



Universidad Autónoma de Zacatecas



“Francisco García Salinas”

Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia

“Metalentes concentradoras y el método de cuerdas”

T E S I S

para obtener el grado de Maestra en Ciencias

PRESENTA:

Thaire Valeria Galván

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Iván Moreno Hernández, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas.

CODIRECTORA DE TESIS:

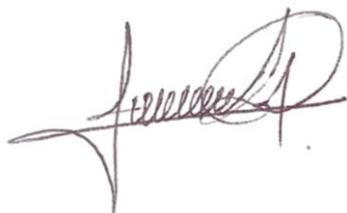
Dra. Perla Viveros Méndez, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas

Zacatecas, Zac., México

Octubre, 2023

Declaración de autenticidad

Manifiesto que el presente trabajo de tesis de Maestría es original y no ha sido presentado total o parcialmente para obtener otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo dentro de la Maestría en Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia y no contiene plagio o copia de ninguna naturaleza, dando el crédito correspondiente a otros documentos de investigación o similares tales como tesis, artículos o publicaciones de otros grupos o personas, reportando de manera puntual y adecuada las respectivas fuentes bibliográficas. Asimismo, declaro que soy plenamente consciente de que el incumplimiento de la presente declaración de autenticidad, dará lugar a sanciones universitarias y legales conforme a la normativa vigente.



Thaire Valeria Galván

Zacatecas Zac., Octubre 2023

Comité de seguimiento y evaluación

SINODALES:

COMITÉ DE SEGUIMIENTO:

Dr. Iván Moreno Hernández, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas.

Dra. Perla Xochil Viveros Méndez, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas.

Dr. Agustín Enciso Muñoz, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas.

Dr. José Samuel Pérez Huerta, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas.

Dedicatoria

Dedicada con todo el amor y esfuerzo a mis padres Hugo Humberto Galván Ortega y Guillermina Lugo Arredondo quienes han estado en cada uno de mis pasos profesionales y me brindan el apoyo para perseguir mis sueños dentro de la investigación y la ciencia, que me han enseñado a ser una mejor persona y una mejor estudiante. Así mismo a mis hermanos Zaira Galván, Marijose Galván y Hugo Galván quienes son mis cómplices de aventuras y experiencias y me impulsan para ser una mejor hermana mayor. En general a toda mi familia incluyendo abuelos, abuelas, tíos, tías, primas y primos que han estado cerca de mí compartiendo mis logros y con orgullo festejándolos como si fueran suyos.

También a todos aquellos compañeros y amigos que han hecho más ameno el paso de cada nivel profesional. Gracias por su colaboración, solidaridad, alegría, confianza y empatía.

Thaire Valeria Galván.

Agradecimientos

Le agradezco profundamente al Dr. Iván Moreno Hernández y a la Dra. Perla Viveros Méndez por haber fungido como directores de tesis, ayudándome en cada paso y compartiendo sus conocimientos y habilidades conmigo, agradezco su paciencia y tolerancia durante el proceso de éste proyecto de investigación. Así mismo mis agradecimientos se extienden a la Universidad Autónoma de Zacatecas y en específico a la Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, por abrirme sus puertas y acogerme como una más de sus estudiantes.

Brindarle un gran agradecimiento a todos mis profesores de la maestría, licenciatura, preparatoria y nivel básico por fomentar en mí el amor a la ciencia y darme las habilidades y conocimientos para continuar mi formación académica.

Me gustaría agradecer al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico que me ayudó a solventar los gastos de este proyecto y continuar con mis estudios de posgrado.

Resumen

Muchos de los dispositivos ópticos actuales tienen un sistema de iluminación, el cual debido a que se compone por diferentes tipos de lentes ordenados, suelen ser voluminosos y pesados. La óptica sin imágenes (NIO) de las siglas en inglés nonimaging optics, es la encargada de estudiar los sistemas de la óptica de concentración de luz e iluminación que estudia los métodos para recolectar, proyectar o dirigir la luz de manera eficiente. Existen varios métodos de análisis y diseño óptico de sistemas NIO, el método de cuerdas es uno de los métodos más básicos y utilizados.

En este proyecto de maestría se estudia cómo implementar el método de cuerdas en sistemas ópticos NIO con metasuperficies y/o metalentes. Es decir, se investiga la fiabilidad de usar el método de cuerdas para analizar y diseñar metalentes que concentren la luz o que iluminen. Así mismo se aplica dicho método al diseño de tres tipos de metalentes concentradoras de luz, la metalente concentradora simple, el metaconcentrador parabólico compuesto y el metaconcentrador Tubular, los cuales son concentradores de luz que utilizan metasuperficies con perfiles de fase especiales.

En esta tesis se deducen las fórmulas matemáticas del perfil de fase requerido para los tres metaconcentradores analizados. Se realiza el análisis del perfil de fase de los dos metaconcentradores propuestos en este trabajo. Además se comprueban esas ecuaciones mediante un análisis de trazos de rayos de luz y mediante un experimento. El experimento se realiza mediante la construcción de tres maquetas con cuerdas o hilos que simulan los rayos de luz en el método de cuerdas.

PALABRAS CLAVES: Óptica, concentradores, metalentes, metaconcentradores, rayos de luz, cuerdas.

Abstract

Many of today's optical devices have an illumination system, which, because it is made up of different types of ordered lenses, tends to be bulky and heavy. Non-imaging optics (NIO), which is responsible for studying light concentration and illumination optics systems that studies methods for collecting, projecting, or directing light efficiently. There are several methods of analysis and optical design of NIO systems, the string method is one of the most basic and used methods.

In this master's project, we study how to implement the string method in NIO optical systems with metasurfaces and/or metalens. That is, the reliability of using the string method to analyze and design light-focusing or illuminating metalens is investigated. Likewise, this method is applied to the design of three types of light concentrating metalens, the simple concentrating metalens, the compound parabolic metaconcentrator and the Tubular metaconcentrator, which are light concentrators that use metasurfaces with special phase profiles.

In this thesis the mathematical formulas of the phase profile required for the three analyzed metaconcentrators are deduced. The analysis of the phase profile of the two metaconcentrators proposed in this work is carried out. In addition, these equations are verified by means of an analysis of traces of light rays and by means of an experiment. The experiment is carried out by building three models with strings or threads that simulate light rays in the string method.

KEY WORDS: Optics, concentrators, metalens, metaconcentrators, light rays, strings.

Índice general

Declaración de autenticidad	II
Comité de seguimiento y evaluación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract	VII
Índice general.....	VIII
Índice de figuras	X
Índice de tablas.....	XV
Introducción.....	1
1.1 Estado del Arte.....	1
1.2 Antecedentes.....	4
1.3 Motivación.....	10
1.4 Hipótesis	11
1.5 Objetivos	12
1.5.1 Objetivo General.....	12
1.5.2 Objetivos Específicos.....	12
Metalentes	13
2.1 Perfil de fase y otras propiedades.....	14
2.2 Aplicaciones.....	17
2.3 Metalentes concentradoras de Luz	20
Óptica sin imágenes	24

3.1 Métodos de análisis y diseño de la NIO.	27
El método de cuerdas	33
4.1 Concentrador parabólico compuesto convencional	36
4.2 Concentrador tubular	40
Metodología	44
5.1 Método de cuerdas para metaconcentradores: cálculo del perfil de fase	45
5.2 Metaconcentrador Compuesto (MC).....	46
5.3 Metaconcentrador tubular (MT).....	50
5.4 Metalente convencional.....	56
Resultados.....	60
6.1 Experimento análogo: modelo tipo maqueta	60
6.1.1 Maqueta análoga al MC.....	61
6.1.2 Maqueta análoga al MT.....	63
6.1.3 Maqueta análoga al metalente simple	65
6.2 Relación modelo teórico y análogo tipo maqueta	66
6.3 Trazo de rayos	69
Conclusiones	75
7.1 Perspectiva o trabajo futuro	76
Bibliografía	77

Índice de figuras

Declaración de autenticidad	II
Comité de seguimiento y evaluación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract	VII
Índice general.....	VIII
Índice de figuras	X
Índice de tablas.....	XV
Introducción.....	1

Figura 1. Ejemplo de una metalente. A) Placa transparente con varias metalentes, fabricadas con un grosor menor a la longitud de onda de la luz por un equipo de investigación de Harvard. B) Metalente que muestra detalles a un nivel microscópico, donde se observan ciertos grumos, los cuales representarían los nanoelementos de la metasuperficie, los cuales pueden obtener diferentes formas de frente de onda transmitido como en el que se presenta en el rayo azul o en el rayo naranja, dependiendo de la posición, tamaño y orientación de los nanoespaciadores [10-11].....2

Figura 2. Principio de funcionamiento de un tipo de metalente de reflexión sintonizable. (a) Ilustración esquemática de una metasuperficie reflectante encapsulada en un polímero flexible. El metaespejo tiene un tamaño lateral de L a lo largo de una dimensión y enfoca la luz incidente hacia atrás a una distancia focal de f desde la superficie. (b) Ilustración de la respuesta del metaespejo después de estirarlo en una proporción de s : la distancia focal del metaespejo bajo estiramiento se alarga a f'6

Figura 3. Concentrador de luz: (a) diagrama esquemático de un concentrador parabólico compuesto (CPC) clásico y (b) diagrama esquemático de un concentrador de metasuperficie compuesto CMC [12].	7
Metales	13
Figura 4. Ejemplo de una metalente fabricada [22].	14
Figura 5. Comparación entre óptica refractiva, óptica difractiva y metasuperficies acromáticas. En los primeros dos casos (A a D), el ángulo de desviación θ y la distancia focal f cambian en función de la longitud de onda. La metasuperficie acromática (E y F) que consta de resonadores separados por sublongitud de onda está diseñada para preservar su operación (mismo θ y f) para múltiples longitudes de onda. Para lograr esto, los cambios de fase $\varphi_{m,i}$ y $\varphi_{m,j}$ impartidos por la metasuperficie en los puntos r_i y r_j de la interfaz está diseñada de modo que los caminos $l_i = l(r_i)$ y $l_j = l(r_j)$ sean ópticamente equivalente a diferentes longitudes de onda. α , ángulo de vértice del prisma; R , radio de curvatura del refractivo lente Λ ; L , período de la rejilla; R_N y N , radio y número de anillos de la lente difractiva, respectivamente. [26].	16
Figura 6. Ejemplo de aplicaciones de metasuperficies en la investigación óptica [17].	18
Figura 7. Ejemplo de aplicaciones novedosas con metalentes. (A) Imágenes formadas por un metalente del gráfico de prueba de resolución de la Fuerza Aérea de E.U.A de 1951 (izquierda) y de un objeto de prueba en forma de H (derecha). (B) (Derecha) Imagen tomada con una metalente doble hecha de postes de silicio, barra de escala 100 mm. (Izquierda) Vistas ampliadas de las imágenes en las regiones indicadas por los rectángulos. (C) Dos imágenes de un escarabajo formadas por una metalente quiral en el mismo campo de visión de una cámara. (D) Diagrama de un holograma de helicidad-multiplexado realizado mediante una metasuperficie reflectante. El recuadro muestra una imagen SEM de parte de la muestra fabricada [2,17].	20
Figura 8. Colimador de luz: (a) diagrama esquemático de una lente TIR clásica y (b) diagrama esquemático de un metalente TIR [12].	22
Óptica sin imágenes	24

Figura 9. NIO y el principio de rayos de borde. Si el rayo r_1 proveniente del borde F de la fuente se desvía hacia el punto del borde A en el receptor y el rayo r_5 proveniente del borde E de la fuente se desvía hacia el borde B del receptor, todos los demás rayos: r_2, r_3, r_4 viniendo de puntos intermedios en la fuente EF terminará entre los puntos A y B en el receptor [36]. 25

Figura 10. La radiación que llega al sistema óptico CD tiene una apertura angular ϑ para cada lado. Los rayos de borde d_1 se concentran en el punto A y los rayos de borde d_2 se concentran en el punto B [36]. 26

Figura 11. Rayos y (en línea discontinua) frentes de onda geométricos [39]. .. 28

Figura 12. Ejemplo del principio de rayos de borde. Una lente recoge la luz de una fuente $S_1 S_2$ y la redirige hacia un receptor $R_1 R_2$. Los rayos de luz provenientes del borde S_1 de la fuente sean redirigidos hacia el borde R_1 del receptor, como lo indica los rayos azules. Por simetría, los rayos que provienen del borde S_2 de la fuente se redirigen hacia el borde R_2 del receptor, como lo indican los rayos rojos. Los rayos provenientes de un punto interno S en la fuente se redirigen hacia el objetivo, pero no se concentran en un punto y, por lo tanto, no se forma ninguna imagen. 30

Figura 13. Ejemplo del método SMS para una lente de un índice de refracción n dado diseñada para una fuente $S_1 S_2$ y un receptor $R_1 R_2$. Donde T_0 es el punto inicial del análisis, r_1 es el rayo procedente de S_2 y refractarlo en T_0 . Al elegir ahora la longitud de la trayectoria óptica entre S_2 y R_2 , tenemos una condición que nos permite calcular el punto B_1 en la superficie inferior de la lente, y así sucesivamente con los otros rayos..... 31

El método de cuerdas 33

Figura 14. Principio de Fermat en el método de cuerdas, a) Óptica formadora de imágenes, b) Óptica de iluminación o concentración de luz (NIO)..... 34

Figura 15. Diseño y análisis de concentradores convencionales usando el método de cuerdas. (A) y (B) Concentradores básicos y (C) y (D) Concentradores más avanzados..... 36

Figura 16. Un diagrama del CPC para su análisis [53]. 38

Figura 17. Diagrama para diferentes ángulos de incidencia en el diseño y análisis del CPC [37].	39
Figura 18. Diferentes formas de receptor en el CPC. (a) Básico (plano), (b) delgado, (c) bifurcado, (d) tubular [55].	41
Figura 19. Concentrador Tubular diseñado utilizando el método de cuerdas.	42
Figura 20. Diseño de la envolvente en el Concentrador Tubular. (a) Utilizando el método de cuerdas, (b) descripción con rayos de borde.	43
Metodología	44
Figura 21. Propuesta de diseño del Metaconcentrador Compuesto.	46
Figura 22. Elección de las dos cuerdas (paso 2 de la sección 6.1) para comenzar el análisis del MCP.	48
Figura 23. A) Triangulo usado para calcular AO. B) Triangulo para calcular AA' y CB.	49
Figura 24. Propuesta de diseño del Metaconcentrador tubular.	51
Figura 25. Elección de las dos cuerdas (paso 2 de la sección 5.1) para comenzar el análisis del MT.	52
Figura 26. Ampliación de la figura 25 para la descripción geométrica de LCO. A) Triangulo para Calcular ts. B) Dibujo para calcular us. C) Dibujo para calcular el arco um. D) Triangulo para calcular AB. E) Dibujo para calcular cm.	54
Figura 27. Representación de una metalente simple enfocando un haz de rayos de luz.	56
Figura 28. Elección de las dos curdas en la metalente para el análisis a partir del método de cuerdas.	57
Figura 29. Triangulo usado para el análisis geométrico del LCO.	58
Resultados	60
Figura 30. Experimento análogo al MC A) Modelo tipo maqueta. B) Comportamiento de la cuerda en el modelo tipo maqueta. Una orilla de las	

cuerdas (color rojo) está sujeto al punto de enfoque. La otra orilla de las cuerdas está sobre la línea punteada, ya que las cuerdas tienen igual longitud.....	62
Figura 31. Experimento análogo al MT A) Modelo tipo maqueta. B) Comportamiento de la cuerda en el modelo tipo maqueta que muestra una orilla de las cuerdas (color rojo) sujeta al punto guía. La otra orilla de las cuerdas está sobre la línea punteada, ya que las cuerdas tienen igual longitud.....	64
Figura 32. Experimento análogo al metalente simple A) Modelo tipo maqueta. B) Comportamiento de la cuerda en el modelo tipo maqueta, que muestra una orilla de las cuerdas (color rojo) sujeta al punto focal. La otra orilla de las cuerdas esta sobre la línea punteada, ya que las cuerdas tienen igual longitud.	66
Figura 33. Metaconcentrador MC. Gráfica comparativa entre el modelo tipo teórico (línea roja) y modelo análogo tipo maqueta (línea negra). El análisis arrojó un error de ± 0.41 cm.	67
Figura 34. Metaconcentrador MT. Gráfica comparativa entre el modelo tipo teórico (línea roja) y modelo análogo tipo maqueta (línea negra). El análisis arrojó un error de ± 0.74 cm.	68
Figura 35. Metalente simple. Gráfica comparativa entre el modelo tipo teórico (línea roja) y modelo análogo tipo maqueta (línea negra). El análisis arrojó un error de ± 0.16 cm.....	68
Figura 36. Diagrama de trazo de rayos en el MC.	71
Figura 37. Diagrama de trazo de rayos en el MT.	72
Figura 38. Diagrama de trazo de rayos en una metalente simple.....	73
Conclusiones	75
Bibliografía	77

Índice de tablas

Declaración de autenticidad	II
Comité de seguimiento y evaluación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract	VII
Índice general.....	VIII
Índice de figuras	X
Índice de tablas.....	XV
Introducción.....	1
Metacentes	13
Óptica sin imágenes	24
El método de cuerdas	33
Metodología	44
Resultados.....	60
Tabla 1. Valores usados para la fabricación del modelo tipo maqueta, análogo al MC de la Figura 22.	62
Tabla 2. Valores usados para la fabricación del modelo tipo maqueta, análogo al MT de la Figura 24.	64
Tabla 3. Valores usados para la fabricación del modelo tipo maqueta, análogo a la metacente simple.....	65
Conclusiones	75

Bibliografía 77

Capítulo 1

Introducción

1.1 Estado del Arte

Los elementos ópticos juegan un papel crucial en muchos sistemas modernos, desde teléfonos móviles hasta misiles. La tendencia a la miniaturización plantea un desafío a la óptica, ya que las lentes y los espejos clásicos tienden a ser voluminosos. Una forma de enfrentar este desafío es usar la óptica plana [1].

Por otro lado, la óptica de iluminación y concentración ha ido evolucionando a medida que la tecnología se desarrolla cada vez más, esto debido a que son un elemento importante en aparatos modernos que recolectan o emiten luz como por ejemplo láseres, dispositivos de fibra óptica, LEDs, automóviles, computadoras, celulares, aparatos médicos, entre otros. Los concentradores de luz ordinarios constan de un sistema macroscópico (es decir, de un tamaño lo suficientemente grande como para ser observado por el ojo humano) de arreglos de espejos, el cual provoca un aumento de tamaño de los aparatos antes mencionados. La óptica sin imágenes (NIO) de las siglas en inglés nonimaging optics, es la encargada de estudiar los sistemas ópticos de concentración de luz e iluminación. La NIO estudia los métodos para recolectar, proyectar o dirigir la luz de manera eficiente.

Los nuevos avances tecnológicos en lentes formadoras de imágenes utilizando la óptica plana (metalentes), han conseguido una disminución de tamaño en aparatos como celulares, computadoras, microscopios, endoscopios, entre otros. Estos sistemas ópticos muchas veces constan de un sistema de iluminación, por lo que es necesario adaptar estos metalentes como concentradores de luz.

Una metalente es una lente súper plana o súper delgada de un grosor menor a la longitud de onda de la luz, es decir de 400 a 700 nm (Figura A), una metalente

se forma con una metasuperficie con un perfil de fase especial. Las metasuperficies constan de grupos de nanoesparcidores ópticos (metálicos o dieléctricos) de tamaño menor que la longitud de onda de la luz, estos nanoesparcidores en la metasuperficie redirigen localmente la luz incidente para darle forma al frente de onda en función de su distribución espacial. Al ajustar espacialmente los parámetros geométricos de los nanoesparcidores (como tamaño, forma, orientación y posición en la metasuperficie), es posible controlar la forma del frente de onda de la luz reflejada o transmitida con alta resolución espacial, como se muestra en la Figura 1 B [2-4]. En recientes avances se han construido metalentes con alta eficiencia óptica, lo cual es fundamental para la posible aplicación de iluminación y concentración de la luz [5- 9].

