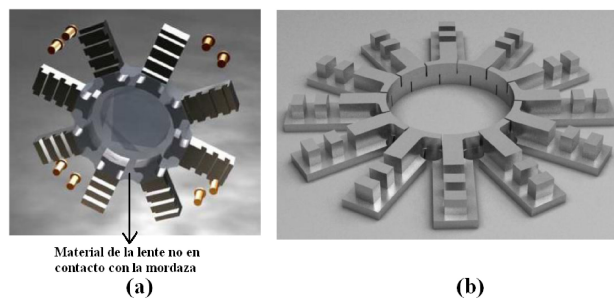


FIGURA 8. Comparación del sistema de sujeción entre el a) diseño original y b) rediseño propuesto.



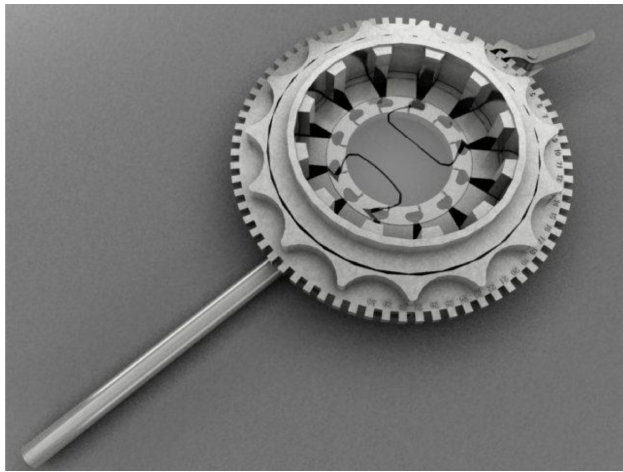


FIGURA 9. Rediseño completo de la montura de la SEL.

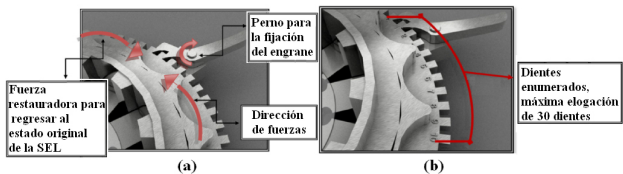


FIGURA 10. Partes complementarias del rediseño de la montura de la SEL: a) sistema de fijación; b) sistema numérico.

En la Fig. 9 se muestra el rediseño completo de la montura de la lente, en la cual al engrane del sistema de apertura se le hará girar manualmente añadiendo algunas muescas ergonómicas que ayudan a tener mejor apoyo en los dedos y por consiguiente mayores puntos de contacto ya que se colocarán los cinco dedos de la mano, siendo más cómodo para su manipulación. En este nuevo diseño, también se le ha incluido un sistema de fijación (Fig. 10a) y un sistema numérico incluido en el engrane, ver Fig. 10b. En el sistema de fijación, en el momento de hacer girar el engrane, permitirá que automáticamente se active una cuña o ancla que deje pasar cada uno de los dientes del engrane, esto mediante un perno que le brinda movilidad. Al dejar de aplicarle fuerza al engrane, éste tenderá a regresar a su estado original quedando fija la cuña en los dientes del engrane e impidiendo el movimiento a su posición original. En el caso de la incorporación del sistema numérico, se pretende a través de él medir la elongación de la SEL mediante el conteo de los dientes recorridos, tomando como referencia el perno.

#### 4. Resultados del análisis mecánico

Una vez obtenido el rediseño final de la SEL, se realizó un análisis del comportamiento mecánico (funcional) de las piezas de la montura con Análisis de Elemento Finito (FEA), donde se consideran los esfuerzos a los que son sometidas las piezas nuevas o modificadas, así como sus desplazamientos.

Para la realización del análisis mecánico se empleó el software Solidworks®, se inició el análisis evaluando las

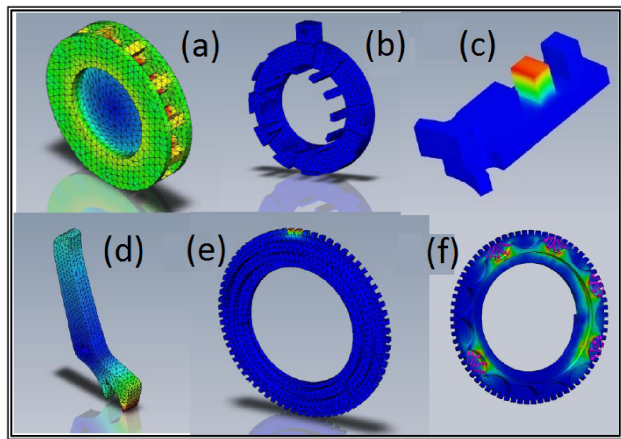


FIGURA 11. Componentes mecánicos de SEL. a) Soporte SEL, b) base SEL, c) mordaza, d) seguro, e) engrane y f) engrane roscado con relieves.

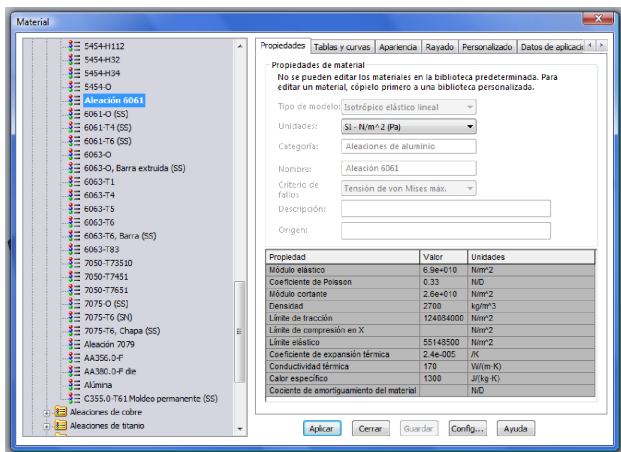


FIGURA 12. Propiedades de aleación de aluminio 6061 incluido en el catálogo de SolidWorks®.

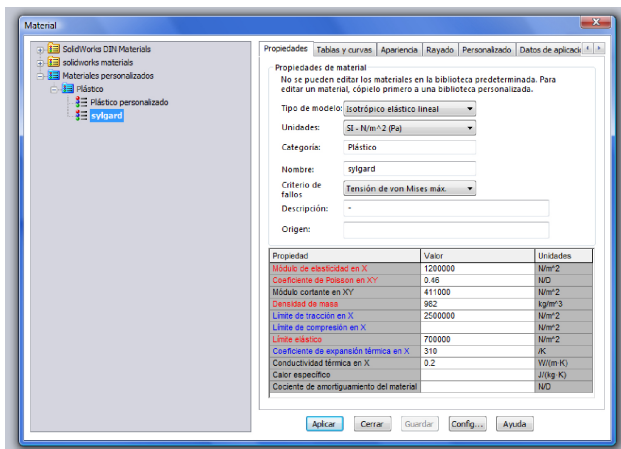


FIGURA 13. Propiedades del PDMS Sylgard 184 introducidos en el programa del Solidworks® para la realización del análisis mecánico de la SEL (estos fueron medidos experimentalmente, ya que no se encuentra en la base de datos del programa).



piezas por separado (ver Fig. 11) para corregir imperfecciones. El material de la montura es una aleación de aluminio 6061 (ver Fig. 12) con el cual se construyeron las piezas y el material PolidimetilSiloxano Sylgar 184 (PDMS Sylgar 184) se utilizó para el cuerpo de la lente, en la Fig. 13 se muestran los datos de este material introducidos en el software.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las tensiones y desplazamientos de los componentes que forman a la SEL:

El estudio arrojó un factor de seguridad de 2.3, como se muestra en la Fig. 14, soportando una carga máxima de 23 N por cada una de las mordazas. Con este cálculo se aplicó la fuerza máxima que soporta la lente y se determinaron las tensiones y desplazamientos que sufren los elementos que interaccionan con la montura mecánica.

El siguiente estudio se enfocó al material de la lente que está en contacto directo con la mordaza. Sólo se consideró una mordaza, debido a que los esfuerzos en cada una de ellas son idénticos y simétricos, ya que se emplea un disco en forma de espiral que transmite los esfuerzos de manera lineal. La fuerza que se aplicó fue la obtenida del límite de ruptura del bloque del elastómero (23 N) y se aplicó en las caras en contacto con la lente, tal y como puede observarse en la Fig. 15. Las tensiones máximas generadas por la lente en la mordaza fueron de  $2.06839 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup> y un desplazamiento máximo de 0.0022293 mm. Estos desplazamientos son imperceptibles y no generan problemas en la estructura de la mordaza. El resultado de los desplazamientos y deformaciones generaron un factor de seguridad de 2.7, lo que significa que la fuerza aplicada es casi 1/3 parte de la carga máxima que soportan los ganchos de las mordazas. Las tensiones máximas generadas por la fuerza aplicada en la mordaza fueron de  $6.77448 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> y un desplazamiento de 0.000729278 mm lo cual es imperceptible.