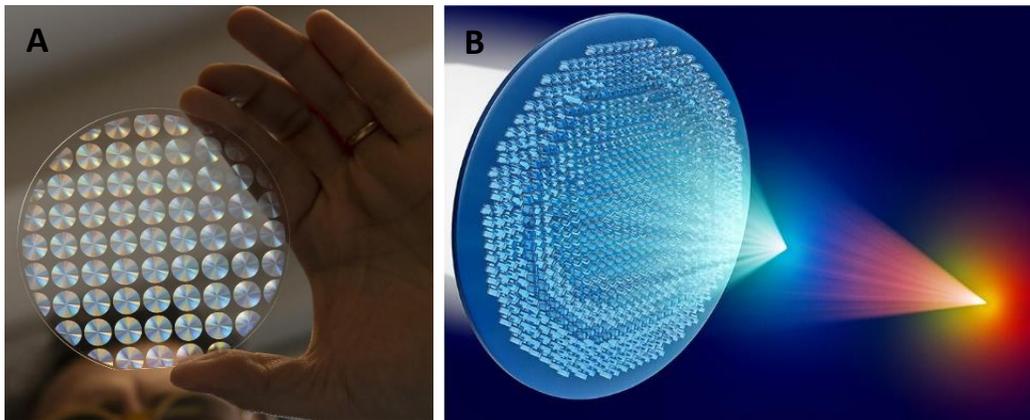


Figura 1. Ejemplo de una metalente. A) Placa transparente con varias metalentes, fabricadas con un grosor menor a la longitud de onda de la luz por un equipo de investigación de Harvard. B) Metalente que muestra detalles a un nivel microscópico, donde se observan ciertos grupos, los cuales representarían los nanoelementos de la metasuperficie, los cuales pueden obtener diferentes formas de frente de onda transmitido como en el que se presenta en el rayo azul o en el rayo naranja, dependiendo de la posición, tamaño y orientación de los nanoesparcidores [10-11].

La NIO es la encargada de estudiar la óptica de concentración e iluminación de la luz en sistemas ópticos y se basa en la manipulación y control de la luz sin

importar la formación de imágenes nítidas. Los tres métodos de diseño y análisis principales para recolectar, proyectar o dirigir la luz de manera eficiente son el de Superficie Múltiple Simultánea (SMS), Involutas de Rayos de Borde (edge ray involutes) y el Método de Cuerdas, de los cuales se dará una breve descripción en el capítulo 4.

El método más básico y simple de la NIO es el método de cuerdas, que permite diseñar sistemas ópticos para enfocar o distribuir la luz de manera controlada. En esta investigación se analizan metasuperficies mediante el método de cuerdas el cual, utiliza cuerdas o líneas ideales que representan los rayos de luz en un sistema óptico. Estas cuerdas se mueven a través del sistema óptico y su posición define la dirección y comportamiento de los rayos de luz.

El objetivo del método de cuerdas es diseñar sistemas ópticos que cumplan ciertos criterios, como concentrar la luz en un punto en específico o distribuir la luz de manera uniforme en un área determinada. Este método se basa en el principio étendue, que establece que la cantidad de luz que atraviesa un sistema óptico permanece constante, además de utilizar la geometría como instrumento principal para su desarrollo matemático, este método se considera como una fusión entre el principio de Fermat y el principio de rayos de borde, lo que lo hace uno de los más importantes para la óptica de concentración e iluminación de la luz. El método de cuerdas se aplica en este trabajo al diseño y análisis de metaconcentradores de iluminación (Metaconcentrador Compuesto y Metaconcentrador Tubular) además para comprobar el comportamiento y diseño de una Metalente plana normal.

1.2 Antecedentes

Para la elaboración de este trabajo se tiene como antecedentes diferentes artículos referentes a metalentes, las cuales son utilizadas como formadoras de imágenes. Pero sin duda alguna, es importante mencionar como principal antecedente el propuesto por Moreno et. al [12], debido a que en su artículo se menciona por primera vez el desarrollo de las metalentes en la óptica para iluminación y concentración de luz. Propusieron por primera vez un metaconcentrador equivalente al concentrador parabólico compuesto, donde a partir de la Ley de Snell dedujeron su perfil de fase, esto se menciona con mayor detalle al final del capítulo.

El estudio de las metalentes es de gran importancia para el desarrollo tecnológico de sistemas ópticos miniaturizados, como se ha demostrado en diversas investigaciones referentes a la óptica formadora de imágenes [13].

En 2017 se dio una estimación de las escalas de longitud que pueden alcanzar los diseños ópticos de las metasuperficies de los metalentes utilizando los llamados bloques de construcción (BB's) del inglés building blocks, los cuales están espaciados en sublongitudes de onda y que ajustando adecuadamente su forma, tamaño, posición y orientación con alta resolución espacial se pueden controlar las propiedades básicas de luz (fase, amplitud, polarización) y así diseñar su frente de onda a voluntad. La distribución espacial de los BB's sobre la superficie que conforma la metalente produce una distribución espacial de fase o perfil de fase. El perfil de fase $\varphi(r)$ de una lente plana, para luz a incidencia normal de longitud de onda λ es hiperbólico, lo que asegura el enfoque de luz en el punto focal [2]. El cual está dado por la ecuación:

$$\varphi(r) = -\frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{r^2 + f^2} - f), \quad (1.1)$$

en donde f es la distancia focal, r es la posición radial (en la metalente) y λ se define como la longitud de onda de la luz. La ecuación 1.1 implica que todos los rayos deben llegar en fase al foco.

Para implementar metalentes para concentración de luz se requieren metalentes y metasuperficies que enfoquen la luz reflejada. Se han reportado varios tipos de metalentes reflectoras, entre las que destacan las de Cheng et. al [14]. Ellos diseñaron y probaron el primer tipo de metalente en reflexión (metaespejo) sintonizable operando en el régimen visible (670 nm). Su diseño se basa en una metasuperficie degradada en un plano de tierra metálico continuo, con un sustrato estirable [14]. La Figura 2 muestra el control de la distancia focal del metaespejo mediante la integración de un sustrato flexible que se puede estirar una distancia s .

Para realizar un metaespejo plano que enfoca una onda plana normalmente incidente a una distancia focal f desde el plano de la lente, se debe impartir la fase hiperboloide dada por la ecuación 1.1.

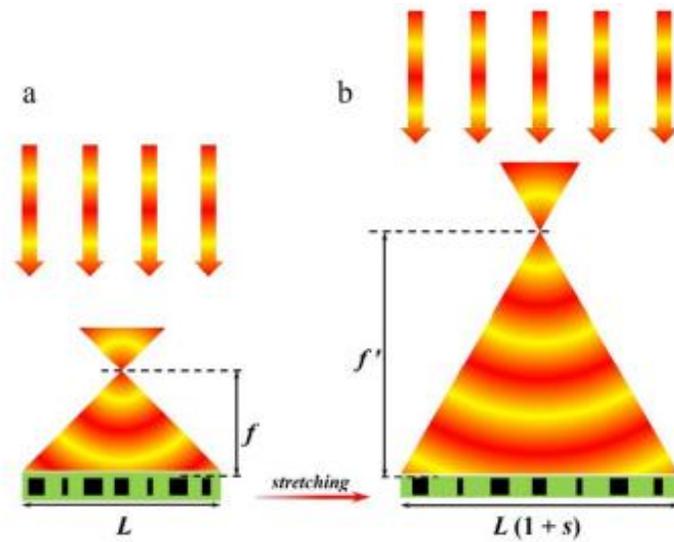


Figura 2. Principio de funcionamiento de un tipo de metalente de reflexión sintonizable. (a) Ilustración esquemática de una metasuperficie reflectante encapsulada en un polímero flexible. El metaespejo tiene un tamaño lateral de L a lo largo de una dimensión y enfoca la luz incidente hacia atrás a una distancia focal de f desde la superficie. (b) Ilustración de la respuesta del metaespejo después de estirarlo en una proporción de s : la distancia focal del metaespejo bajo estiramiento se alarga a f' .

Moreno et. al propusieron por primera vez el perfil de fase para un concentrador de metasuperficie compuesto (CMC) [12], análogo al concentrador parabólico compuesto (CPC) de la óptica clásica (Fig. 3a), el CMC consta de dos metaespejos planos, A y B, cuyos perfiles de fase $\varphi(l)$ podrían diseñarse para enfocar el haz a un ángulo ϑ_c en el borde del receptor, como se muestra en la Figura 3b.

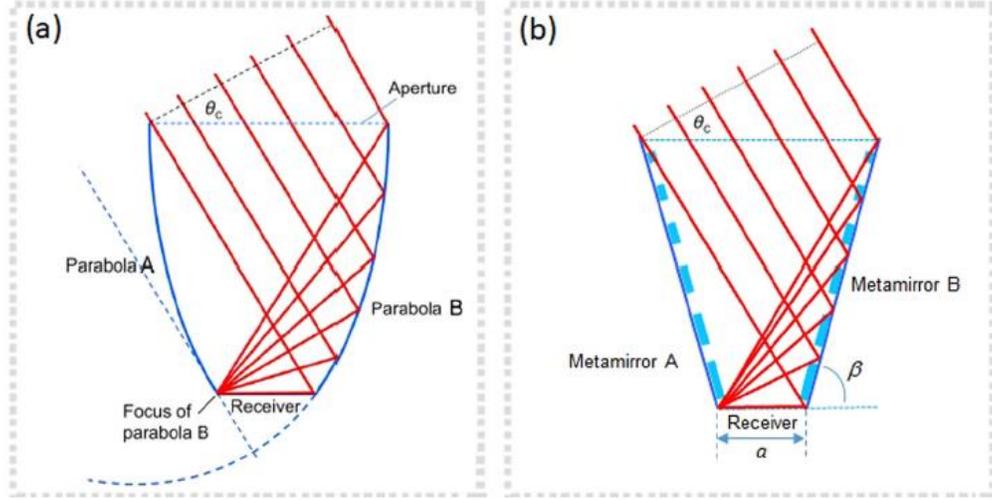


Figura 3. Concentrador de luz: (a) diagrama esquemático de un concentrador parabólico compuesto (CPC) clásico y (b) diagrama esquemático de un concentrador de metasuperficie compuesto CMC [12].

En la metaóptica, el uso de BB's en diferentes posiciones de una superficie plana para imponer un perfil de fase $\Phi(x, y)$ que cambie la forma de un frente de onda incidente, tiene el efecto equivalente al de la forma de la superficie en óptica refractiva o reflectante sin imágenes. Esto ofrece una plataforma rica y prometedora para la óptica sin imágenes, que se caracteriza por el uso de formas de superficie 3D con formas complejas. En general, el perfil de fase requerido se deduce de las leyes generalizadas de reflexión y refracción. Si la metasuperficie solo tiene variación de fase radial, es [12]:

$$\frac{1}{k_0} \frac{d\Phi}{dr} = n_2 \text{sen}\theta_2 - n_1 \text{sen}\theta_1, \quad (1.2)$$

en donde n_1 , n_2 son los índices de refracción del medio donde la luz es incidente y transmitida (o reflejada), respectivamente. Además, ϑ_1 , ϑ_2 son los ángulos de incidencia y refracción (o reflexión), respectivamente; y k_0 es el número de onda en el vacío.

De la Ec. (1.2), se puede deducir el perfil de fase requerido de un metalente. Por ejemplo, la ecuación (1.1) se puede derivar resolviendo la ecuación (1.2) con $\text{sen}\theta_1 = 0$ y $\text{sen}\theta_2 = r(r^2 + f^2)^{-1/2}$, que es la condición geométrica para enfocar un haz de luz. Sin embargo, en general, la metasuperficie puede tener una variación de fase arbitraria $\Phi(x, y)$ y las leyes generalizadas de reflexión y refracción en una interfaz con gradiente de fase 2D están dadas por dos ecuaciones acopladas [12,15]:

$$\frac{1}{k_0} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = n_2 \cos\theta_2 \text{sen}\varphi_2, \quad (1.3)$$

$$\frac{1}{k_0} \frac{\partial \Phi}{\partial y} = n_2 \text{sen}\theta_2 - n_1 \text{sen}\theta_1, \quad (1.4)$$

en donde φ_2 es el ángulo azimutal de refracción (o reflexión) en el plano xz , ϑ_1 es el ángulo de incidencia en el plano yz (si $\varphi_1=0$), y ϑ_2 es el ángulo entre la luz refractada (o reflejada) y su proyección en el plano xz . Las ecuaciones (1.3) y (1.4) son válidas para la luz incidente que se encuentra en el plano yz , es decir, $\varphi_1=0$. Castañeda-Almanza et. al [16] reportaron las ecuaciones vectoriales que consideran la dirección de incidencia arbitraria, es decir, $\varphi_1 \neq 0$. Después algunos tratamientos matemáticos, se puede demostrar que la expresión de la Ec. (1.3) cambia para el caso general, dando [12]:

$$\frac{1}{k_0} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = n_2 \cos\theta_2 \text{sen}\varphi_2 - n_1 \cos\theta_1 \text{sen}\varphi_1. \quad (1.5)$$

En el caso de metaóptica de concentradores de luz se puede aplicar la Ec. (1.2) para deducir el perfil de fase requerido de un metaconcentrador CMC como el de la Fig 3. Considerando que los rayos de borde reflejados del CMC se enfocan en el punto deseado, se obtiene el perfil de fase requerido [12]:

$$\Phi(l) = -k \left(\sqrt{l^2 + a^2 + 2al\cos\beta} - a - l\sin(\beta - \theta_c) \right), \quad (1.6)$$

en donde l es la posición a lo largo del metaespejo, con $l=0$ en la esquina del receptor. El parámetro a es el tamaño del receptor y β es el ángulo del metaespejo (Fig. 3(b)). El perfil de fase es una función del ángulo de aceptación media CMC ϑ_c .

Las ecuaciones (1.2) – (1.6) representan una base para el análisis y diseño de la metaóptica sin imágenes, que se pueden aplicar para explorar este nuevo campo [12].

A partir de nuestro antecedente principal es que surge la idea de realizar el análisis de metaconcentradores utilizando el método de cuerdas, este método proporcionará una mayor facilidad de análisis y diseño, sobre todo en el cálculo del perfil de fase de metalentes concentradoras avanzadas.

1.3 Motivación

Los concentradores de luz han ido evolucionando a medida que la tecnología se desarrolla cada vez más, esto debido a que son un elemento importante en aparatos modernos que tengan algún sistema de recolección o detección de luz o radiación electromagnética. Los nuevos avances tecnológicos en la creación de imágenes con metalentes prometen conseguir, una disminución de tamaño en aparatos como celulares, computadoras, microscopios, endoscopios, entre otros, sin embargo, en algunos casos estos aparatos constan de un sistema de detección de luz, por lo que es necesario desarrollar metalentes como concentradores de luz.

El método de cuerdas es un método básico utilizado para el análisis y diseño de concentradores de luz ordinarios. Debido a que es un método muy básico es importante adaptarlo a los nuevos diseños tecnológicos para sentar las bases de la óptica sin imágenes utilizando metalentes.

1.4 Hipótesis

La hipótesis central de esta tesis es probar si el método de cuerdas se puede usar con metalentes (o metasuperficies) y establecer las bases para implementación en el estudio y diseño de metaconcentradores de luz. Una hipótesis secundaria es que el perfil de forma de un espejo tradicional (elíptico, parabólico, etc.) está asociado al perfil de fase de un metaespejo equivalente para que tenga igual desempeño óptico.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Estudiar el método de cuerdas clásico de NIO, e implementar el método de cuerdas con metalentes o metasuperficies para desarrollar el área de estudio de metaóptica de iluminación y concentración de luz. Además diseñar algunos ejemplos simples de metaconcentradores de luz usando el método de cuerdas.

1.5.2 Objetivos Específicos

1. Combinar los fundamentos del método de cuerdas de la NIO con los principios ópticos de las metalentes.
2. Implementar el método de cuerdas a metalentes y sentar las bases para su uso.
3. Diseñar tres tipos diferentes de metaconcentradores usando el método de cuerdas para metaóptica.
4. Probar los diseños mediante la construcción de maquetas análogas con cuerdas (hilos) que sean equivalentes a los metaconcentradores diseñados.
5. Probar los diseños mediante diagramas de trazo de rayos usando el perfil de fase obtenido mediante el método de cuerdas.

Capítulo 2

Metalentes

Durante muchos años, la óptica plana se ha implementado utilizando tecnología de óptica difractiva, pero en las últimas dos décadas ha surgido una nueva tecnología óptica basada en metasuperficies o metalentes [1].

La metalente es una evolución de la gruesa lente tradicional a una placa ultra delgada [2]. Éstas se han convertido en un campo de investigación de rápido crecimiento en los últimos años debido a sus habilidades excepcionales en la manipulación de la luz y la versatilidad en aplicaciones ópticas [17].

Las metalentes se forman por metasuperficies las cuales, por lo general, consisten en conjuntos de resonadores ópticos con variación en sus parámetros geométricos y separación de una fracción de la longitud de onda. Tras la interacción con la luz, la respuesta óptica permite moldear los frentes de onda ópticos a voluntad. A diferencia de los componentes ópticos convencionales que se basan en cambios de fase graduales acumulados durante la propagación de la luz para dar forma a los haces de luz, las metasuperficies nos brindan nuevos grados de libertad para controlar la respuesta de fase, amplitud y polarización con resolución de sublongitud de onda, así como para lograr la formación de frente de onda dentro de una distancia mucho menor que la longitud de onda [17]. Originalmente, las metasuperficies empleaban resonadores de sublongitud de onda para controlar el perfil de fase de la luz. Posteriormente, su diseño se amplió al principio de fase geométrica no resonantes (Pancharatnam-Berry) y finalmente al principio de fase de propagación dinámica. Los materiales constituyentes de las metasuperficies se han extendido desde los metales hasta los totalmente dieléctricos para reducir las pérdidas [18].

También la tecnología de las metalentes desafía a la óptica difractiva aprovechando la nueva capacidad para fabricar características de sublongitud de onda, por ello, muchos investigadores concuerdan en que las metalentes ya han

superado a la CDL (Lente difractiva convencional) en algunos aspectos (por ejemplo, aplicaciones de alta apertura numérica o de alta eficiencia). Los metalentes tienen más grados de libertad que los CDL, ya que sus nanoestructuras vienen en formas ilimitadas. Por lo que parece inevitable que el campo más maduro de la óptica difractiva, que ya se ha transferido con éxito a la industria, pase a un segundo plano en la investigación académica con respecto al reciente campo de estudio de las metasuperficies y las metalentes [1].

El proceso de fabricación de las metalentes a partir de diferentes tipos de litografía también resulta ser más sencilla y rápida que para las lentes tradicionales [19, 20, 21], además sus excelentes propiedades ópticas, las han llevado al desarrollo de dispositivos ópticos ultra finos versátiles, ya sea que muestren fenómenos ópticos novedosos o nuevas funcionalidades que superen a sus contrapartes tradicionales (Figura 4) [17].

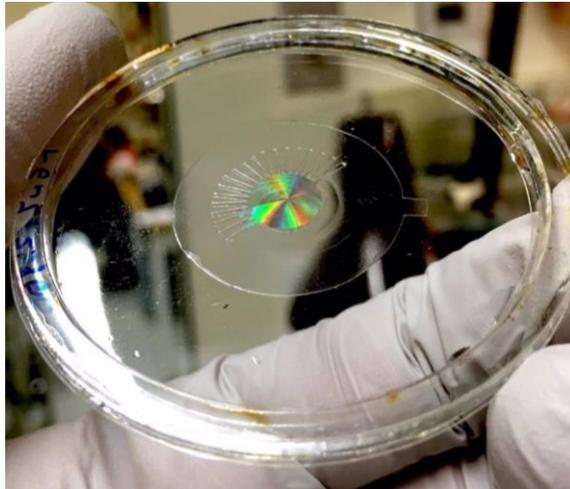


Figura 4. Ejemplo de una metalente fabricada [22].

2.1 Perfil de fase y otras propiedades

Las lentes refractivas convencionales se basan en la acumulación de fase gradual a lo largo del camino óptico recorrido por un haz de luz. Esto se logra controlando la topografía de la superficie o variando el perfil espacial del índice de

refracción. La aberración cromática en los componentes ópticos refractivos surge de las propiedades de dispersión del material. En un material con dispersión normal, el índice de refracción disminuye al aumentar la longitud de onda.

Los dispositivos ópticos difractivos, por otro lado, funcionan como la interferencia de la luz a través de una máscara de amplitud o fase. El ángulo de deflexión de una red de difracción varía con la longitud de onda, donde la tasa de cambio depende del paso de la red. Tal dispersión es opuesta a los elementos ópticos refractivos estándar (conocidos como “dispersión negativa”), donde una distancia focal más larga corresponde a una longitud de onda más corta [23]. Con el fin de eliminar la aberración cromática, los primeros esfuerzos se han basado en lograr lentes acromáticas refractivas o difractivas integrándolas o colocándolas en cascada en forma de dobletes y tripletes para obtener la misma distancia focal para múltiples longitudes de onda de interés. Sin embargo, la configuración compuesta hace que el sistema óptico sea voluminoso, complicado y costoso (Figura 5) [24, 25].

Para convertir el frente de onda plano incidente en uno esférico utilizando una metalente, se debe usar una metasuperficie que introduzca un perfil de fase dado por la Ec. (1.1), la cual se puede poner en coordenadas cartesianas como [26]:

$$\phi(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f \right), \quad (2.1)$$

en donde x e y son las coordenadas espaciales con respecto al centro de la lente ($x = y = 0$), y f es la distancia focal de la lente diseñada. Dado que el perfil de fase requerido depende de la longitud de onda, una metalente debe exhibir un control de fase independiente en cada longitud de onda deseada para lograr un enfoque acromático. Sin embargo, si la cobertura de fase deseada de $0-2\pi$ para dispositivos basados en metasuperficies solo se puede obtener variando las dimensiones geométricas de un conjunto de metaátomos o rotando sus orientaciones, el resultado es que este conjunto de metaátomos solo puede satisfacer la fase

requerida para una longitud de onda dada, pero no en otras longitudes de onda, lo que conduce a la aberración cromática. Esto hizo que los primeros dispositivos reportados en la literatura presentaran una fuerte aberración cromática a pesar de que los elementos ópticos basados en metasuperficies pueden diseñarse (en posteriores investigaciones) para operar en un rango de longitud de onda de banda ancha. La dependencia de la longitud focal con la longitud de onda es un desafío para aplicaciones ópticas a todo color, como imágenes y visualización.

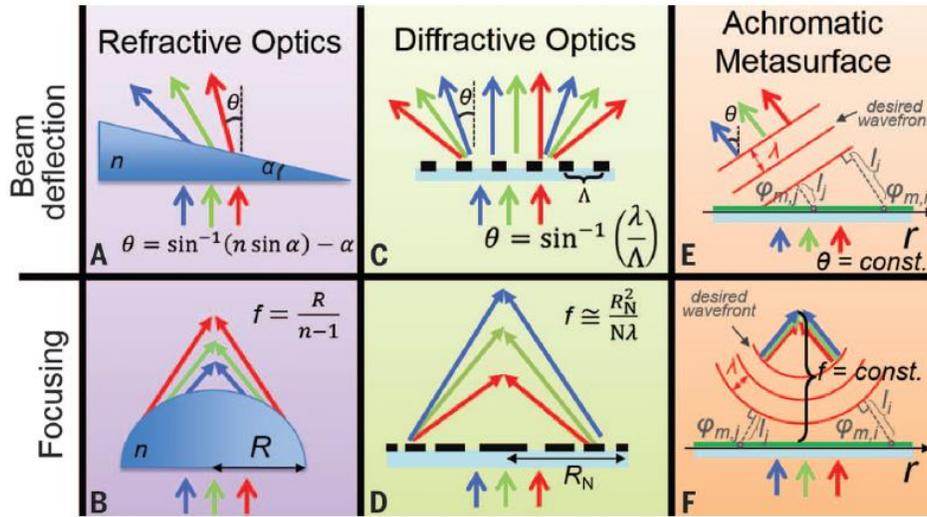


Figura 5. Comparación entre óptica refractiva, óptica difractiva y metasuperficies acromáticas. En los primeros dos casos (A a D), el ángulo de desviación ϑ y la distancia focal f cambian en función de la longitud de onda. La metasuperficie acromática (E y F) que consta de resonadores separados por sublongitud de onda está diseñada para preservar su operación (mismo ϑ y f) para múltiples longitudes de onda. Para lograr esto, los cambios de fase $\phi_{m,i}$ y $\phi_{m,j}$ impartidos por la metasuperficie en los puntos r_i y r_j de la interfaz está diseñada de modo que los caminos $l_i = l(r_i)$ y $l_j = l(r_j)$ sean ópticamente equivalente a diferentes longitudes de onda. α , ángulo de vértice del prisma; R , radio de curvatura del refractivo lente Λ ; L , período de la rejilla; R_N y N , radio y número de anillos de la lente difractiva, respectivamente. [26].

Hasta ahora, muchos esfuerzos se han centrado en metadispositivos de longitud de onda múltiple destinados a mejorar el comportamiento de la metalente. Por

ejemplo, se ha trabajado con diferentes conjuntos de resonadores dieléctricos los cuales proporcionen una cobertura de fase en diferentes longitudes de onda; también se han demostrado metalentes con un perfil de fase requerido en una longitud de onda de trabajo específica; se ha logrado un enfoque de la luz en longitudes de onda de 915 y 1550 nm en el mismo plano focal; se han usado metasuperficies para eliminar la aberración cromática en tres colores primarios: longitudes de onda rojas, verdes y azules (480, 550 y 620 nm); ha sido posible controlar de forma independiente las fases de dos polarizaciones ortogonales en dos longitudes de onda diferentes; entre muchas cosas más [17].

2.2 Aplicaciones

Se han sugerido muchas aplicaciones para metalentes, en los campos de imágenes, espectroscopia, enrutamiento de color/polarización, enfoque sintonizable y realidad aumentada. Puede haber todavía ventajas inexploradas en términos de aplicaciones para metalentes. Se cree que eventualmente los metalentes llegarán a la industria, cuando la aplicación apropiada cumpla con las capacidades de fabricación a escala comercial [1].

Las diferentes aplicaciones que tienen las metalentes dentro de la investigación se pueden observar en la Figura 6.

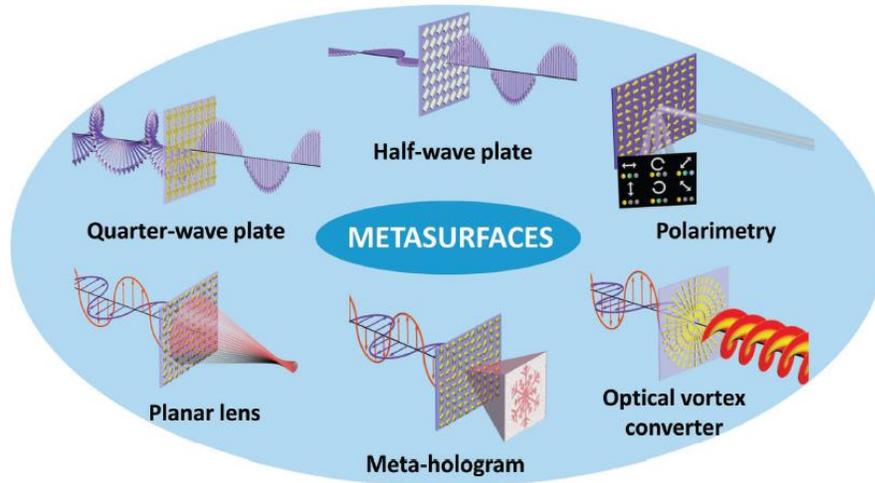


Figura 6. Ejemplo de aplicaciones de metasuperficies en la investigación óptica [17].

Una de las principales aplicaciones de metasuperficies es como elementos polarizadores de luz. Convencionalmente, el estado de polarización de la luz se puede modular, donde el requerido retardo de fase entre dos ondas polarizadas ortogonalmente se acumula a través de la propagación de la luz. Como resultado, las configuraciones de control de polarización suelen ser voluminosas y sufren de varias limitaciones tales como una operación en un estrecho ancho de banda y una limitada disposición de materiales. Debido a estas limitaciones el desarrollo de placas basadas en metasuperficies que operan en diferentes regímenes de frecuencia ha aumentado considerablemente. Otra categoría de metasuperficies de conversión de polarización funciona como placas de media onda (HWP), girando la dirección lineal de la polarización. Los HWP basados en metasuperficies también se pueden operar en transmisión [17].

El control de las metasuperficies sobre la polarización también ha motivado la implementación de dispositivos de polarimetría para detectar el estado de polarización o determinación de los parámetros de Stokes de una fuente de luz arbitraria [17].

Una aplicación más de las metasuperficies sería la realización de hologramas generados por ordenador (CGH), que requiere una cuidadosa ingeniería de fase

local, amplitud y respuesta de polarización para obtener imágenes de alta calidad [24].

También los dispositivos basados en metasuperficies aplicados a la generación de haces de vórtice han ganado recientemente un enorme interés debido a sus diversas aplicaciones prometedoras en microscopía de alta resolución, pinzas ópticas y tecnología de comunicación clásica y cuántica [27].

Las futuras aplicaciones en dispositivos electrónicos incluyen teléfonos celulares, cámaras fotográficas, pantallas portátiles, realidad virtual, cámaras de seguridad entre otras. Además, las metalentes se pueden fabricar con un material flexible y así se podrían hacer lentes de contacto ultra-planas, de tal manera que el ojo fuera casi insensible a ellas [28].

Algunas otras aplicaciones actuales y relevantes de las metalentes se encuentran en el control de fase angular, metalentes nanofotónicos que enfocan la luz en un mismo punto focal independientemente del ángulo de incidencia, metalentes con distancia focal controlada por voltaje, magnificación y aberraciones. Debido a su pequeña huella y geometría plana, los metalentes se pueden montar en la punta de una fibra óptica, abriendo numerosas aplicaciones como la bioimagen y la endoscopia. Varias metasuperficies también puede ser integradas para construir un sistema complejo compuesto de varios componentes planos (por ejemplo, lentes, rejillas, polarizadores y filtros) para realizar tareas más sofisticadas. Esta capacidad puede impulsar el progreso en la óptica en la que sistemas miniaturizados de bajo costo y alto rendimiento están en alta demanda (Figura 7) [2, 29,30].

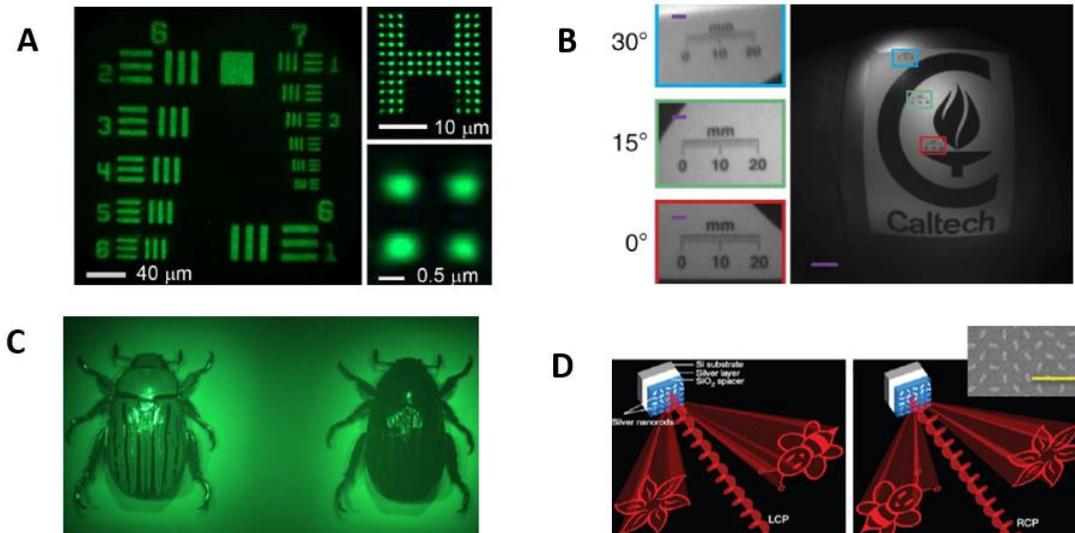


Figura 7. Ejemplo de aplicaciones novedosas con metalentes. (A) Imágenes formadas por un metalente del gráfico de prueba de resolución de la Fuerza Aérea de E.U.A de 1951 (izquierda) y de un objeto de prueba en forma de H (derecha). (B) (Derecha) Imagen tomada con una metalente doble hecha de postes de silicio, barra de escala 100 mm. (Izquierda) Vistas ampliadas de las imágenes en las regiones indicadas por los rectángulos. (C) Dos imágenes de un escarabajo formadas por una metalente quiral en el mismo campo de visión de una cámara. (D) Diagrama de un holograma de helicidad-multiplexado realizado mediante una metasuperficie reflectante. El recuadro muestra una imagen SEM de parte de la muestra fabricada [2,17].

2.3 Metalentes concentradoras de Luz

Hasta ahora las investigaciones referentes a metalentes se han concentrado en la óptica formadora de imágenes. La óptica de concentradores de luz forma una parte importante en diversos sistemas ópticos, sin embargo el campo de investigación utilizando metalentes en esta rama de la óptica apenas se empieza a investigar.

En la metaóptica sin imágenes, el uso de BB's para imponer un cambio de fase $\Phi(x, y)$ a un conjunto entrante de frentes de onda en diferentes posiciones de una superficie plana, tiene el efecto equivalente de la forma de la superficie en óptica refractiva o reflectante sin imágenes. Esto ofrece una plataforma rica y prometedora para la óptica sin imágenes, que se caracteriza por el uso de formas

de superficie 3D complejas. En general, el perfil de fase requerido se deduce de las leyes generalizadas de reflexión y refracción. Por ejemplo la ecuación 1.6, representa el perfil de fase de un metaconcentrador compuesto (CMC), mostrado en la Fig. 3b.

En esta ecuación el perfil de fase es una función de varios parámetros físicos incluyendo el ángulo de aceptación media CMC ϑ_c .

El tamaño de la CMC parece no tener severas restricciones como las que se encuentran en la CPC (Fig. 3a), que depende de las propiedades geométricas de las parábolas. En la Figura 3 se muestra que los rayos en el CMC se comportan de igual manera que en el CPC, pero con rayos de diferente longitud. Esto puede explicarse por el cambio de fase debido al perfil de fase del metaespejo, que produce una longitud de trayectoria óptica equivalente para cada rayo.

Por otro lado, en iluminación el dispositivo óptico más importante es el colimador de luz, que dirige la luz de una fuente hacia un objetivo a iluminar. La lente TIR es un colimador diseñado para proyectar eficientemente una fuente de luz puntual en un haz colimado. Consiste en una lente frontal y una parábola, la fuente se coloca en el punto focal de estos elementos ópticos (Figura 8a). Este colimador es una solución popular para recolectar al máximo la luz emitida por los LED y redirigirla a un haz estrecho.

Un diseño metaóptico básico para la colimación de luz mediante una metalente TIR fue propuesto recientemente [12]. Los metalentes TIR podrían diseñarse para proyección de una fuente de luz puntual en un haz colimado por medio de metasuperficies (Figura 8b). Consiste en una placa plana con una metasuperficie frontal para colimación directa y un metaespejo plano para colimar la luz [12].

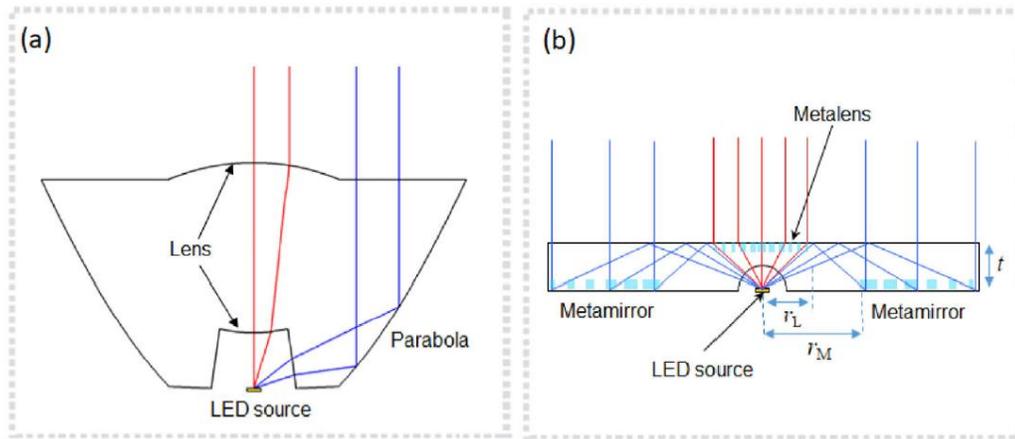


Figura 8. Colimador de luz: (a) diagrama esquemático de una lente TIR clásica y (b) diagrama esquemático de un metalente TIR [12].

La compactibilidad y la alta flexibilidad de diseño de la óptica plana basada en metasuperficies pueden abrir nuevas oportunidades en el campo de la NIO para la concentración de luz y la iluminación. Una característica importante es el alto control espacial de la luz. Al diseñar adecuadamente un perfil de fase, se puede controlar la distribución espacial de la luz, como se desea en los problemas de la NIO. Otra característica importante de la metaóptica NIO es que el perfil de fase 2D de la metasuperficie tiene el efecto equivalente a la forma de la superficie 3D en la NIO refractiva o reflectante. Esto ofrece una plataforma rica y prometedora para la óptica sin imágenes, que se caracteriza por el uso de formas de superficie 3D complejas. Por lo tanto, los problemas típicos de NIO, como la iluminación y la concentración de luz, pueden abordarse resolviendo problemas 2D en lugar de problemas 3D [12].

Existen muchos problemas sin resolver en la nueva área de la metaóptica NIO. Uno de esos son los efectos cromáticos, que son importantes para la gestión de la luz policromática; evaluar y cuantificar los efectos de las imperfecciones de fabricación; y, en general, abordar problemas avanzados de óptica sin imágenes. También es importante el tema del desarrollo de herramientas de análisis en el campo de la óptica sin imágenes [31, 32]. Además del estudio de la relación de

concentración, el rendimiento y la eficiencia, los cuales permitirán el análisis cuantitativo del rendimiento de los dispositivos metaópticos NIO [14].

El desarrollo de metales reflejantes de alta eficiencia será fundamental en el futuro de la metaóptica NIO. Existen metales reflectantes fabricadas que constan de un metaespejo sintonizable utilizando resonadores GSP de alta reflexión [33].

Capítulo 3

Óptica sin imágenes

La óptica sin imágenes o NIO (Nonimaging Optics), también llamada óptica anidólica, es la rama de la óptica que se ocupa de la transferencia óptima de radiación de luz entre una fuente y un objetivo. A diferencia de la óptica de imágenes tradicional, las técnicas involucradas no intentan formar una imagen de la fuente; en cambio, se desea un sistema óptico optimizado para una transferencia radiativa óptima desde una fuente a un objetivo [36].

Los sistemas ópticos formadoras de imágenes tienen tres componentes principales: el objeto, el sistema óptico y la imagen que forma. El objeto se considera como un conjunto de puntos que emiten luz en todas las direcciones. La luz (o parte de ella) de cada punto del objeto es capturada por el sistema óptico y concentrada en un punto de la imagen. Los sistemas ópticos sin imágenes, en lugar de un objeto, tienen una fuente de luz y en lugar de una imagen tienen un receptor. En lugar de una imagen de la fuente, la óptica produce un patrón de iluminancia (o irradiancia) deseado en el receptor (Figura 10).

Si el objetivo del sistema óptico es simplemente transferir la energía de una fuente a un receptor, la formación de imágenes es innecesaria. Basta con exigir que los rayos de luz que provienen de los bordes de la fuente se transformen en rayos que van a los bordes del receptor, como se muestra en la Figura 9. En los sistemas NIO hay muchos menos requisitos que en los sistemas formadores de imágenes (los cuales cuentan de diferentes grados de libertad para su diseño, debido a la cantidad de condiciones necesarias para formar una imagen nítida y de calidad), y sólo es necesario un pequeño número de grados de libertad que dará como resultado un dispositivo óptico.

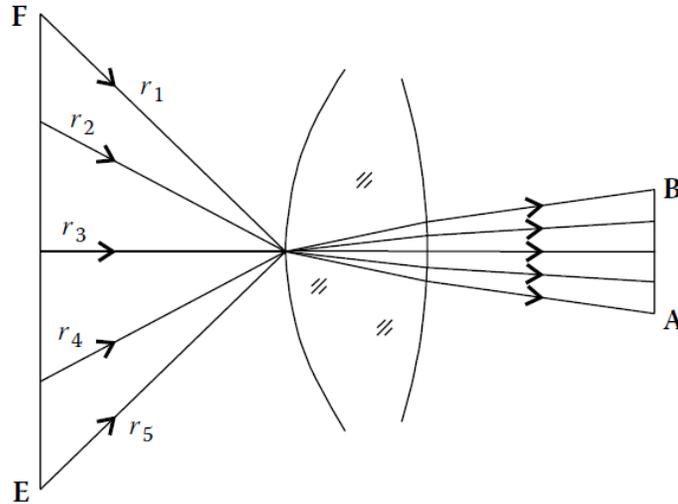


Figura 9. NIO y el principio de rayos de borde. Si el rayo r_1 proveniente del borde F de la fuente se desvía hacia el punto del borde A en el receptor y el rayo r_5 proveniente del borde E de la fuente se desvía hacia el borde B del receptor, todos los demás rayos: r_2, r_3, r_4 viniendo de puntos intermedios en la fuente EF terminará entre los puntos A y B en el receptor [37].

Si la fuente de luz se desplaza hasta el infinito, haciéndose infinitamente grande, la situación presentada se convierte en la de la Figura 10. En este caso, la radiación entrante se puede caracterizar por la apertura angular ϑ . Esta lente ahora funciona como un dispositivo que concentra en AB toda la radiación con la mitad de la apertura angular ϑ que cae en CD . Este dispositivo debe diseñarse de manera que los rayos paralelos d_1 se concentren en A y los rayos paralelos d_2 se concentren en B . De esta manera, toda la radiación que cae sobre el dispositivo formando un ángulo con el eje óptico menor que ϑ debe pasar entre A y B . Un ejemplo de estos sistemas, son los que concentran rayos de luz paralelos, que giran un ángulo ϑ al moverse el sol un ángulo ϑ a lo largo del día.