El siguiente análisis se enfocó a la parte de la mordaza donde existe contacto con la espiral y que es la que transmite la (acción de la fuerza o) resistencia de la lente hacia la misma mordaza. La fuerza aplicada es obtenida del límite de ruptura y se aplicó a una de las caras en contacto con la espiral, ver Fig. 16.

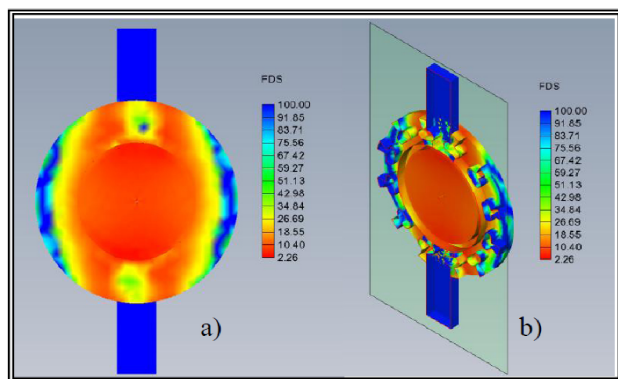


FIGURA 14. Factor de seguridad de 2.3 generado por la lente a) Vista frontal y b) Corte de la lente.

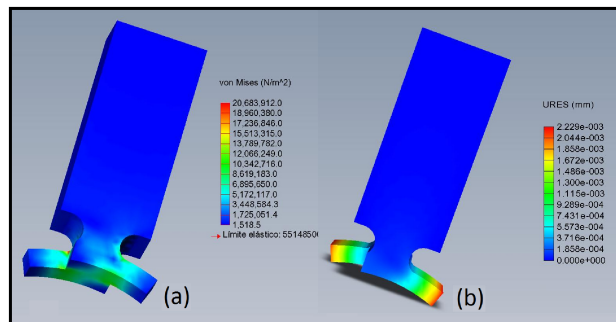


FIGURA 15. Análisis de mordaza al aplicar fuerza sobre la lente: a) tensiones generadas y b) desplazamientos producidos.

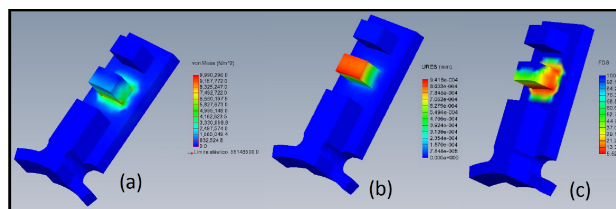


FIGURA 16. Análisis de la mordaza en contacto con la espiral: a) tensiones producidas, b) desplazamientos generados y c) FDS.

En el caso del engrane dentado se tomó la carga máxima que soporta la lente flexible para determinar la fuerza que actúa en el seguro implementado en el sistema, lo cual fue de 23 N por cada mordaza, sabiendo que el total de las mordazas son 12, la carga máxima que soporta el sistema completo (SEL-montura mecánica) es de 276 N (28139.67 g). Dicha carga se distribuye en 2 dientes del engrane ya que son el número de elementos que conforman el seguro, esto para poder determinar las tensiones y desplazamientos que produce sobre el mismo, ver Fig. 17. El factor de seguridad generado por el engrane es de 1.4 aplicando una fuerza de 138 N en cada diente. Esto significa que el engrane soporta 193.2 N en cada diente dando como resultado 386.4 N en su totalidad y sabiendo que el límite de ruptura de la lente es de 276 N en su totalidad. Con estos resultados podemos deducir que el engrane es capaz de soportar dichas fuerzas generadas por la lente.

En la parte posterior del engrane roscado se encuentra la estrella que es la que se encarga de brindar soporte a los dedos para poder girar el engrane. Se analizaron cinco puntos

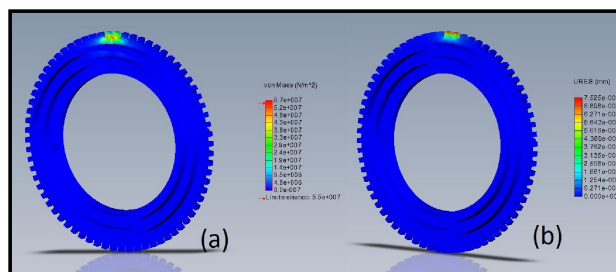


FIGURA 17. a) Tensiones generadas en los dientes del engrane y b) desplazamientos producidos por el contacto del seguro con el engrane.

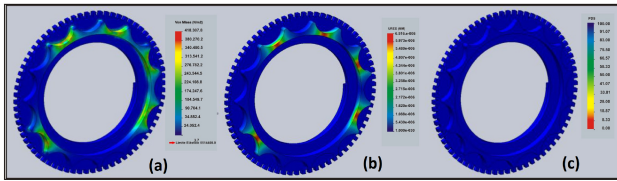


FIGURA 18. a) Tensiones, b) desplazamientos y c) FDS de los puntos de contacto sobre el engrane.

en los que se pueden colocar los dedos, aplicando una carga aproximada de 10 N por cada uno de los apoyos. Se generaron tensiones de 418188 N/m<sup>2</sup> y desplazamientos de 6.51647e<sup>-005</sup> mm en cada punto, generando un factor de seguridad de 130, ver Fig. 18. Con estos datos no existe ningún problema de aplicar gran cantidad de fuerza sobre los puntos de contacto ya que puede soportar 1300 N en cada uno.

El siguiente componente que se analizó fue la parte en la que se une el seguro y la base, ya que se genera una fuerza cortante al aplicar fuerza con el disco dentado de la montura. Se generó una tensión de 9.84638e<sup>+008</sup> N/m<sup>2</sup> y un desplazamiento de 0.589615 mm. Con la fuerza aplicada se genera un factor de seguridad de 0.63 lo que significa que la máxima carga que soporta es de 173.914 N (17727.99 g), esto tomando en cuenta que la carga aplicada es la máxima soportada por la SEL en su totalidad que es de 276 N. En la Fig. 19 se observan las tensiones máximas sobre el perno, el desplazamiento generado por la fuerza, así como el factor de seguridad. Estos resultados muestran que la base resiste las fuerzas aplicadas de una manera confiable ya que no se percibe algún desplazamiento o algún tipo de estrés, pero tanto el perno como el seguro sufren de una mayor tensión dentro de los rangos aceptados por el material sin llegar a romperse o tener un mal desempeño.

Otro sistema implementado en la montura es el seguro, por lo que se analizan las partes en donde existe contacto con los dientes del engrane. Un primer análisis se hizo con Aluminio, ya que es el material con el que se fabricó la primera SEL, obteniéndose una tensión máxima de 126099480 N/m<sup>2</sup> lo cual sobrepasa por mucho el límite elástico del material que es de 55148500 N/m<sup>2</sup> provocando una posible fractura de la pieza en la zona verde que se aprecia en la Fig. 20. Se obtuvieron los desplazamientos generados por la fuerza que fueron de 0.025293 mm en el sentido de la fuerza, lo que se transmite en un factor de seguridad máximo de 0.44. Esto implica que la fuerza generada por la lente es de tal magnitud que la geometría no la soporta provocando un mal desempeño. Para solucionar este problema fue necesario sustituir el material por uno más resistente y posteriormente analizarlo

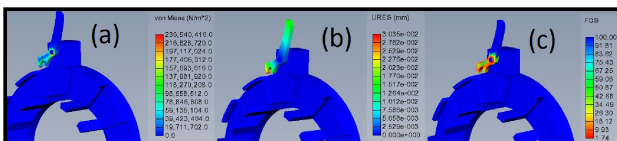


FIGURA 19. Resultados del contacto de la base, perno y seguro: a) tensiones máximas, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

para verificar su desempeño. Para el segundo análisis se utilizó el Acero DIN (X10Cr13) almacenado en la base de datos de SolidWorks, que por su correspondencia comercial en Estados Unidos es el AISI 41013. Sus propiedades básicas son: Elevada dureza y gran facilidad de maquinado, así como resistencia a la corrosión moderada, por lo que se considera un material con alta resistencia mecánica. Al realizar el análisis con el material propuesto se generó una tensión máxima de 124233392 N/m<sup>2</sup>, un desplazamiento máximo de 0.00918197 mm y un factor de seguridad de 4.2, como se muestra en la Fig. 21. Esto se traduce en una mejora considerable en la capacidad de resistir las fuerzas generadas por la lente.