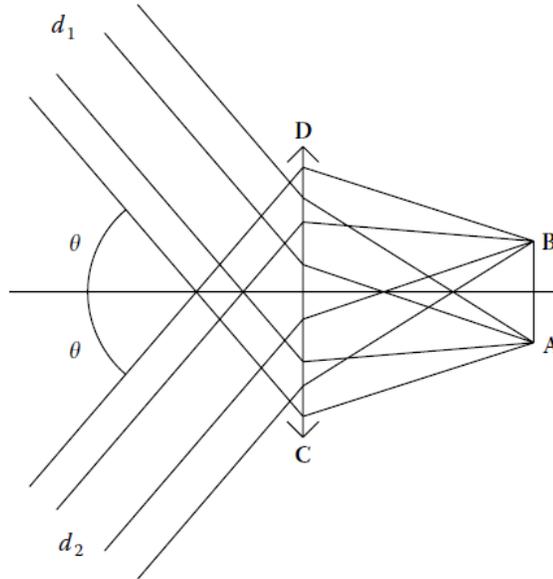


Figura 10. La radiación que llega al sistema óptico CD tiene una apertura angular ϑ para cada lado. Los rayos de borde d_1 se concentran en el punto A y los rayos de borde d_2 se concentran en el punto B [36].

Los dos problemas de diseño que la óptica sin imágenes resuelve mejor que la óptica de imágenes son: la concentración de energía solar, donde se encarga de maximizar la cantidad de energía dirigida a un receptor, normalmente una celda solar o un receptor térmico y la iluminación, donde se busca controlar la distribución de la luz, por lo general, para que se distribuya "uniformemente" en algunas áreas y se bloquee completamente en otras [36].

La primera aplicación de la óptica sin imágenes fue en el diseño de concentradores que podían funcionar en el límite teórico (termodinámico) máximo. El concentrador parabólico compuesto (CPC) fue el primer concentrador bidimensional (2-D) jamás diseñado, y el éxito del dispositivo dio origen a la óptica sin imágenes [37].

3.1 Métodos de análisis y diseño de la NIO.

La óptica geométrica se utiliza como herramienta básica en el diseño de casi cualquier sistema óptico, con o sin formación de imágenes. Las ideas intuitivas de un rayo de luz, definido aproximadamente como el camino a lo largo del cual viaja la energía de la luz, junto con las superficies que reflejan o transmiten la luz son las más usadas en el análisis. Cuando la luz se refleja en una superficie lisa, obedece a la conocida ley de la reflexión, que establece que los rayos incidente y reflejado forman ángulos iguales con la normal a la superficie y que tanto los rayos como la normal se encuentran en un mismo plano. Cuando se transmite la luz, la dirección del rayo cambia de acuerdo con la ley de refracción: la ley de Snell. Esta ley establece que el seno del ángulo entre la normal y el rayo incidente guarda una relación constante con el seno del ángulo entre el rayo refractado y la normal de la superficie [39].

La velocidad de la luz en un medio de índice de refracción n es c/n , donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Así, la luz recorre una distancia s en el medio en un tiempo $s/v = ns/c$; es decir, el tiempo que se tarda en recorrer una distancia s en un medio de índice de refracción n es proporcional a ns . La cantidad ns se denomina longitud del camino óptico correspondiente a la longitud s . Si tenemos una fuente puntual O que emite luz en un sistema óptico, como en la Figura 11. Podemos rastrear cualquier número de rayos a través del sistema y luego podemos marcar a lo largo de estos rayos los puntos que tienen la misma longitud de camino óptico desde O , digamos, $P1$, $P2$ y $P3$. Esos puntos forman el locus del frente de onda propagándose en esa parte del sistema óptico. Hacemos esto haciendo que la suma de las longitudes de los caminos ópticos desde O en cada medio sea la misma, es decir,

$$\sum ns = \text{constante}, \quad (4.1)$$

Estos puntos se pueden unir para formar una superficie, que sería una superficie de fase constante de las ondas de luz si pensáramos en términos de la teoría ondulatoria de la luz, es decir el frente de onda. El frente de onda geométrico, o simplemente frente de onda, se puede construir en todas las distancias a lo largo del haz de rayos desde O [39].

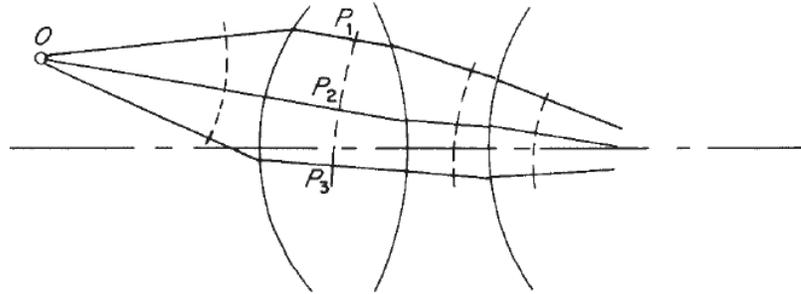


Figura 11. Rayos y (en línea discontinua) frentes de onda geométricos [39].

Históricamente, la teoría de óptica sin imágenes se ha desarrollado mediante métodos de análisis heurísticos como "evolución de rayos de borde", "método de cuerdas", " método de Múltiples Superficies Simultaneas " y "concentrador de rayos de borde a medida" [40].

La forma más sencilla de diseñar óptica sin imágenes se llama "el método de cuerdas" basado en el principio del rayo de borde. A principios de la década de 1990 se desarrollaron otros métodos más avanzados que pueden manejar mejor las fuentes de luz extendidas que el método de rayos de borde. Estos se desarrollaron principalmente para resolver los problemas de diseño relacionados con los faros de luz de automóviles y otros sistemas de iluminación más complejos [36].

A continuación se presenta una breve descripción de los 2 métodos de diseño para concentradores de iluminación más utilizados:

- Rayos de borde:

El principio de rayos de borde de la óptica sin imágenes establece que los dispositivos sin imágenes pueden diseñarse mediante el mapeo de rayos de borde desde la fuente hasta el borde del objetivo. Sin embargo, en la mayoría de los dispositivos reflectores, incluido el concentrador parabólico compuesto (CPC), al menos parte de la radiación sufre múltiples reflexiones, algunos rayos incluso parecen reflejarse infinitas veces, y un examen más detallado revela que algunos rayos de borde de la fuente no son reflejados [41].

En términos simples, el principio del rayo de borde establece que si los rayos de luz que provienen de los bordes de la fuente se redirigen hacia los bordes del receptor, esto asegurará que todos los rayos de luz que provienen de los puntos intermedios de la fuente terminarán en el receptor. No existe ninguna condición para la formación de la imagen, el único objetivo es transferir la máxima cantidad de luz de la fuente al objetivo (Figura 12) [36].

En el proceso de diseño, no se tiene que tener en cuenta todos los rayos que se desean transferir. Es suficiente tener en cuenta ciertos rayos limitantes llamados rayos de borde, cuya transferencia garantizará la transferencia de todos los rayos. En el caso de los concentradores tipo embudo, como el concentrador parabólico compuesto (CPC), estos son los rayos que forman el mayor ángulo con el plano de apertura. Luego, se deben tener en cuenta los rayos de borde adicionales, es decir, los de desplazamiento extremo del eje óptico pero que tienen cualquier ángulo dentro del ángulo de aceptación. Esto nos lleva a una definición más general de los rayos de borde, propuesta por Miñiano [42,43], como aquellos que unen a los demás en el espacio de fase. Sobre la base de esta definición, se han diseñado concentradores de índice de refracción gradual y lentes sin imagen [44].

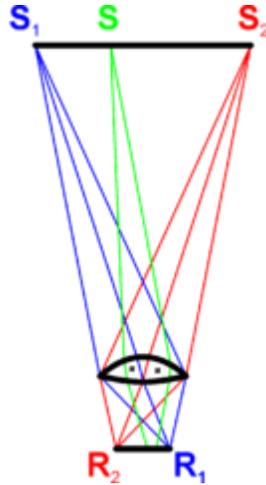


Figura 12. Ejemplo del principio de rayos de borde. Una lente recoge la luz de una fuente S_1, S_2 y la redirige hacia un receptor R_1, R_2 . Los rayos de luz provenientes del borde S_1 de la fuente sean redirigidos hacia el borde R_1 del receptor, como lo indica los rayos azules. Por simetría, los rayos que provienen del borde S_2 de la fuente se redirigen hacia el borde R_2 del receptor, como lo indican los rayos rojos. Los rayos provenientes de un punto interno S en la fuente se redirigen hacia el objetivo, pero no se concentran en un punto y, por lo tanto, no se forma ninguna imagen.

- Múltiples Superficies Simultaneas (del inglés SMS):

El método de diseño de SMS fue propuesto inicialmente por Miñano y Benítez [45] con el objetivo de obtener métodos más eficaces en el diseño de concentradores solares en dos dimensiones (2D) para instalaciones fotovoltaicas. Estos diseños eran llevados luego a tres dimensiones (3D) por simetría lineal o de revolución, método que se utiliza aún [46]. Este método es una extensión directa al cálculo del óvalo cartesiano. Dados n haces de rayos de un parámetro de entrada y n haces de rayos de un parámetro de salida, n segmentos de esferas se pueden construir directamente [47].

La óptica SMS se calcula aplicando una longitud de trayectoria óptica constante entre frentes de onda. En general, los rayos perpendiculares al frente de onda entrante w_1 se acoplarán al frente de onda saliente w_2 y los rayos

perpendiculares al frente de onda entrante w_2 estarán acoplados al frente de onda saliente w_3 y estos frentes de onda pueden tener cualquier forma (Figura 13). Sin embargo, en aras de la simplicidad, esta figura muestra un caso particular o frentes de onda circulares [36].

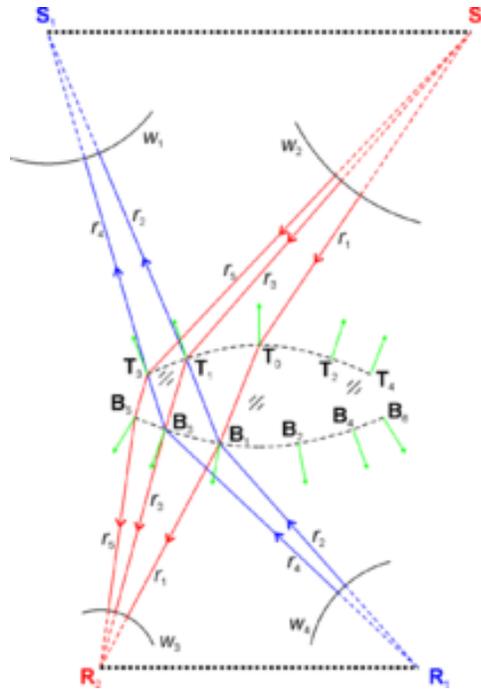


Figura 13. Ejemplo del método SMS para una lente de un índice de refracción n dado diseñada para una fuente S_1S_2 y un receptor R_1R_2 . Donde T_0 es el punto inicial del análisis, r_1 es el rayo procedente de S_2 y refractarlo en T_0 . Al elegir ahora la longitud de la trayectoria óptica entre S_2 y R_2 , tenemos una condición que nos permite calcular el punto B_1 en la superficie inferior de la lente, y así sucesivamente con los otros rayos.

El poder del método SMS radica en el hecho de que los frentes de onda entrante y saliente pueden ser de forma libre, lo que le da al método una gran flexibilidad. Además, al diseñar ópticas con superficies reflectantes o combinaciones de superficies reflectantes y refractivas, son posibles diferentes configuraciones [36].

Este método se desarrolló principalmente como un método de diseño en óptica sin imágenes durante la década de 1990, sin embargo, el método luego se amplió para diseñar óptica para formar imágenes [47]. Debido a que el método SMS implica el cálculo simultáneo de N superficies ópticas (refractivas o reflectoras) utilizando N haces de rayos de un solo parámetro para los que se imponen condiciones específicas [48].

El método de cuerdas se aborda en el siguiente capítulo (Capítulo 4) de una manera más detallada debido a que es el método que se estudió y se adaptó para el análisis y diseño de los metaconcentradores propuestos en éste trabajo de investigación.

Capítulo 4

El método de cuerdas

Una manera sencilla y básica de obtener el diseño y análisis de los espejos en los diferentes concentradores consiste en utilizar el método de cuerdas, también llamado como el método de la cadena o el método del jardinero. Este método permite la generación de perfiles de concentradores para cualquier forma de fuente o receptor de radiación y encontrar la forma de los que concentran la luz de fuentes arbitrarias a receptores arbitrarios. [37].

Para motivar el método, comenzamos con la afirmación de que todo diseño óptico de imágenes se deriva del principio de Fermat y que la longitud del camino óptico entre el objeto y los puntos de la imagen es la misma para todos los rayos. Cuando este mismo principio se aplica usando las "cuerdas" en lugar de rayos, se obtiene el algoritmo de rayos de borde de diseño óptico sin imágenes, donde al transportar las cuerdas de los bordes, sin tener en cuenta el orden intermedio, permite obtener la ley del seno límite de concentración. (Figura 14) [39].

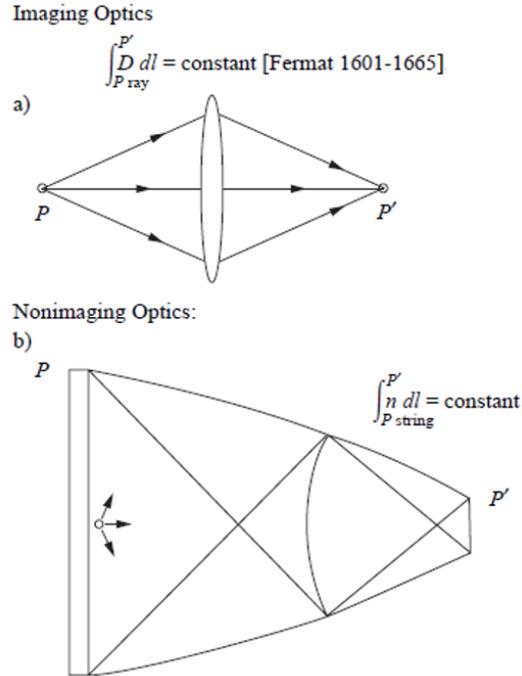


Figura 14. Principio de Fermat en el método de cuerdas, a) Óptica formadora de imágenes, b) Óptica de iluminación o concentración de luz (NIO).

El principio de Fermat nos menciona que el camino óptico a lo largo de una trayectoria real de luz es estacionario, es decir es extremal. Un extremal puede ser un mínimo, un máximo o un punto de inflexión. Sin embargo, normalmente suele ser un mínimo, en cuyo caso, los rayos de luz se propagan a lo largo de trayectorias de un tiempo mínimo. Dicho de otra forma: la trayectoria seguida por la luz para pasar de un punto a otro es aquella para la cual el tiempo de recorrido es mínimo.

En un medio homogéneo, el índice de refracción no varía de un punto a otro, por tanto la velocidad de la luz será constante. En este caso, el camino de tiempo mínimo que exige el principio de Fermat es también el camino de mínima distancia. Esto implica que las trayectorias de la luz en medios homogéneos son siempre rectilíneas, además también son reversibles.

En un medio heterogéneo el índice de refracción es una función de la posición determinada por un vector $r=r(x,y,z)$, de forma que $n=n(r)$. En este caso para calcular el camino óptico a lo largo de una trayectoria luminosa entre los puntos A y B , se debe descomponer la trayectoria en pequeños elementos infinitesimales (ds), de forma que [49]:

$$L_{op} = \int_A^B n(r) ds. \quad (4.1)$$

El método de cuerdas tiene diferentes características específicas que lo describe como que la longitud de las cuerdas es constante y que las cuerdas son perpendiculares a la superficie del frente de onda, además, muchas veces es conveniente adaptar el método al caso en donde la fuente de radiación se coloca en el infinito, aunque también se puede aplicar en los casos en los que la fuente tiene una forma dada y se coloca a una distancia finita. Es uno de los métodos que funciona para cualquier tipo de concentrador, desde los más sencillos como el elíptico o el parabólico, hasta concentradores más avanzados [37]. El método permite obtener la forma óptima de esos concentradores de luz. Por ejemplo, para diseñar un espejo que concentre toda la luz emitida por una fuente puntual en otro punto, se toma una cuerda que se sujeta a esos dos puntos (A y E), ver Figura 15a, De manera imaginaria se ata la cuerda en los puntos A y E , y después se estira la cuerda con un marcador y se mueve el marcador (a lo largo de los puntos P) de manera que se mantiene la cuerda estirada, la punta del marcador dibujará una elipse. Esto se debe a que, en una elipse, la longitud $[E, P, A]$ (longitud de la cuerda) es constante para todos sus puntos P .

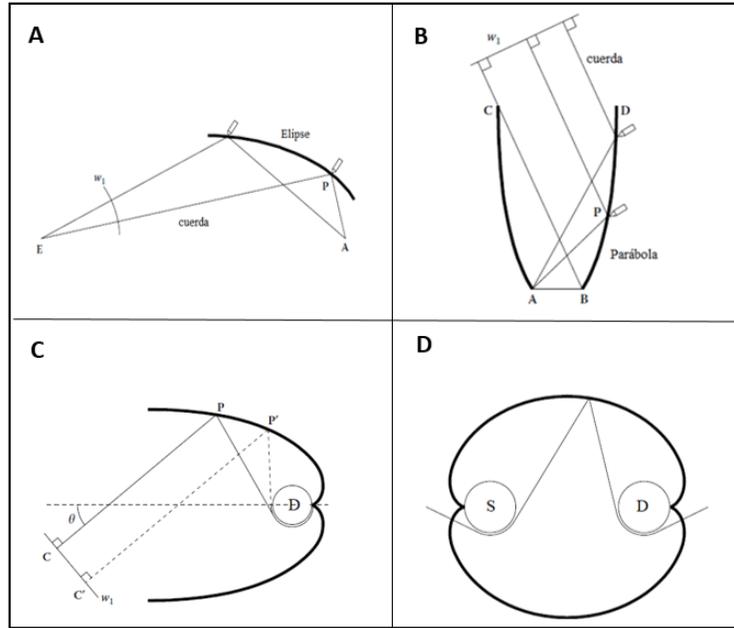


Figura 15. *Diseño y análisis de concentradores convencionales usando el método de cuerdas. (A) y (B) Concentradores básicos y (C) y (D) Concentradores más avanzados.*

4.1 Concentrador parabólico compuesto convencional

La idea del concentrador Parabólico Compuesto (CPC) tiene más de 55 años, la idea fue concebida simultáneamente en 1966 en Estados Unidos de Norte América por Hinterberger y Winston, en Alemania por Ploke y en la URSS por Batanov y Melnikov.

En 1997 Winston describió en CPC en 2D, mostrando que tiene una máxima concentración posible. En 1976 Rabl analizó sus propiedades ópticas y térmicas. En ese trabajo Rabl presentó también el desempeño de un CPC en 2D truncado, y en el mismo trabajo desarrolló la descripción paramétrica del CPC en 2D en coordenadas cartesianas. En 1981 Rapp desarrolló el CPC utilizando una descripción matemática basada en geometría analítica y, a través de ésta, obtuvo los parámetros geométricos importantes para su diseño [51].

Dentro del ámbito de las tecnologías de concentración solar, el concentrador parabólico compuesto es uno de los dispositivos más usados, sobre todo por su gran capacidad de concentración de energía. Los principios físicos del funcionamiento del CPC permiten una discusión ilustrativa del comportamiento óptico y geométrico [52].

Un procedimiento simple y geoméricamente atractivo para el análisis y diseño del CPC es el del método de cuerdas. Para concentradores solares, con la fuente de luz esencialmente en el infinito, se considera un frente de onda plano incidente en el ángulo extremo de aceptación. Un frente de onda plano equivale a un haz de luz conformado por rayos paralelos. Y un haz de luz que incide a un ángulo θ está conformado por rayos extremos. Todos esos rayos extremos deben alcanzar el borde absorbente y la longitud total de la trayectoria de la cadena deben ser iguales [53]:

$$\int_{\text{Frente de Onda}}^{\text{Borde de absorcion}} ds = \text{constante.} \quad (4.2)$$

Donde la longitud de cada cuerda (longitud de camino) va desde un punto en el frente de onda hasta el borde del detector (o absorbente). El ds representa la longitud del camino diferencial.