Para el caso de la lente, el análisis se basó en los esfuerzos producidos por las fuerzas radiales aplicadas. En la Fig. 22 se observan las fuerzas (de 10 N) y restricciones (orificio de la parte del eje óptico de la lente como soporte fijo) aplicadas tanto al diseño de la lente propuesta con 12 mordazas como al primer diseño con 8 mordazas. En la Tabla I se muestran los resultados obtenidos de las tensiones y desplazamientos máximos, cuyos análisis son mostrados en las Figs. 23 y 24 para el caso del nuevo diseño propuesto y para el diseño original respectivamente. En estas Figuras se muestra un corte lateral de las lentes aplicando una fuerza de 0 y 10 N.

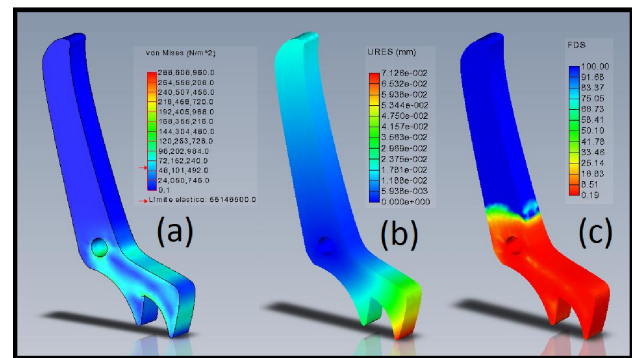


FIGURA 20. Análisis del seguro en material de Aluminio: a) tensiones, b) desplazamientos y c) FDS.

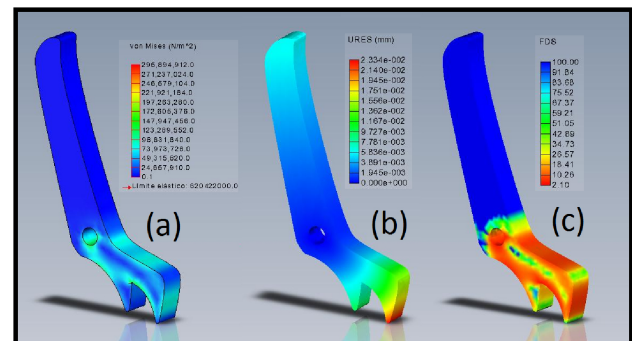


FIGURA 21. Análisis del seguro utilizando un material de Acero inoxidable: a) tensiones, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

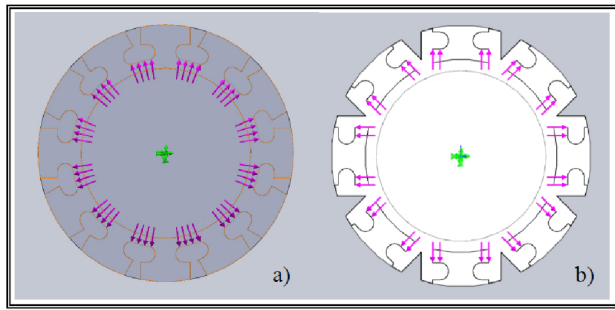


FIGURA 22. Sistema de fuerzas aplicadas en la lente: a) diseño propuesto con doce mordazas y b) diseño con ocho mordazas.

TABLA I. Comparativa de los resultados obtenidos para las lentes.

Tipo de estudio	Lente con 12 mordazas	Lente con 8 mordazas	Diferencia
Tensiones generadas	368062 N/m <sup>2</sup>	325242 N/m <sup>2</sup>	42820 N/m <sup>2</sup>
Desplazamientos	2.63474 mm	1.87082 mm	0.76392 mm
FDS	1.9	2.2	0.3

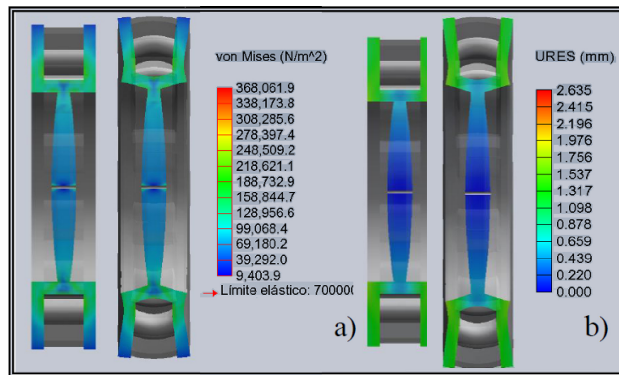


FIGURA 23. Corte generado en vistas en estado normal y con aplicación de fuerzas con el diseño de 12 mordazas para visualizar: a) tensiones y b) desplazamientos.