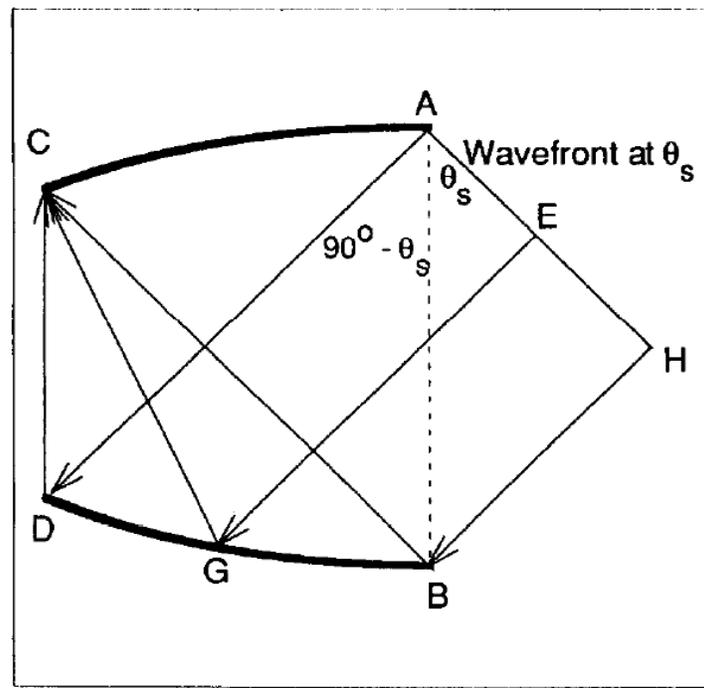


Figura 16. Un diagrama del CPC para su análisis [53].

La construcción del CPC por éste método es representado en la Figura 16. En la figura el absorbedor se representa como CD , la apertura de entrada como AB , el frente de onda extremo incidente AH y los reflectores del CPC como AC y BD . Cada rayo en el frente de onda AH que incide en la dirección extrema ϑ_s sobre DG se refleja hacia el borde del absorbedor C después de una sola reflexión. La longitud del camino óptico constante ($AD + CD = EG + GC = HB + BC$) requiere que el reflector sea el lugar geométrico de los puntos que son equidistantes de un punto y una línea, lo que dicta un arco parabólico girado (en relación con el eje óptico) por el ángulo extremo ϑ_s , con foco en C . La construcción del CPC se ilustra con el segmento inferior BD , siendo el reflector superior AC su imagen especular por simetría [53].

La Figura 17 muestra una cuerda o rayo de luz para tres diferentes ángulos de entrada respecto al eje óptico del CPC. La Figura 17 (a) muestra la trayectoria de una cuerda de borde dentro de un CPC. Esta cuerda ingresa al CPC en un

ángulo ϑ con la vertical y se refleja hacia el borde del receptor. La Figura 17 (b) presenta el caso de una cuerda que ingresa al CPC formando un ángulo con la vertical $\vartheta_1 < \vartheta$. Ahora la cuerda se refleja hacia el receptor. La Figura 17 (c) presenta el caso de una cuerda que ingresa al CPC con un ángulo $\vartheta_2 > \vartheta$. El rayo de luz, después de algunos reflejos, termina retrocediendo y saliendo por la abertura de entrada sin llegar al receptor. Este comportamiento de las cuerdas dentro de un CPC es general, en el sentido de que todas las cuerdas que ingresan al CPC con un ángulo $\vartheta_1 < \vartheta$ inciden en el receptor y todas las cuerdas que ingresan al CPC con un ángulo $\vartheta_2 > \vartheta$ se reflejan en sus paredes hasta que salen del CPC por la abertura de entrada. Se dice que se acepta una cuerda que termina en el receptor y se dice que se rechaza una cuerda que regresa. La relación entre el número de rayos de luz aceptados y el número de rayos que ingresan al CPC se denomina aceptación [37]:

$$\text{Aceptación} = \frac{\text{Número de cuerdas aceptadas en el CPC}}{\text{Número de Cuerdas ingresadas en el CPC}}. \quad (4.3)$$

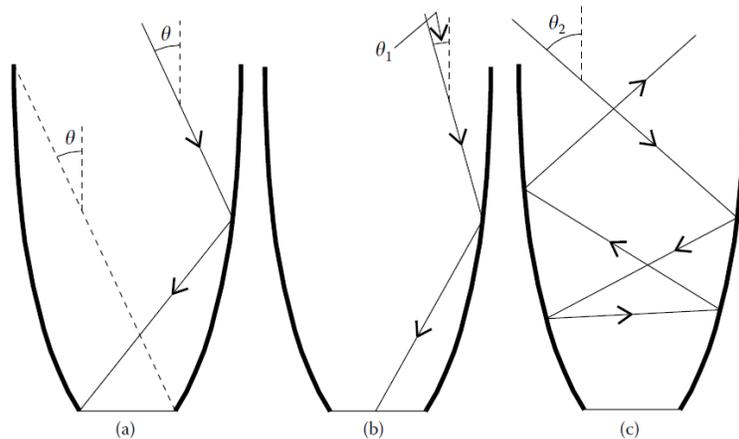


Figura 17. Diagrama para diferentes ángulos de incidencia en el diseño y análisis del CPC [37].

Por lo tanto, para $-\vartheta < \vartheta_1 < \vartheta$, la aceptación es 1 (todos los rayos que ingresan al CPC inciden en el receptor) y para $\vartheta < \vartheta_2 < -\vartheta$, la aceptación es 0 (todos los rayos que ingresan al CPC son rechazado, finalizando con la salida por la abertura de entrada).

El concentrador obtenido anteriormente debe ser capaz de entregar la máxima concentración posible porque fue diseñado para maximizar el tamaño de la abertura de entrada sin pérdidas de radiación, por lo que es importante tener en cuenta el ángulo de aceptación en el diseño del mismo [37].

Los CPC's presentan ventajas en comparación de otros tipos de tecnologías, sobre todo en las tecnologías solares, ya que estos pueden operar sin la necesidad de un sistema de seguimiento, concentran radiación directa y difusa, son de bajo costo y pueden alcanzar temperaturas de hasta 150°C. Características suficientes para su uso en el sector industrial, comercial y doméstico como concentrador de energía radiante [54].

4.2 Concentrador tubular

Dentro de las tecnologías de concentración y de iluminación es importante tener en cuenta que existen muchos tipos de concentradores y colectores que se clasifican dependiendo del uso que se les puede dar. Por ejemplo, el CPC es un tipo de colector solar que combina dos parábolas, con el fin de obtener una mayor captación de los rayos reflejados hacia un detector o absorbedor que tiene la forma de una superficie plana [55]. El método de cuerdas también permite encontrar los perfiles de concentradores para otras formas de fuente o receptor de radiación.

El trabajo de Rabl, O'Gallagher y Winston en 1980, mostró cuatro diferentes formas de receptor en un concentrador, dando lugar a una gama de diferentes diseños de colectores. Los concentradores se optimizaron para diferentes

configuraciones de receptor, con formas: plano horizontal, plano vertical, V invertida y receptor cilíndrico, las cuales se muestran en la Figura 18 [56,57].

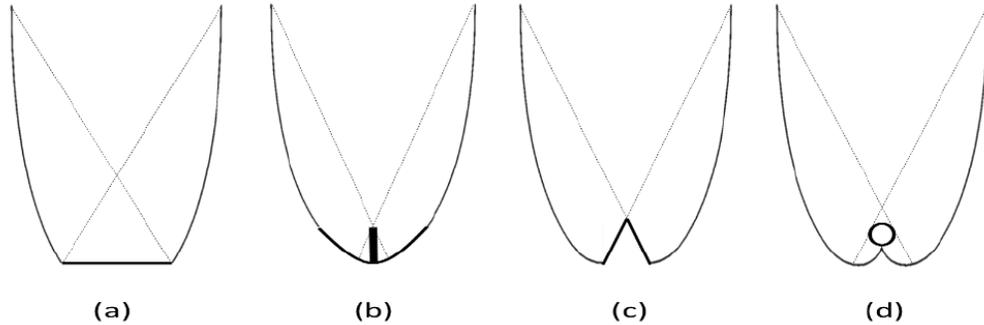


Figura 18. Diferentes formas de receptor en el CPC. (a) Básico (plano), (b) delgado, (c) bifurcado, (d) tubular [55].

Entonces, el Concentrador Tubular tiene una forma más óptima que el CPC, para el caso en el que el receptor de luz o energía térmica tiene forma de un cilindro.

El concentrador tubular que emplea un receptor cilíndrico se compone de dos partes con sus respectivas ecuaciones gobernantes. La primera parte es la parte inferior del perfil denominado involuta, la segunda parte es la parte superior denominada copa. La copa (superficie reflejante superior), está compuesta por dos curvas idénticas (parábolas) que conforman el concentrador, colocadas de tal manera que ambas superficies quedan opuestas reflejando a puntos focales colocados en el receptor [56].

El funcionamiento se basa en aprovechar el principio geométrico del foco de las dos curvas que conforman la copa, el cual se hace coincidir con el receptor en un determinado ángulo en los extremos opuestos, la parte inferior (involuta), capta

los rayos redirigiéndolos al centro del receptor, de esta forma se logra iluminar completamente al receptor [57].

El método de la cuerda presentado en la Figura 19 es para el diseño de concentradores tubulares para el caso en el que la fuente se coloca en el infinito, donde la cuerda debe mantenerse perpendicular al frente de onda w_1 en toda la extensión del espejo. Para dibujar la geometría del concentrador es necesario fijar las puntas de la cuerda en C y C' y elegir su longitud de modo que como el espejo se diseñe de P a P' , termine tocando el punto X [37].

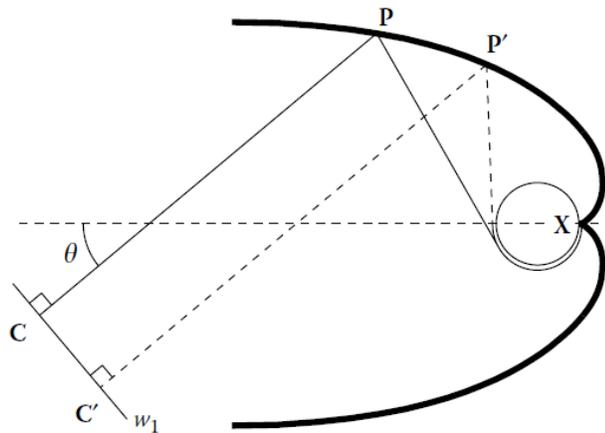


Figura 19. Concentrador Tubular diseñado utilizando el método de cuerdas.

Para justificar la introducción de la involuta, es necesario examinar sus propiedades ópticas. Se puede obtener una involuta a un círculo desenrollando una cuerda de longitud constante. Una punta de la cuerda está unida al punto X y el punto P , donde se sujeta la cuerda para ser movida de P a P' (en el frente de onda de C a C') describe dicha involuta. Este método de diseño genera rayos de luz que inciden de manera tangente en cada punto del receptor circular, como puede verse en la Figura 20 (a). Su comportamiento óptico se presenta en la Figura 20 (b). El

rayo tangente al receptor y procedente de un punto T' es reflejado por el espejo en un punto B' de vuelta a T' . Por lo tanto, cualquier rayo r proveniente del espacio entre el receptor y el espejo se reflejará hacia el receptor, como se desea. Nótese también que esta curva obedece al principio del rayo de borde: un rayo de borde que sale tangencialmente de T' se refleja en B' nuevamente con dirección a T' , es decir, tangencialmente al tubo, por lo que el rayo reflejado en B' es también un rayo de borde [37]. En resumen, cualquier rayo de luz que incida a un ángulo más pequeño que ϑ (Fig. 20) se concentrará en el tubo del receptor.

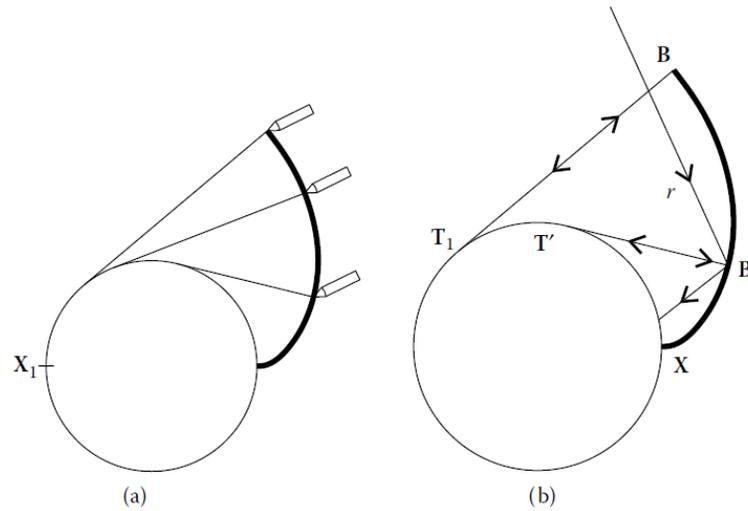


Figura 20. Diseño de la envolvente en el Concentrador Tubular. (a) Utilizando el método de cuerdas, (b) descripción con rayos de borde.

Capítulo 5

Metodología

Con el creciente desarrollo de la tecnología utilizando metales en sistemas ópticos formadores de imágenes, se implementa en éste trabajo de investigación el método de cuerdas para el diseño y análisis de concentradores de luz utilizando metaespejos o metales reflejantes. Los concentradores propuestos para la investigación se describen a continuación.

Se analizaron tres diferentes tipos de metaconcentradores básicos. El primero el más simple, la Metalente Simple (MS) para concentrar la luz en un punto focal, el segundo el denominado Metaconcentrador Compuesto(MC), el cual es una analogía al Concentrador Parabólico Compuesto y el tercero nombrado Metaconcentrador Tubular (MT), cuya analogía sería el Concentrador Tubular.

En el capítulo anterior se abordó el método de cuerdas, que es uno de los más básicos e importantes en el análisis y diseño de concentradores de iluminación convencionales, es por ello que es importante sentar las bases teóricas para implementar este método en los nuevos metaconcentradores.

Para comenzar con el análisis es importante saber que el perfil de forma de un espejo tradicional está asociado con el perfil de fase de un metaespejo, el cual es en esencia una superficie plana, por lo que en el siguiente trabajo se presenta el desarrollo para obtener el perfil de fase de los metaconcentradores utilizando el método de cuerdas. Para obtener el perfil de los metaconcentradores, se debe considerar un perfil generado en dos dimensiones, el cual será equivalente al perfil de la forma en 3 dimensiones de los concentradores clásicos.

5.1 Método de cuerdas para metaconcentradores: cálculo del perfil de fase

El perfil de fase en los metalentes describe como debe ser el desfase que debe introducir cada punto de la metasuperficie para enfocar la luz, y así, diseñar y acomodar los metaátomos o nanoestructuras sobre la metasuperficie. Este perfil de fase es equivalente a la forma geométrica de los lentes o espejos convencionales (planos, cóncavos o convexos), análogos a las metalentes o metaconcentradores analizados.

El desarrollo del perfil en los concentradores convencionales y en los metaconcentradores utilizando el método de cuerdas, es un desarrollo geométrico analítico, el cual utiliza figuras geométricas (principalmente triángulos), así como leyes y reglas geométricas y angulares (teorema de Pitágoras, leyes de senos y cosenos, análisis de ángulos semejantes, complementarios, entre otros). A continuación se presentan de forma general los pasos que se deben seguir para la obtención del perfil de fase de los metaconcentradores.

1. Realizar un modelo visual del metaconcentrador. Donde se incluirá la elección de la posición y forma de la fuente, la elección de la ubicación y orientación de la metasuperficie, así como la forma y posición del absorbedor y se dibujaran las cuerdas que cruzan dentro del metaconcentrador.
2. Definir los dos puntos extremos de las cuerdas dentro del gráfico que representa el modelo visual.
3. Definir la longitud de la cuerda igual a la Longitud de Camino Óptico (LCO) correspondiente a cada rayo de luz.
4. Definir una ecuación de igualdad, que iguale las LCO's de las cuerdas
5. A partir de la ecuación de igualdad determinar el valor necesario de LCO extra o ΔLCO , requerido para que se cumpla la ecuación dada la geometría plana de la metasuperficie.
6. A partir de la definición de fase, calcular la fase equivalente al ΔLCO , la cual construye el perfil de fase del metaconcentrador.

5.2 Metaconcentrador Compuesto (MC)

El diseño propuesto para el MC (Figura 21) se describe como un metaconcentrador que consta de dos metalentes de una Longitud total L (una va del punto D al punto B), las cuales están inclinadas un ángulo β , el receptor es plano (de longitud a). Al metaconcentrador se le incide un Frente de onda (w_1), el cual tiene una inclinación de ϑ_c . Se analizaron dos cuerdas una que toca la esquina del receptor, y la otra cuerda toca la metalente en un punto arbitrario a una distancia l de la esquina del receptor.

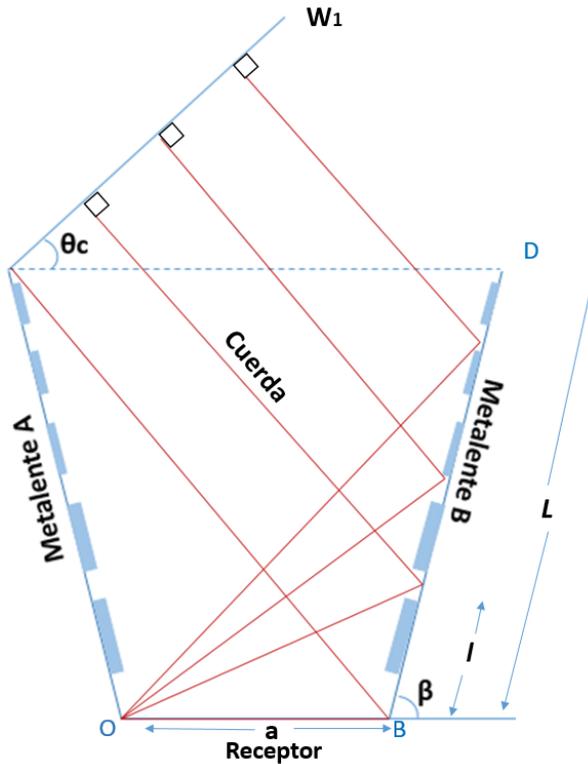


Figura 21. Propuesta de diseño del Metaconcentrador Compuesto.

Para calcular el perfil de fase del MCP es necesario seguir los pasos presentados en la sección 5.1 de éste capítulo.

Consideremos una cuerda que tiene un extremo en el frente de onda, y ese extremo puede moverse sobre el frente de onda. La descripción del recorrido y ubicación de la cuerda se muestra en la Figura 22. Un extremo de la cuerda se ubica en un punto del frente de onda (la cuerda deberá permanecer perpendicular al frente de onda) y el otro en el punto O , la cuerda se estira hasta el punto B . Al mover el extremo de la cuerda que se encuentra en el frente de onda a otro punto de w_l sin mover el extremo ubicado en O , conseguiremos estirar la cuerda hasta el punto A .