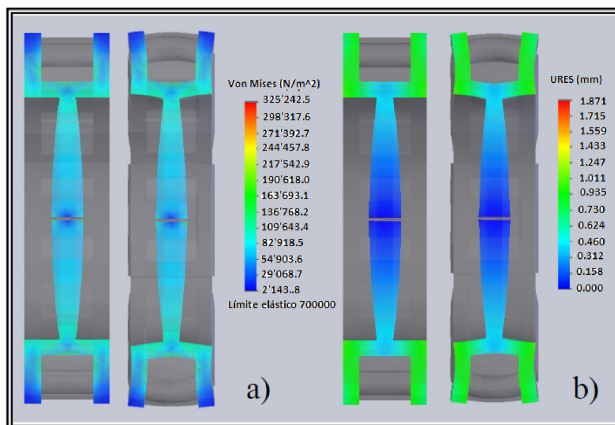


FIGURA 24. Corte generado en vistas en estado normal y con aplicación de fuerzas con el diseño de 8 mordazas donde se visualiza: a) tensiones generadas y b) desplazamientos.

Los resultados de la Tabla I muestran el comportamiento y desempeño de las dos propuestas de lentes al girar la rueda dentada una misma cantidad en ambos diseños. Estos resultados muestran que en el caso de las tensiones se genera un aumento por parte de la lente diseñada con 12 mordazas de 42820 N/m<sup>2</sup>. Esto significa que la lente está sometida a fuerzas más grandes debido al aumento del área de contacto por parte de las mordazas y el material de la lente, debido a que disminuye el material elástico generándose por consecuencia una tensión más grande (es decir desaparecen picos de tensión lo que mejora la distribución de esfuerzo). Cabe mencionar que la lente está diseñada para soportar 2.3 (factor de Seguridad) veces más la fuerza aplicada antes de que sufra una posible fractura del material por cada mordaza, soportando un total de 276 N, esto es 44 N más que el diseño con 8 mordazas. En los desplazamientos, de igual manera, se percibe un aumento de 0.764 mm por parte de la lente diseñada con 12 mordazas. Como se observó en la Tabla I, las fuerzas producidas en las lentes tienen una variación de 3N (305.8 g), lo que implica que con menores esfuerzos se generan mejores desplazamientos.

Para comprobar que en el diseño propuesto se tiene una elongación más uniforme y un mejor desempeño que en el diseño previo (y que por consecuencia se debe generar una mejoría en la calidad de las imágenes obtenidas por la lente al mejorar el desempeño de la montura mecánica). Se realizó un análisis adicional, en el cual se tomaron dos cortes en ambas lentes para comparar el desempeño de éstas de forma

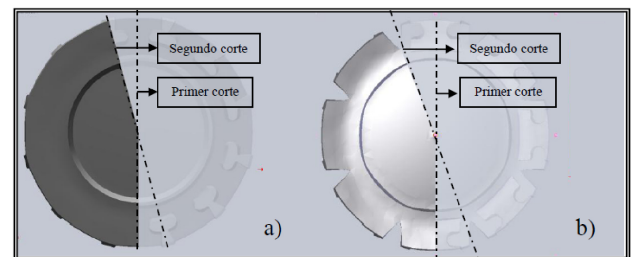


FIGURA 25. Cortes generados en ambas lentes para realizar análisis de tensiones y desplazamientos: a) lente propuesta y b) lente diseñada anteriormente.

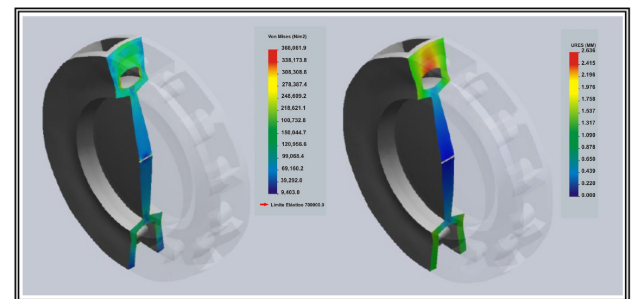


FIGURA 26. a) Tensiones y b) desplazamientos generados en dos diferentes cortes para la lente con 12 mordazas.