En la óptica clásica, la longitud constante de la cuerda se conserva estirando la cuerda, que al moverse describe una curva que resulta ser el perfil del espejo ideal para concentrar la luz. En el caso de metaconcentradores, la cuerda se estira sobre una superficie plana (metalente), y para conservar la longitud de camino óptico se requiere que la metalente introduzca una diferencia de fase equivalente a esa longitud de cuerda, lo cual se representa matemáticamente mediante la ecuación de igualación de camino óptico (paso 4 de la Sección 5.1). En otras palabras, para calcular el perfil de fase para el MC se requiere definir la ecuación de igualdad de longitud de camino óptico (LCO) de una cuerda de referencia (que pasa por el punto B) y la LCO de la otra cuerda que pasa por el punto A. Ya que la LCO es igual de w_l a la línea CD para las dos cuerdas, tomamos la LCO desde la línea CD hasta el punto O. Así, para este metaconcentrador la ecuación de igualdad queda:

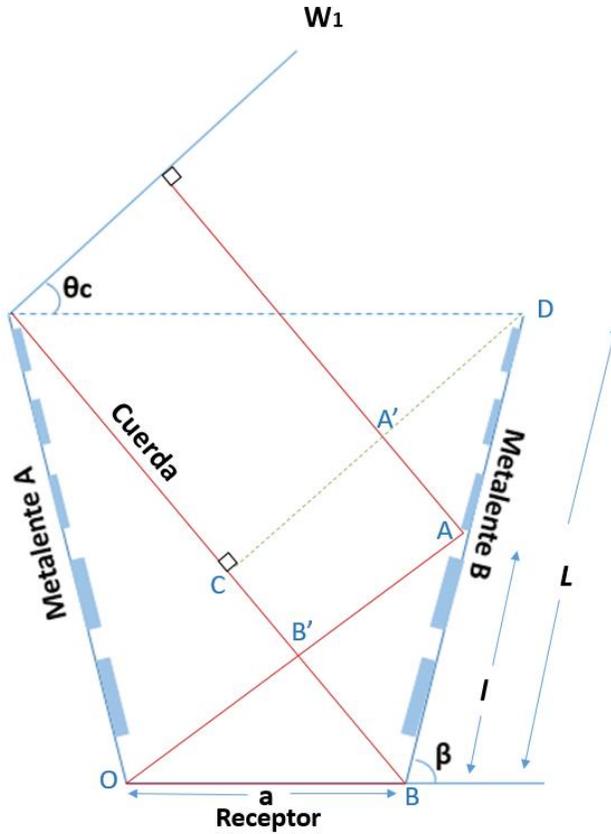


Figura 22. Elección de las dos cuerdas (paso 2 de la sección 6.1) para comenzar el análisis del MC.

$$\overline{CB} + a + LCO_{eff}(0) = \overline{AA'} + \overline{AO} + LCO_{eff}(l), \quad (5.1)$$

en donde $LCO_{eff}(0)$ es la LCO introducida por la metalente en el punto $l=0$ (en el punto B), mientras que $LCO_{eff}(l)$ es la LCO introducida por la metalente en el punto arbitrario a una distancia l del punto B . Ya que en una metasuperficie lo que determina la dirección de propagación de la luz es el gradiente de fase, solo la fase relativa es importante. Por lo tanto, sólo nos importa la LCO_{eff} relativa, que tomamos como:

$$\Delta L(l) = LCO_{eff}(l) - LCO_{eff}(0), \quad (5.2)$$

$$\Delta L(l) = \overline{CB} + a - \overline{AA'} - \overline{AO}. \quad (5.3)$$

La Figura 23 muestra los dos triángulos trazados por las cuerdas en la Figura 23, de estos se pueden obtener las longitudes (CB , AA' y AO) de la ecuación 5.3.

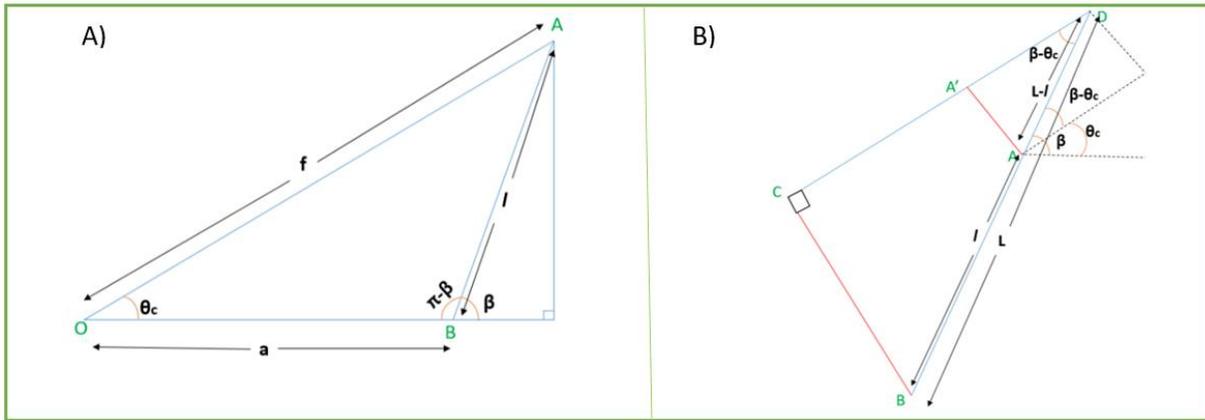


Figura 23. A) Triángulo usado para calcular AO . B) Triángulo para calcular AA' y CB .

El resultado del cálculo del cambio de longitud de camino óptico introducido por la metalente es:

$$\Delta L(l) = a + l \sin(\beta - \theta_c) - \sqrt{l^2 + a^2 + 2al \cos(\beta)}. \quad (5.4)$$

En óptica se tiene que un cambio de longitud de camino óptico está asociado a un cambio de fase, por lo que el cambio de LCO obtenido equivale a un cambio de fase, dado por:

$$\phi(l) = \frac{2\pi n}{\lambda} \Delta L(l), \quad (5.5)$$

en donde n es el índice de refracción del medio incidente y λ es la longitud de onda de la luz. Finalmente, el perfil de fase correspondiente para nuestro MC es:

$$\phi(l) = -k(\sqrt{l^2 + a^2 + 2al\cos(\beta)} - a - l\sin(\beta - \theta_c)), \quad (5.6)$$

en donde k es el numero de onda ($2\pi/\lambda$), y los demás parámetros geométricos describen al metaconcentrador (Fig. 21)

Se puede comprobar que el perfil de fase para el MC que se presenta en la ecuación 5.6 es el mismo que ya fue reportado en la bibliografía, confirmando la validez del método de cuerdas para éste metaconcentrador. Es importante recalcar que éste perfil de fase, es aquel que los nanoelementos en la metasuperficie deben introducir para formar el metaconcentrador con las características específicas ya dadas. Éste perfil de fase se espera que tenga una forma parecida al espejo de un CPC convencional (forma parabólica).

5.3 Metaconcentrador tubular (MT)

El metaconcentrador Tubular (MT) es diferente al MC, en donde se intercambia el receptor lineal por un receptor tubular, como ocurre con los concentradores convencionales. Por lo que el diseño propuesto resulta ser parecido. Éste consta de dos metalentes de una longitud total L (que va del punto S al punto

D), las cuales están inclinadas un ángulo θ , el receptor en forma circular tendrá un radio r y la distancia entre las dos metasuperficies se representa con una longitud a . Al metaconcentrador se le incide un frente de onda w_1 , el cual tiene una inclinación de ϑ_c . La cuerda recorre la metalente una longitud variable l . La propuesta de diseño de dicho metaconcentrador se observa en la Figura 24.

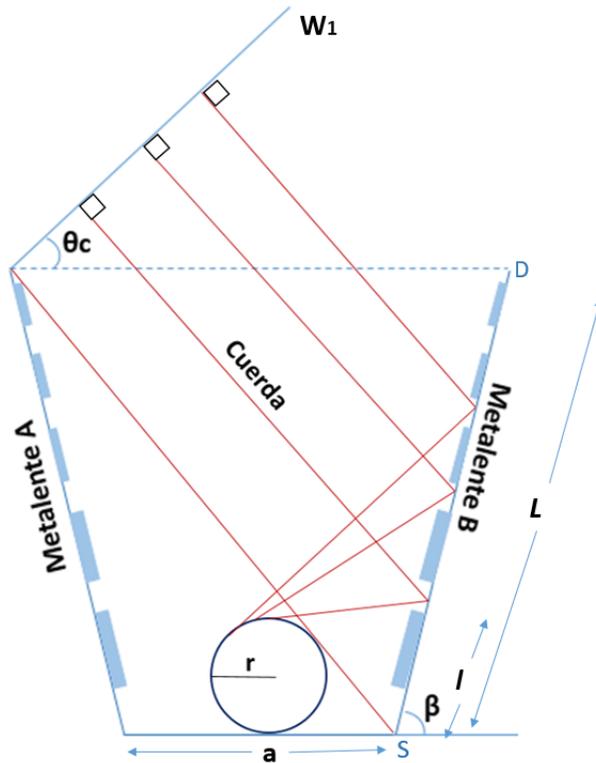


Figura 24. Propuesta de diseño del Metaconcentrador tubular.

Para comenzar con el análisis para el MT usando el método de cuerdas nuevamente seguimos los pasos de la sección 5.1 de éste capítulo. También tomemos en cuenta el ángulo γ (Figura 25), que se forma entre la línea vertical que cruza por la mitad del metaconcentrador y la cuerda principal.

El recorrido de la cuerda en el metaconcentrador es descrita con la ubicación de sus extremos, uno en el punto m y el otro en el frente de onda. La cuerda de referencia se estira desde w_1 hasta el punto S , presentando un roce con el receptor

circular en el punto u . Después, la cuerda se dirige hacia el punto u del receptor y se enrolla desde el punto hasta el punto m . El punto m representa un punto a elección en el perímetro del receptor circular, se recomienda elegir este punto de forma de que los cálculos resulten más sencillos. Al mover la cuerda a otro punto sobre el frente de onda obtendremos un estiramiento de la cuerda hacia el punto B y un roce en el receptor circular en el punto c . Con esto se asegura que todos los rayos de luz que incidan a ángulos menores que ϑ_c se concentren en el cilindro.

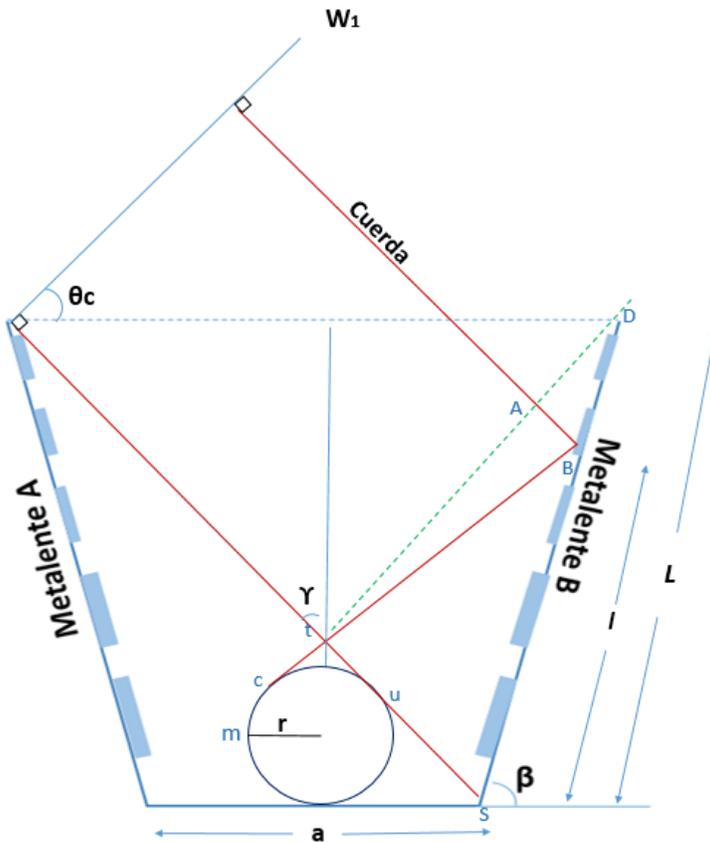


Figura 25. Elección de las dos cuerdas (paso 2 de la sección 5.1) para comenzar el análisis del MT.

El cálculo del análisis del perfil de fase para el MT comienza con la descripción de la Longitud de camino óptico (LCO) descrito en la Figura 25.

Definiendo la igualdad de LCO's:

$$\bar{t}s + \bar{s}u + \widehat{um} + LCO_{eff}(0) = \overline{AB} + \overline{BC} + \widehat{cm} + LCO_{eff}(l), \quad (5.7)$$

en donde el símbolo de gorrito en um y cm indica la longitud del segmento de arco circular sobre el cilindro. La diferencia de caminos ópticos está dada por:

$$\Delta L(l) = LCO_{eff}(l) - LCO_{eff}(0), \quad (5.8)$$

$$\Delta L(l) = \bar{t}s + \bar{s}u + \widehat{um} - \overline{AB} - \overline{BC} - \widehat{cm}. \quad (5.9)$$

La figura 26 muestra segmentos de la Figura 25 ampliadas para realizar el análisis de cada parte de la cuerda descrita en la ecuación 5.9.

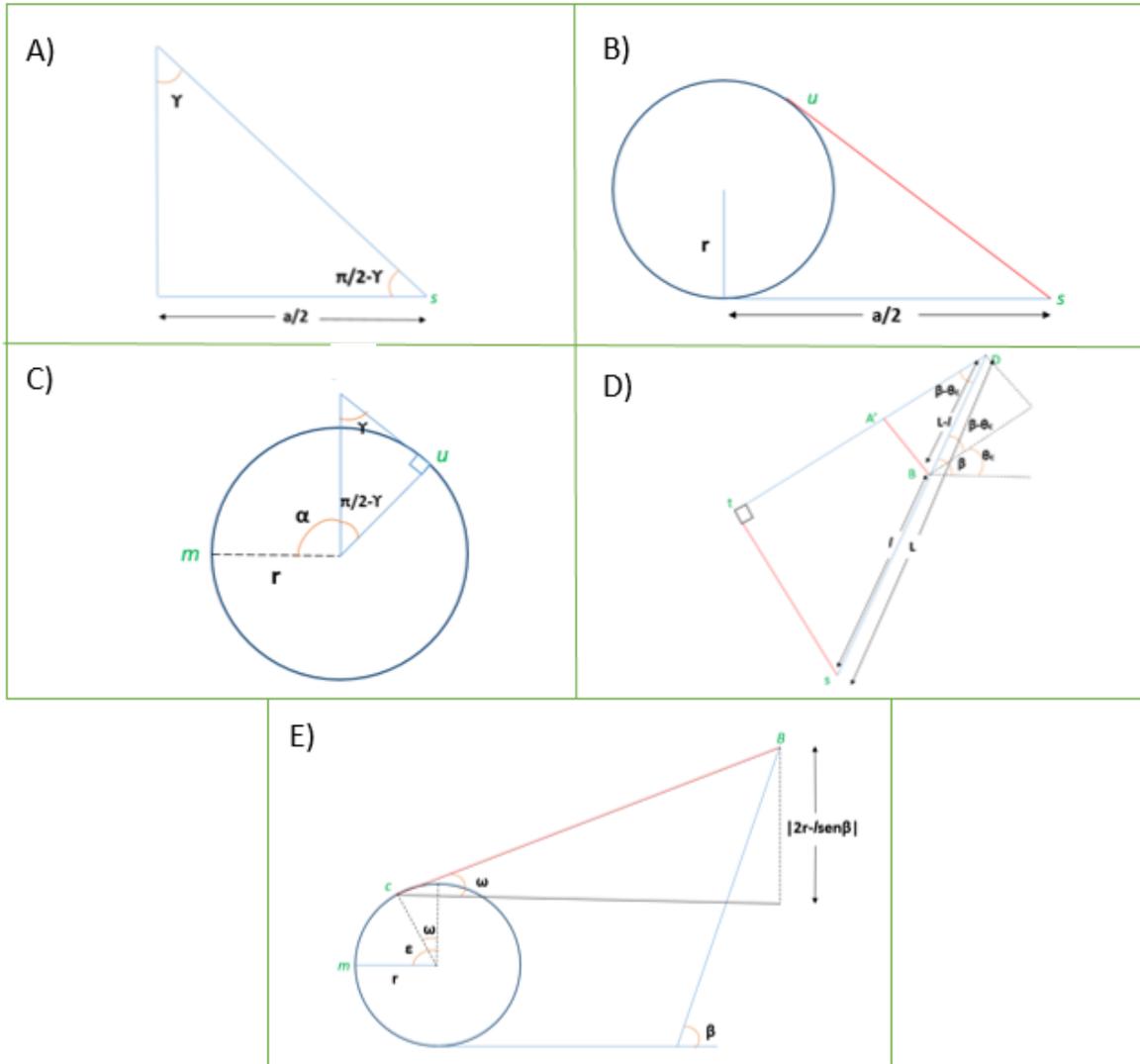


Figura 26. Ampliación de la figura 25 para la descripción geométrica de LCO. A) Triángulo para Calcular ts . B) Dibujo para calcular us . C) Dibujo para calcular el arco um . D) Triángulo para calcular AB . E) Dibujo para calcular cm .

El análisis de la LCO se realizó utilizando geometría básica, además se puede demostrar de forma geométrica que $\gamma = \vartheta_c$. El resultado fue el siguiente:

$$\begin{aligned} \Delta L(l) = & \frac{a}{2\cos(\frac{\pi}{2} - \theta_c)} + \frac{a}{2} + r(\pi - \theta_c) - (L - l)\text{sen}(\beta - \theta_c) \\ & - \sqrt{\left(\frac{a}{2} + l\cos(\beta)\right)^2 + (l\text{sen}(\beta) - r)^2 - r^2} - r\left(\frac{\pi}{2} \right. \\ & \left. - \text{arcosen}\left(\frac{2r - l\text{sen}(\beta)}{BC}\right)\right). \end{aligned} \quad (5.10)$$

Por la definición de diferencia de fase:

$$\phi(l) = \frac{2\pi n}{\lambda} \Delta L(l), \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} \phi(l) = k \left(\frac{a}{2\cos(\frac{\pi}{2} - \theta_c)} + \frac{a}{2} - r\theta_c - (L - l)\text{sen}(\beta - \theta_c) \right. \\ \left. - \sqrt{\left(\frac{a}{2} + l\cos(\beta)\right)^2 + (l\text{sen}(\beta) - r)^2 - r^2} \right. \\ \left. + \text{arcosen}\left(\frac{2r - l\text{sen}(\beta)}{BC}\right) + \frac{r\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (5.12)$$

Se pudo obtener una ecuación que describiera el perfil de fase para un MT a partir del método de cuerdas. La ecuación 5.12, es la primera ecuación presentada como un perfil de fase de un metaconcentrador tubular, ésta ecuación no ha sido reportada en la literatura. Podría esperarse que éste perfil de fase sea parecido a la forma de un espejo de un concentrador tubular convencional.

5.4 Metalente convencional

Con el propósito de comprobar la validez del método de cuerdas en el análisis de metaconcentradores se propuso analizar una metalente enfocadora convencional utilizando dicho método. El perfil de fase de una metalente se ha reportado en múltiples artículos importantes en las ramas de la nanotecnología y la metaóptica, en donde se deduce a partir de la ley de refracción para la metasuperficie.

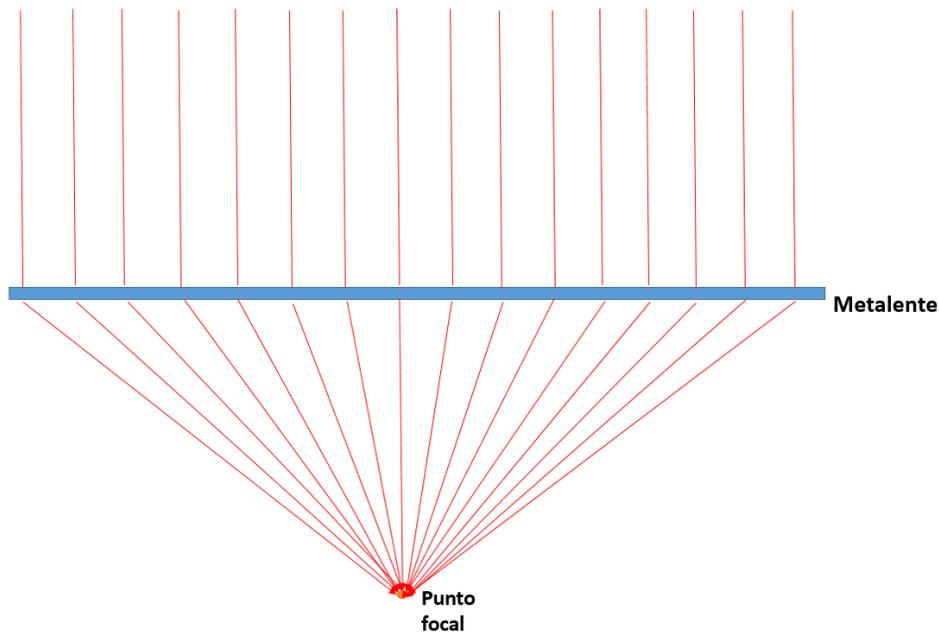


Figura 27. Representación de una metalente simple enfocando un haz de rayos de luz.

La figura 28 describe la elección de las dos cuerdas en la metalente para incidencia normal (ángulo de incidencia cero). Una cuerda pasa por el centro de la metalente y la otra cuerda pasa por un punto a una distancia r del centro. Se le incide un frente de onda el cual es refractado hacia el punto focal. La letra r representa la distancia radial respecto al centro de la metalente, f es la distancia

focal y l_0 hace referencia a la longitud de cuerda que va de un punto en la posición radial r al punto focal.

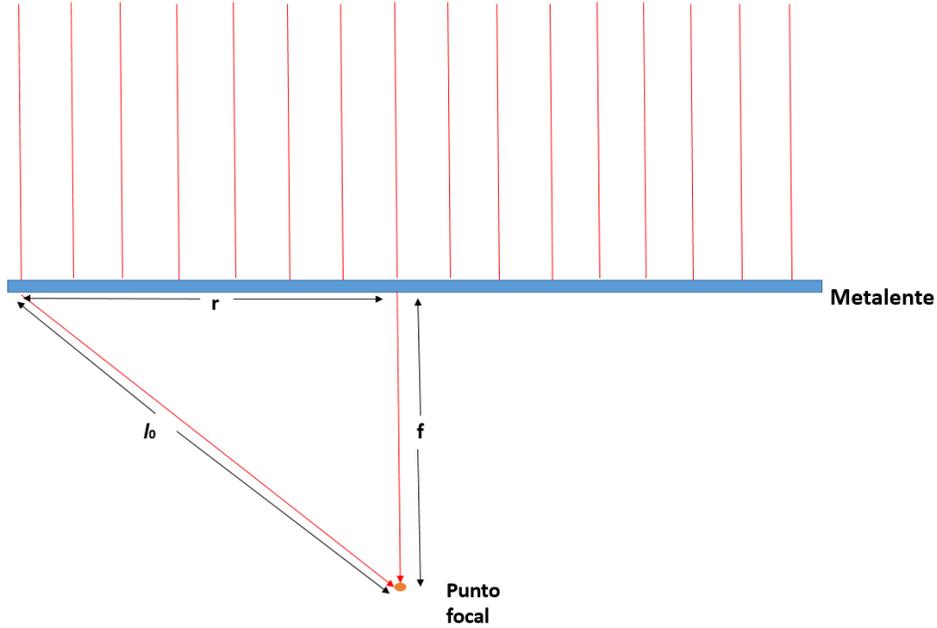


Figura 28. Elección de las dos cuerdas en la metalente para el análisis a partir del método de cuerdas.

El cálculo del perfil de fase para la metalente simple se logra definiendo la ecuación de igualdad de LCO's. Esta ecuación iguala la LCO de la cuerda que pasa por la metalente a una distancia radial r con la de la cuerda que pasa por el punto central de la metalente, que son mostrados en la Figura 28. La ecuación resultante es:

$$l_0 + L_{eff}(r) = f + L_{eff}(0), \quad (5.13)$$

en donde la diferencia de LCO's es:

$$\Delta L(r) = L_{eff}(0) - L_{eff}(r), \quad (5.14)$$

$$\Delta L(r) = f - l_0. \quad (5.15)$$

La figura 29 muestra un triángulo para el análisis geométrico de la ecuación 5.15:

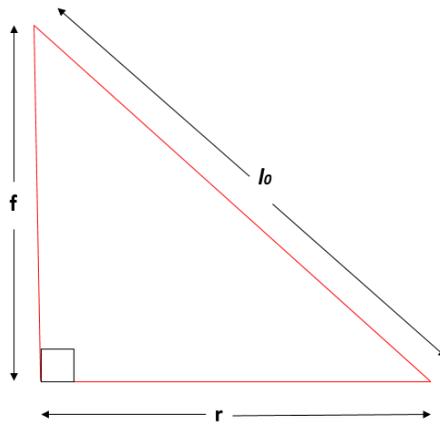


Figura 29. Triángulo usado para el análisis geométrico del LCO.

$$\Delta L(r) = f - \sqrt{r^2 + f^2}. \quad (5.16)$$

Por definición de la fase:

$$\phi(r) = k\Delta L(r) = \frac{2\pi n}{\lambda} \Delta L(r), \quad (5.17)$$

$$\phi(r) = -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{r^2 + f^2} - f) = -k (\sqrt{r^2 + f^2} - f). \quad (5.18)$$

La ecuación 5.18 representa el perfil de fase para una metalente normal. Esta ecuación es igual a la reportada anteriormente en gran parte de la bibliografía referente a metalentes. Sin duda alguna se muestra la eficiencia del método de cuerdas en el análisis de estos dispositivos.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Experimento análogo: modelo tipo maqueta

El método de cuerdas considera los rayos de luz como cuerdas, las cuales deben tener igual longitud desde el frente de onda hasta el punto donde se enfocan. Para lo cual existe un experimento análogo, en el que se consideran cuerdas reales en una maqueta, sujetando las cuerdas a planos y puntos de referencia, y restringiendo la longitud de las cuerdas. Realizar un modelo tipo maqueta análogo a los metaconcentradores tiene el propósito de comprobar la teoría desarrollada en el capítulo anterior, y además permite visualizar de mejor manera cómo funciona el método de cuerdas en metaconcentradores planos.

El modelo tipo maqueta se construyó usando una base de madera, clavos y cadena (en lugar de cuerda). La base se realizó utilizando madera tipo MDF (Medium Density Fibreboard por sus siglas en inglés) de 6 mm de grosor, en donde se colocaron dos maderas de MDF más pequeñas de 24 cm de largo y de 3mm de ancho (las cuales representarían el frente de onda y las metasuperficies). A cada una de estas dos maderas pequeñas se le clavaron 10 clavos en una línea recta, con una separación de 2 cm. Estas maderas tuvieron el propósito de que la cuerda tuviera más soporte a la hora de la medición, y asegurar que se encontraran paralelas en todas las mediciones, para cada uno de los clavos. En un inicio se usó hilo de diferentes tipos para representar la cuerda, pero se tuvo el problema del alargamiento del hilo con la tensión. Para evitar este error de medición se optó por usar una cadena metálica como cuerda, la cual tenía eslabones cuya medida del eslabón era de 0.5 cm.

Para el metaconcentrador compuesto y el metaconcentrador simple todas las cuerdas se concentran en un mismo punto después de pasar por la metasuperficie. El metaconcentrador compuesto y metaconcentrador tubular concentran toda la luz que incide en un rango angular, limitado por el ángulo de aceptación. Este ángulo y otros parámetros considerados para el experimento se muestran en las Tablas 1-3

6.1.1 Maqueta análoga al MC

El modelo tipo maqueta se construyó con la misma geometría que el MC, usando materiales caseros (Figura 30A). Un extremo de la cuerda se fijó en el lugar indicado como el punto de enfoque, el otro extremo permanece libre con el propósito de mover la cuerda a través de diferentes puntos de la metasuperficie y el frente de onda. Para realizar las mediciones correspondientes se tomó en cuenta que la cuerda debe permanecer perpendicular al frente de onda, para hacer que esto se cumpla, a cada clavo que hay en el frente de onda le corresponde un clavo en la metalente. Los parámetros para realizar este modelo tipo maqueta se presentan la Tabla.

La Figura 30B, representa cómo se comporta la cuerda en el modelo tipo maqueta. Podemos observar que al recorrer la cuerda sobre la metalente (de abajo hacia arriba) la cuerda se acorta, formando una parábola invertida, la cual representará el perfil de fase para este modelo. La orilla superior de las cuerdas describe la línea punteada en la figura 30B, esto es debido a que las cuerdas tienen igual longitud. En teoría, la curva descrita por la línea punteada debe tener la misma forma que el perfil de fase del MC análogo. En la Figura, la curva descrita por la línea punteada se exageró con el propósito de mostrarla mejor.

Característica descriptiva		Valor
Longitud de la cuerda		77.5 cm
Base del concentrador, a (Distancia entre el foco y metalente)		29.4 cm
Ángulo de inclinación del Frente de Onda, θ_c		35°
Ángulo de inclinación de la Metalente, β		60°
Longitud de las tablas que representan el frente de Onda w_1 y la Metalente L		24 cm

Tabla 1. Valores usados para la fabricación del modelo tipo maqueta, análogo al MC de la Figura 22.

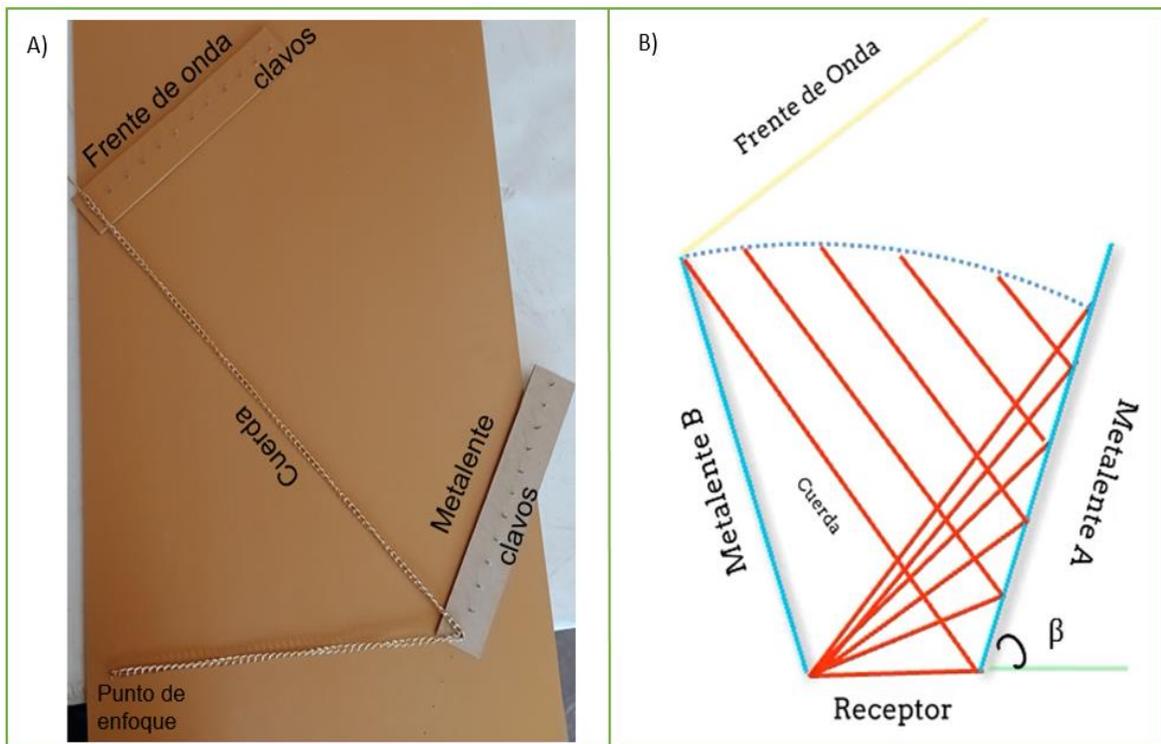


Figura 30. Experimento análogo al MC A) Modelo tipo maqueta. B) Comportamiento de la cuerda en el modelo tipo maqueta. Una orilla de las cuerdas (color rojo) está sujeto al punto de enfoque. La otra orilla de las cuerdas está sobre la línea punteada, ya que las cuerdas tienen igual longitud.

6.1.2 Maqueta análoga al MT

Para el modelo tipo maqueta del MT además de las características generales de fabricación que se mencionaron anteriormente, se utilizó un cilindro de madera dura como análogo del receptor tubular de un radio de 3 cm. Se eligió este material para evitar la deformación del cilindro al estirar la cuerda (Figura 31A)).

En éste modelo se colocó un extremo de la cuerda en el punto guía (Ver Figura 31B). Este punto está sobre el receptor tubular, en una posición angular de $\pi/2$ respecto al punto superior del círculo. El punto guía representa un punto de referencia, de tal manera que al desenrollarse la cuerda, ésta dibuje una línea recta tangente al cilindro. En los concentradores tubulares se elige el punto de referencia donde mejor convenga para que su análisis sea más sencillo, se recomienda utilizar como referencia los puntos en π , $\pi/2$ o $\pi/4$). El otro extremo de la cuerda permaneció libre con el propósito de poder mover la cuerda en diferentes puntos del frente de onda y por ende de la metalente. Para realizar las mediciones correspondientes se tomó en cuenta que la cuerda debe permanecer perpendicular al frente de onda, para hacer que esto se cumpla, a cada clavo que hay en el frente de onda, le corresponderá un clavo en la metalente. Los parámetros para construir el modelo tipo maqueta se presentan en la Tabla 2.

Característica descriptiva	Valor
Longitud de la cuerda	88 cm
Base del concentrador (Distancia entre el receptor y metalente, $a/2-r$)	32 cm
Ángulo de inclinación del Frente de Onda, θ_c	35°
Ángulo de inclinación de la Metalente, β	60°
Longitud de las tablas que representan el frente de Onda w_1 y la Metalente L	24 cm

Tabla 2. Valores usados para la fabricación del modelo tipo maqueta, análogo al MT de la Figura 24.

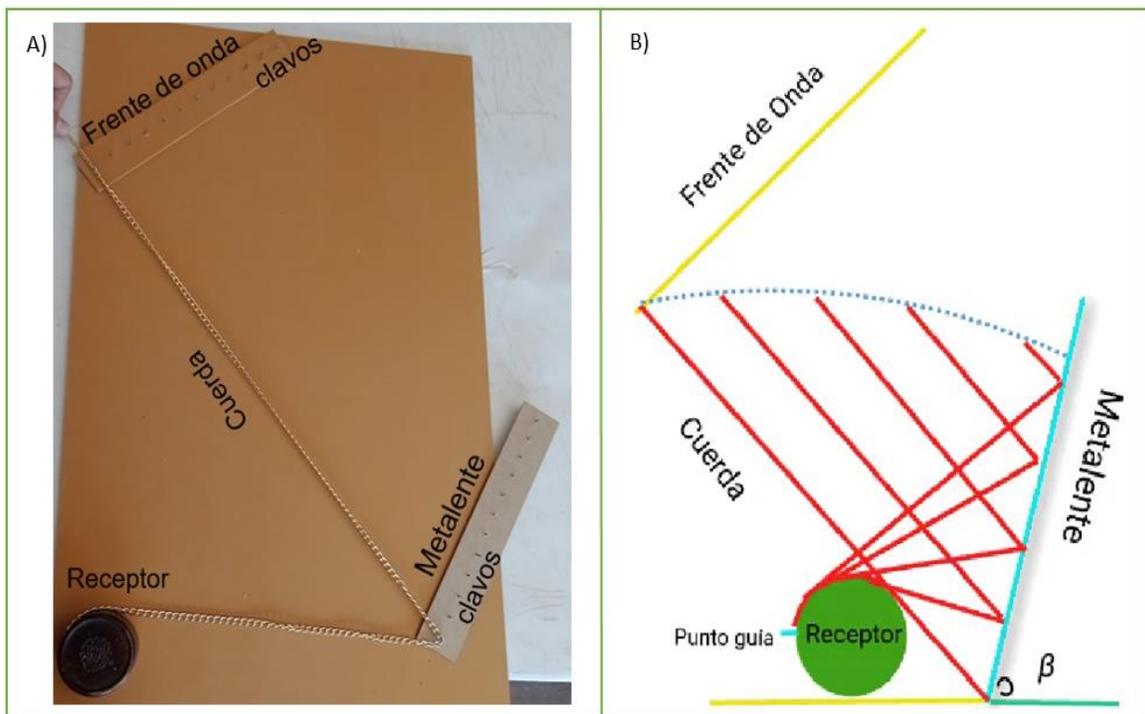


Figura 31. Experimento análogo al MT A) Modelo tipo maqueta. B) Comportamiento de la cuerda en el modelo tipo maqueta que muestra una orilla de las cuerdas (color rojo) sujeta al punto guía. La otra orilla de las cuerdas está sobre la línea punteada, ya que las cuerdas tienen igual longitud.

La Figura 31B muestra el perfil dibujado por la cuerda, curva punteada, cuya forma debe ser igual al perfil de fase del MT análogo. La curva punteada se debe al aumento de la distancia desde el frente de onda hasta el punto guía al desplazar la cuerda por diferentes puntos de la metalente. Por lo tanto la orilla superior de las cuerdas tienen igual longitud. En la Figura, la curva descrita por la línea punteada se exageró con el propósito de mostrar mejor la variación de cuerda a cuerda.

6.1.3 Maqueta análoga al metalente simple

Con el propósito de ampliar el entendimiento del método de cuerdas con metalentes y metasuperficies, se añadió el análisis del modelo de maqueta análogo al metalente normal. Para este modelo se colocó un extremo de la cuerda en lo que sería el punto focal (Figura 32A). El otro extremo de la cuerda que se encontraba libre, se estiró con la precaución de que ésta cruzara por el clavo en la metalente y por su correspondiente clavo en el frente de onda. Se tomó en consideración que la cuerda permaneciera perpendicular al frente de onda (Figura 32). En la Tabla 3 se muestran los parámetros de construcción para este modelo.

Característica descriptiva	Valor
Longitud de la cuerda	45.7 cm
Distancia focal	21.5 cm
Ángulo de inclinación del Frente de Onda	0°
Ángulo de inclinación de la Metalente	0°
Longitud de las tablas que representan el frente de Onda y la Metalente	24 cm

Tabla 3. Valores usados para la fabricación del modelo tipo maqueta, análogo a la metalente simple.

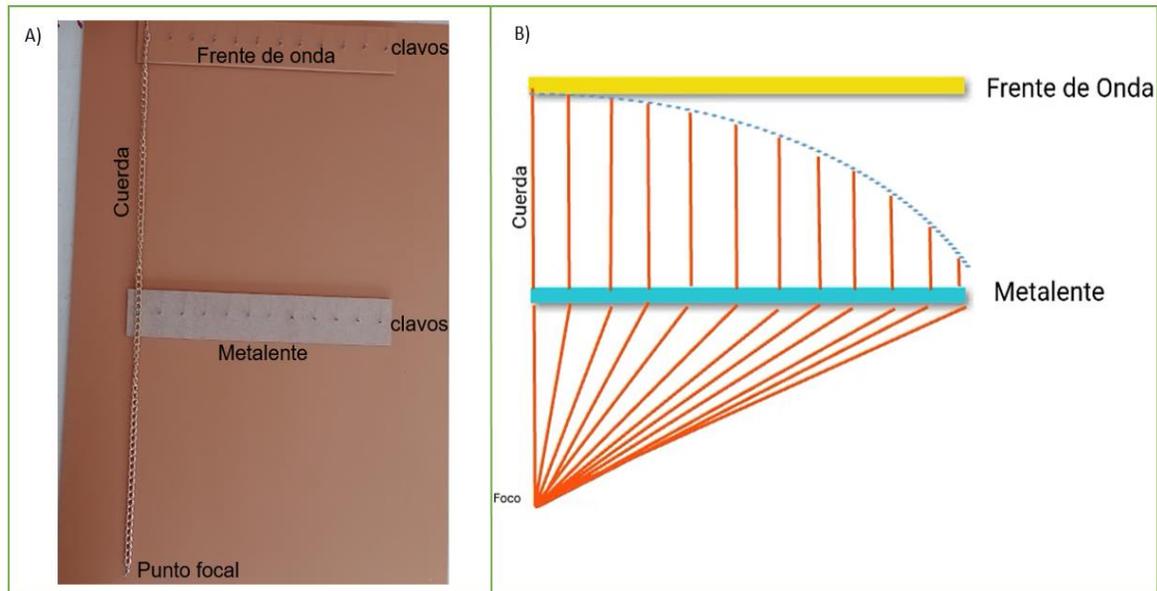


Figura 32. Experimento análogo al metalente simple A) Modelo tipo maqueta. B) Comportamiento de la cuerda en el modelo tipo maqueta, que muestra una orilla de las cuerdas (color rojo) sujeta al punto focal. La otra orilla de las cuerdas esta sobre la línea punteada, ya que las cuerdas tienen igual longitud.

De igual manera a las maquetas anteriores, debido al aumento de la longitud de la trayectoria al recorrer cada punto de la metalente, desde el frente de onda al punto focal, la orilla de la cuerda describe una curva, línea punteada en la figura 32B. Este perfil en teoría debe ser igual en forma que el dado por la Ecuación (1.1).

El perfil dibujado por cada metaconcentrador, hace referencia a la forma de la lente o espejo que se utiliza en el concentrador convencional análogo a cada metaconcentrador. A continuación, se analiza la semejanza de entre el perfil de fase en el modelo teórico y en el modelo análogo tipo maqueta.

6.2 Relación modelo teórico y análogo tipo maqueta

Como una forma de comprobación de los perfiles de fase calculados en el capítulo 5, se graficaron las mediciones del experimento del modelo tipo maqueta

y los valores calculados con el modelo teórico. Las mediciones que se tomaron del experimento tipo maqueta fueron las de distancia del frente de onda a la curva punteada (Figuras 30B, 31B y 32B). Para realizar las gráficas comparativas, en el modelo teórico se utilizaron los mismos datos que en el experimento tipo maqueta (Tablas 1, 2, 3).

En las Figuras 33, 34 y 35 se muestran las gráficas comparativas del perfil de fase para cada metaconcentrador y para la metalente simple. Para realizar las gráficas se utilizó el programa Origin y se calculó el error de medición correspondiente a cada una de las maquetas.