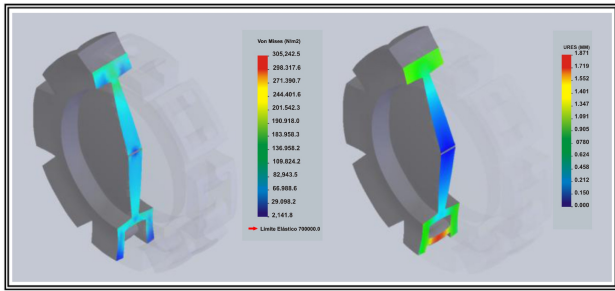


FIGURA 27. Resultado de a) tensiones y b) desplazamiento ubicados en diferentes cortes de la lente con 8 mordazas.

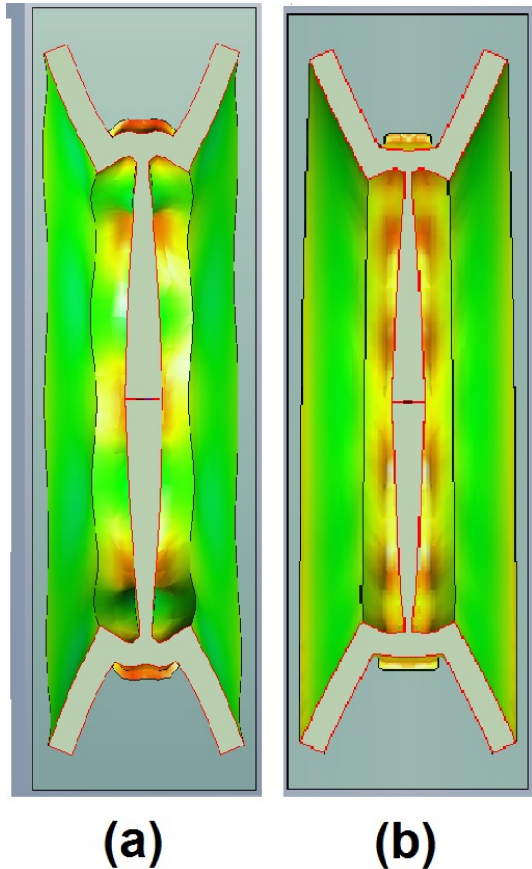


FIGURA 28. Cortes de lentes simuladas con: a) 8 mordazas y b) 12 mordazas.

gráfica y comprobar si existe una deformación uniforme en la lente en su estructura interna. El primer corte se realizó lateralmente pasando por el centro de una de las mordazas, el segundo corte fue seleccionado de tal manera que se pueda visualizar el área en la que no existe ninguna mordaza para mostrar el comportamiento de dicha zona, estos cortes pueden ser visualizados en la Fig. 25.

En la Fig. 26 se muestran los resultados obtenidos del análisis realizado a la lente con 12 mordazas sobre los dos cortes seleccionados. La Fig. 26a muestra que se generan tensiones de manera más uniforme, en ambos cortes, debido a que la fuerza se distribuye uniformemente por la lente, generando por consecuencia desplazamientos semejantes en toda la lente, tal y como lo muestra la Fig. 26b.

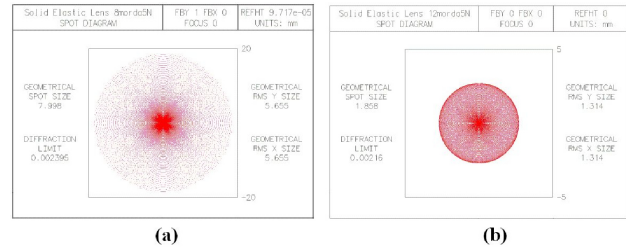


FIGURA 29. Diagramas de manchas producidos por las lentes con: a) 8 mordazas y b) 12 mordazas.

El resultado obtenido en la lente con 8 mordazas, fue que no se estira de manera uniforme en las diferentes zonas en las que se realizaron los cortes, ver Fig. 27a, ya que las fuerzas se vuelven puntuales en donde se encuentra la mordaza y genera un desplazamiento mayor que aquella zona en donde no existe mordaza, generando una mala deformación tal y como se muestra en la Fig. 27b.

Finalmente, en la Fig. 28, se muestran cortes de las lentes de 8 y 12 mordazas respectivamente cuando se aplica una fuerza de tensión de 5 N. A partir de los mapas de desplazamientos, se toman las coordenadas de algunos nodos de la maya que pasan por las superficies de las lentes, y aplicando algoritmos genéticos, se encuentra la forma de las superficies que mejor se ajustan, además de considerar los parámetros geométricos de las lentes. Estos datos son introducidos al programa OSLO, y realizando un trazo de rayos (considerando la fuente al infinito), se encuentran los diagramas de manchas a una misma distancia (96.7276 mm) ver Fig. 29. Como se puede observar en la figura, la mancha producida por la lente que tiene 12 mordazas es más pequeña en un factor de 4 que la mancha que produce la lente con 8 mordazas.

### 5. Conclusiones

A partir de un diseño previo de una lente sólida elástica de apertura máxima efectiva de 30 mm, fabricada para ser usada como prototipo del cristalino del ojo humano, se realizó un rediseño mecánico de ésta que transmite de manera más eficiente las fuerzas radiales aplicadas al material elástico, generando desplazamientos uniformes del cuerpo de la lente cambiando con ello sus parámetros geométricos. El rediseño de la montura mecánica reduce las aberraciones generadas por la propia montura, permitiendo integrarla en cualquier sistema óptico.

Se aplicó una metodología de diseño para la selección y mejora de cada pieza que forma parte de la SEL. Los análisis mecánicos realizados a cada pieza validan su buen funcionamiento y eficiencia de la lente total. Los resultados del análisis de la lente con 12 mordazas fueron comparados con los resultados de la lente del diseño original, comprobándose que el nuevo diseño de la montura deforma de una manera más homogénea a la lente y que se requiere menor fuerza aplicada para producir los desplazamientos, por lo que podemos inferir que las aberraciones que se introducen debido al

mecanismo de la lente disminuyen, solo estando presentes las generadas por la lente misma. La nueva montura brinda confort al usuario de la SEL, ya que la montura es ergonómica, con marcas para facilitar la aplicación y cuantificación de los esfuerzos aplicados. Además se le incorporo un seguro al en-

grane de la montura para que la fuerza aplicada se mantenga constante, permitiendo con ello un mejor funcionamiento. En un trabajo a futuro se presentarán las simulaciones del comportamiento óptico de la lente comparándolos con los obtenidos de manera experimental.

- 
1. N. Sugiura and S. Morita, *Appl. Opt.* **32** (1993) 4181-4186.
  2. B. Berge and J. Peseux, *Eur. Phys. J.* **E3** (2000) 159-163
  3. L. Dong, A. K. Agarwal, D. J. Beebe & H. Jiang, *NATURE* **442** (2006) 551-554.
  4. W. Zhang, K. Aljaseem, H. Zappe, and A. Seifert, *Opt. Express* **19** (2011) 2347-2362.
  5. S. Xu, H. Ren, Y. J. Lin, M. G. J. Moharam, S.-T. Wu, and N. Tabiryan, *Opt. Express* **17** (2009) 17590-17595.
  6. N. Chronis, G. L. Liu, K.-H. Jeong, y L. P. Lee, *Opt. Express* **11** (2003) 2370-2378.
  7. R. Arriaga, "Diseño y construcción de un modelo opto-mecánico del ojo humano utilizando una lente adaptativa" Tesis de Licenciatura, 2008. [http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/10721.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/10721.pdf)
  8. S.-Y. Lee, H.-W. Tung, W.-C. Chen, and W. Fang, *Proc. IEEE* **18** (2006) 2191-2193.
  9. A. Santiago, S. Vázquez, F. Iturbide, R. Arriaga, and J. González, *Proc. SPIE* **7060** (2008) 706017.
  10. A. Santiago, S. Vázquez, F. S. Granados, J. González, E. Rueda, and M. Campos, *Opt. Eng.* **49** (2010) 123401.
  11. P. Liebetraut, S. Petsch, W. Mönch, and H. Zappe, *Appl. Opt.* **50** (2011) 3268-3274.
  12. U. Karl, E. Steven, *Product Design and Development* (Mc Graw-Hill, 2008).
  13. G. Pahl, W. Beitz, *Engineering Design: A systematic approach* (Springer, 1988).
  14. L. D. Miles, *Techniques of Value Analysis and Engineering* 3ed. (Wendt Commons Library, 1989).