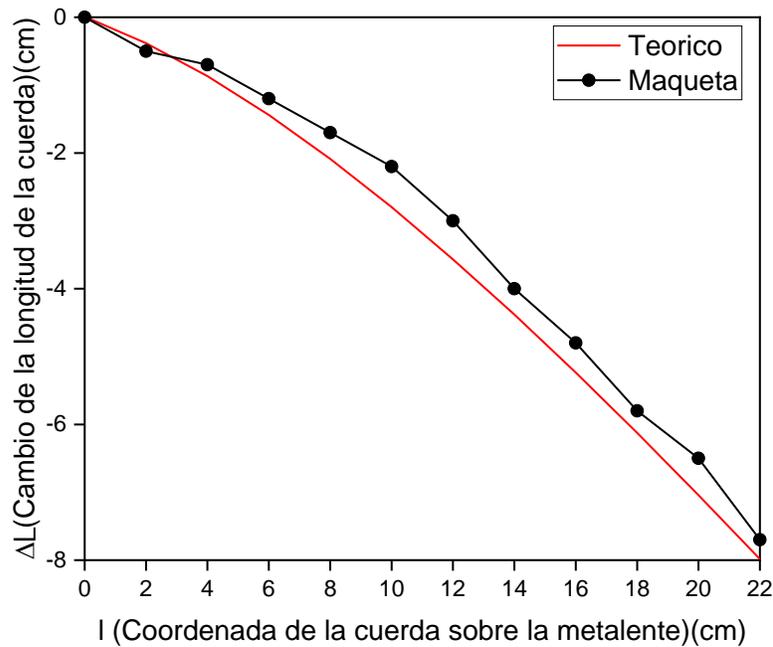


Figura 33. Metaconcentrador MC. Gráfica comparativa entre el modelo tipo teórico (línea roja) y modelo análogo tipo maqueta (línea negra). El análisis arrojó un error de ± 0.41 cm.

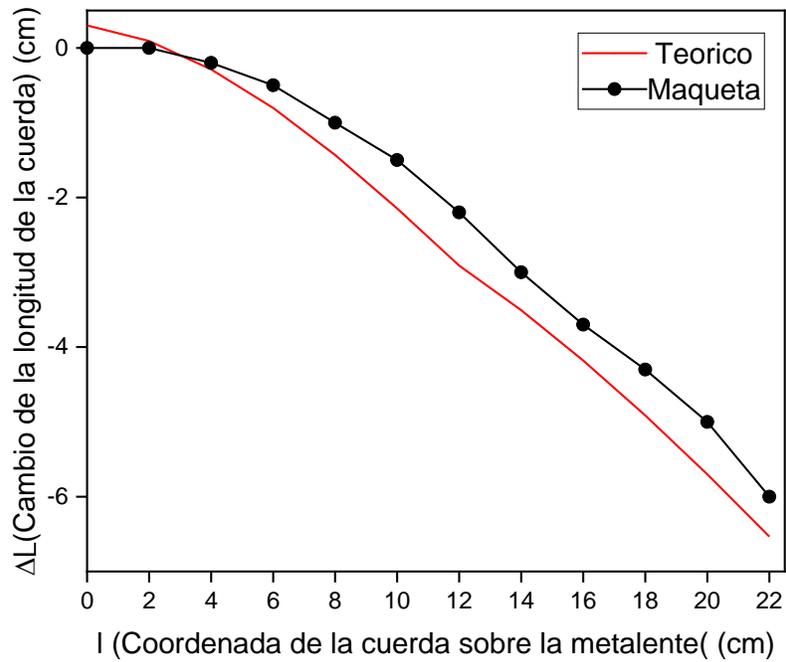


Figura 34. Metaconcentrador MT. Gráfica comparativa entre el modelo tipo teórico (línea roja) y modelo análogo tipo maqueta (línea negra). El análisis arrojó un error de ± 0.74 cm.

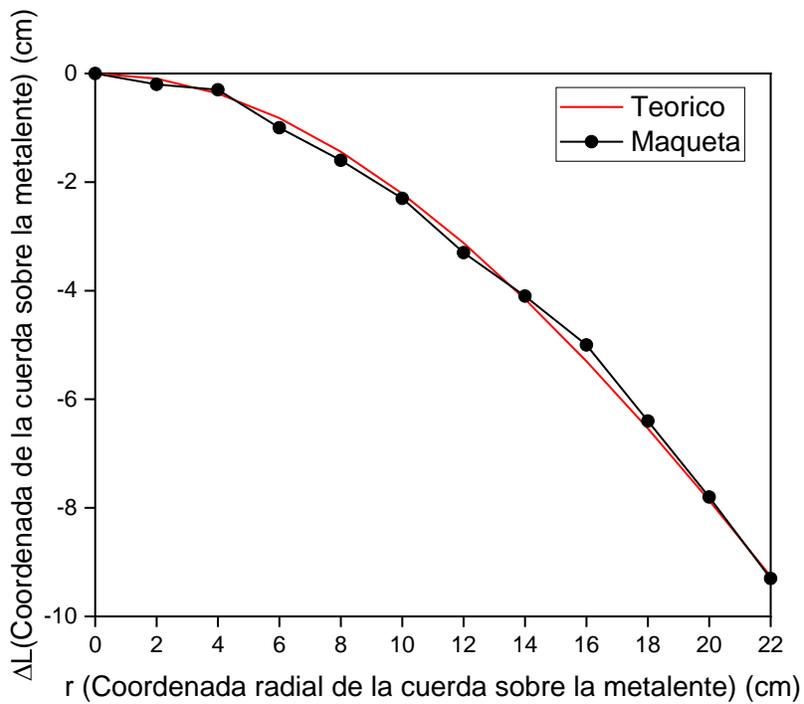


Figura 35. Metalente simple. Gráfica comparativa entre el modelo tipo teórico (línea roja) y modelo análogo tipo maqueta (línea negra). El análisis arrojó un error de ± 0.16 cm.

De las Figuras 33-35 se observa un comportamiento similar del perfil de fase en los tres casos analizados. Las diferencias entre las gráficas se deben a errores de medición, por ejemplo: la separación entre los clavos, la longitud de las tablas pequeñas, el alargamiento de la cuerda o que la cuerda estuviera perfectamente perpendicular al frente de onda.

Es importante hacer notar, que es sencillo modificar la forma del perfil de fase en los modelos teóricos mediante el cambio de los valores que se encuentran en las tablas 1,2 y 3. Sin embargo, es complicado hacer ese tipo de cambios en los modelos análogos tipo maqueta, el cambiar esos parámetros implica cambios en la construcción de las maquetas y un tamaño, forma y peso diferentes. Por ejemplo, para el MT, con los valores empleados se obtuvo una curva invertida con forma suave, sin embargo, si se grafican más puntos y para otros ángulos de inclinación tanto del frente de onda como de la metalente, o si se modifica el radio del receptor cilíndrico en el modelo teórico se pueden obtener fácilmente la forma de una involuta (Una involuta es la curva evolvente del círculo, es una curva con forma de caracol, cuyas normales son tangentes de la circunferencia, se puede trazar cuando un hilo tenso o un cable se desenrollan de una rueda circular y sus puntos describen la evolvente de la circunferencia) [59,60], esta es la forma tradicional de un concentrador tubular convencional, sin embargo hacer esos cambios en la maqueta requieren más clavos, una cuerda más larga, una base más grande y más precisión en las mediciones experimentales. Para demostrar de manera teórica la validez del método de cuerdas en metasuperficies y en específico de las ecuaciones obtenidas en el Capítulo 5, procedemos a realizar un análisis de trazo de rayos para los tres casos analizados en la siguiente sección.

6.3 Trazo de rayos

El trazado de rayos es el proceso de determinar gráficamente la trayectoria de la luz después de la refracción a través de una lente o sistema óptico, y es útil para desarrollar una intuición sólida sobre la óptica de las lentes, así como para

verificar cálculos y diseño óptico del sistema [61]. El trazado de rayos de espejo es similar al trazado de rayos de lente ya que se utilizan rayos paralelos al eje óptico y a través del punto focal [62].

Dibujar las trayectorias de los rayos de luz individuales puede ser una forma útil de visualizar el comportamiento de la luz al interactuar con lentes y espejos. El uso de la ley de reflexión y la ley de refracción de Snell nos permite calcular la dirección en la que viajarán los rayos de luz y dibujarlos en un diagrama de rayos [63].

Para el análisis de trazo de rayos en los metaconcentradores se toma en cuenta la Ley de Snell generalizada (Ecs. 1.3 y 1.4), la cual se puede considerar su forma 1D, en función de la derivada del perfil de fase respecto a la distancia l :

$$\frac{1}{k_0} \frac{d\Phi}{dl} = n_2 \text{sen}\theta_2 - n_1 \text{sen}\theta_1. \quad (6.1)$$

Esta ley se usa principalmente en el análisis de trazo de rayos para metalentes formadoras de imagen, ya que existe una transmisión de los rayos a través de la metalente, sin embargo si nosotros modificamos la ubicación de los rayos en otros parámetros geométricos del sistema en el programa utilizado para la proyección de estas figuras, es posible graficar los rayos incidentes en la metasuperficie y propagar los rayos reflejados hasta el receptor del metaconcentrador.

Al realizar las derivadas correspondientes a cada metaconcentrador y graficando todos los rayos de luz, obtenemos las siguientes figuras. La Figura 36 muestra el diagrama de rayos para el MC. Para este trazo de rayos se usaron los parámetros $a = 5\text{cm}$, $\vartheta_c = 60^\circ$ y $\beta = 45^\circ$.

Para realizar este trazo de rayos, se tomó como origen de coordenadas el punto O de la Figura 22. La Figura 36 demuestra que todos los rayos incidentes del frente de onda de borde, después de ser reflejados se concentran en el punto

esquina del receptor, como se predijo en el análisis del capítulo 5 por medio del método de cuerdas. Este punto de enfoque representaría el punto donde se coloca fijamente uno de los extremos de nuestra cuerda, este punto permanece fijo mientras que el otro se mueve perpendicularmente sobre nuestro frente de onda. El rectángulo azul representa nuestro metaespejo y la base representa el receptor que va del punto de enfoque a la esquina del metaespejo (metasuperficie o metalente). Los rayos en color verde representan los rayos incidentes provenientes del frente de onda. Al hablar en términos del método de cuerdas, los puntos de intersección entre los rayos verdes y amarillos (sobre el metaespejo) representan los puntos por donde pasa la cuerda.

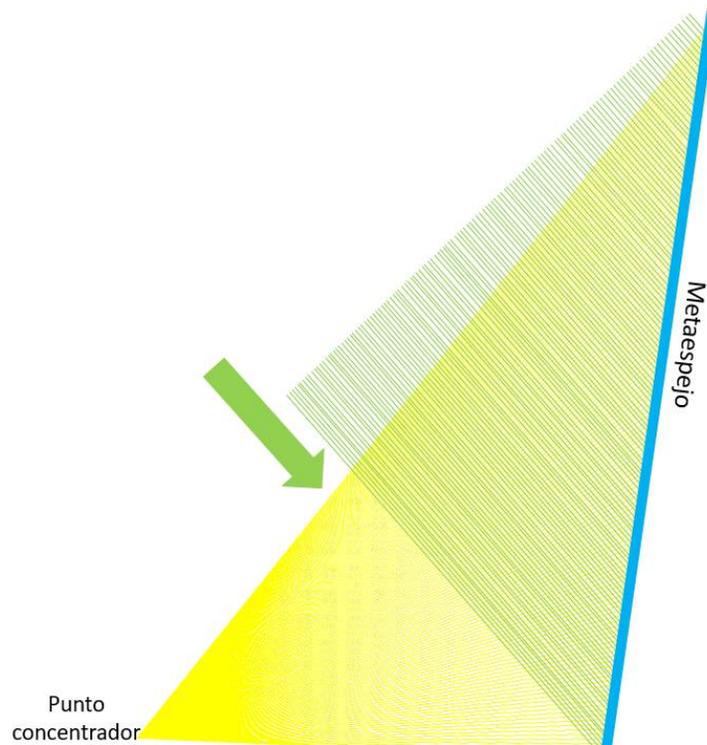


Figura 36. Diagrama de trazo de rayos en el MC.

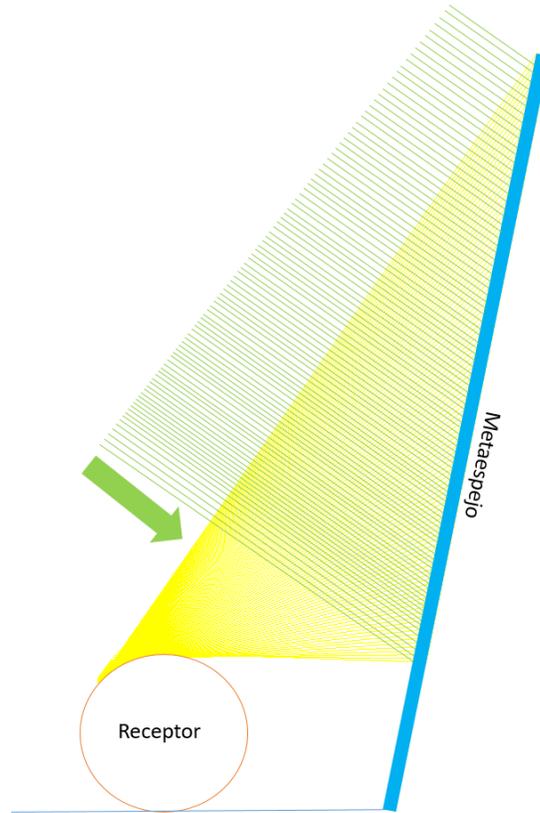


Figura 37. Diagrama de trazo de rayos en el MT.

La Figura 37 muestra el trazo de rayos para el MT. El rectángulo azul representa un metaespejo y el círculo de color rojo representa el receptor en forma cilíndrica, se muestra que los rayos pasan tangente sobre el perímetro del receptor formando lo que se denomina una caústica, formada por los puntos de intersección en el receptor de los rayos reflejados por el metaespejo. La figura comprobó lo supuesto en el capítulo 5 referente al metaconcentrador tubular analizado por el método de cuerdas, al modificar los datos de inclinación del ángulo del frente de onda, así como del metaespejo, además del radio del concentrador circular, es posible observar los cambios de la caústica. El análisis del método de cuerdas se da al posicionar y fijar un extremo de la cuerda en el perímetro del cilindro donde comienzan los rayos amarillos, y el otro permanecerá libre moviéndose perpendicularmente sobre nuestro frente de onda, los rayos verdes

representan los rayos incidentes del frente de onda. La intersección entre los rayos verdes y amarillos representa la posición en donde nuestra cuerda se encuentra tensionada en el metaespejo. Los parámetros de los valores utilizados para realizar el trazo de rayos presentado en la figura 37 fueron: $a=12\text{cm}$, $r=2.5\text{cm}$, $L=22\text{cm}$, $\vartheta_c=50^\circ$ y $\theta=75^\circ$.

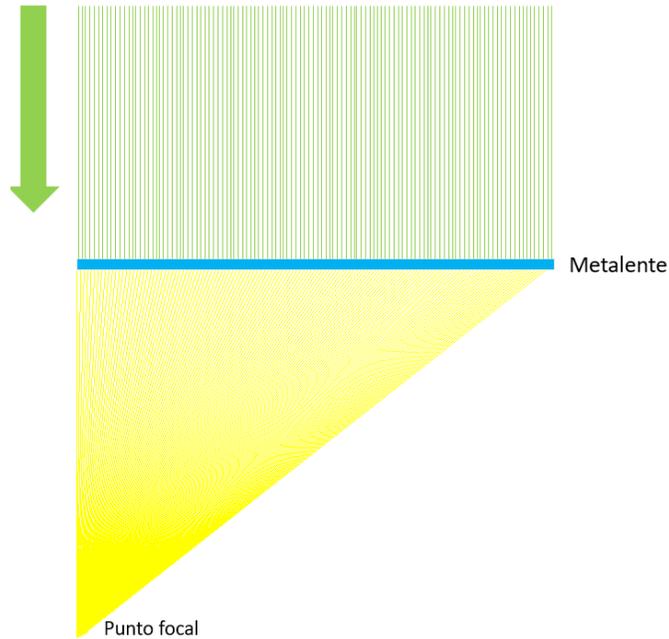


Figura 38. Diagrama de trazo de rayos en una metalente simple.

La Figura 38 representa el trazo de rayos para una metalente convencional. El rectángulo azul representa la metalente y los rayos verdes indican los rayos incidentes provenientes de un frente de onda plano. El origen de coordenadas en dicha figura se realizó a la mitad de la metalente, justo arriba de donde se encuentra el foco (Figura 30). Se puede observar que los rayos transmitidos después de que el frente de onda incide en la metalente se concentran en un mismo punto denominado punto focal. Los parámetros de los valores utilizados para realizar el trazo de rayos presentado en la figura 37 fueron: $f=5\text{cm}$, $\vartheta_c=0^\circ$ y $\theta=0^\circ$.

El trazo de rayos realizado (en el software Origin) nos demuestra que las ecuaciones del perfil de fase para nuestros metaconcentradores son correctas debido a que los rayos de luz se concentran de la manera esperada según la literatura especializada. En nuestro trazo de rayos usamos el principio de rayos de borde, uno de los principios que describe al método de cuerdas, el cual menciona que para realizar un análisis de la concentración de radiación en un concentrador convencional, es suficiente con analizar los rayos de borde, que inciden con una inclinación tal que la luz se concentra en el borde del receptor.

Capítulo 7

Conclusiones

Se mostró cómo usar el método de cuerdas para diseñar metalentes o metaespejos en sistemas concentradores de luz, es decir metaconcentradores. Se comprobó que el método de cuerdas es un método útil para el análisis y diseño de los metaconcentradores compuesto y tubular, además de que sirve para el análisis de una metalente convencional. Se adaptó éste método cambiando características específicas como la longitud de la cuerda (mientras que en el método de cuerdas para concentradores de iluminación convencionales la cuerda permanece constante, en los metaconcentradores la cuerda del método cambia al recorrer la metasuperficie), integrándola en el análisis como un cambio en la longitud de camino óptico.

Se obtuvieron los perfiles de fase al seguir los pasos adecuados en el método de cuerdas para cada metaconcentrador, estos perfiles sirven como una analogía a la forma 3D de un espejo convencional, así pues, es posible implementar los metaconcentradores a partir de dicho perfil de fase.

Para mostrar la validez del método de cuerdas, se realizó el experimento análogo, en el que se consideraron cuerdas reales en una maqueta, sujetando las cuerdas a planos o puntos de referencia, y registrando el cambio de longitud de la cuerda. Los modelos tipo maquetas y el trazo de rayos arrojaron resultados similares, los cuales indican que las ecuaciones presentadas como el perfil de fase para los metaconcentradores son válidas. Utilizando los mismos datos de análisis, el modelo tipo maqueta presenta un comportamiento similar con el modelo teórico. Como trabajo futuro se puede analizar la parte de la cuerda que va del punto de enfoque al metaespejo (rayos de reflexión) y buscar la relación (si la hay) con la forma del espejo o lente refractiva análoga (concentrador convencional). Por ejemplo, el concentrador parabólico compuesto tiene una forma de parábola

inclinada afuera del foco, y encontrar la relación de forma con el perfil de fase de su metaanalogo, el metaconcentrador compuesto.

Así pues, se concluye que el método de cuerdas es un método básico, geométrico y sencillo para el análisis de concentradores de iluminación que utilizan metalentes o metaespejos en lugar de espejos normales, abriendo las puertas al análisis y diseño de los metaconcentradores en la rama de metaóptica de iluminación.

En conclusión, podemos afirmar que el método de cuerdas además de ser uno de los métodos más básicos y útiles en concentradores convencionales, también se puede utilizar con confianza en metaconcentradores siguiendo los pasos propuestos en el Capítulo 5 y tomando en cuenta las modificaciones al método.

En éste trabajo de investigación se muestra una de las bases para el análisis y diseño de metaconcentradores o de metalentes de iluminación, continuando con aportaciones en diferentes ramas de la metaóptica y en la evolución de dispositivos ópticos y fotónicos avanzados.

7.1 Perspectiva o trabajo futuro

La perspectiva del trabajo es realizar una publicación en una revista de alto impacto sobre la adaptación del método de cuerdas en estos tres metaconcentradores, destacando las modificaciones realizadas al método convencional para lentes tradicionales, esto con el propósito de analizar cualquier tipo de metaconcentrador por esta vía.

En general se planea seguir analizando los diferentes métodos tradicionales, pero ahora implementándolos en metaconcentradores, y así sentar las bases para la NIO utilizando metalentes.

Bibliografía

- [1] J. ENGELBERG Y U. LEVY “*The advantages of metalenses over diffractive lenses*”. Nat. commun Vol. 11, 2020.
- [2] M. KHORASANINEJAD Y F. CAPASSO “*Metalenses: Versatile multifunctional photonic components*”. Science Vol. 358, 2017.
- [3] S. M WANG ET AL. “*A broadband achromatic metalens in the visible*”. Nat. Nanotechnol Vol.13, 2018, págs. 227–232.
- [4] P. GENEVET, F. CAPASSO, F. AIETA, M. KHORASANINEJAD, R. DEVLIN “*Recent advances in planar optics: From plasmonic to dielectric metasurfaces*”. Optica Vol. 4, 2017, págs. 139–152.
- [5] W. HADIBRATA, H. WEI, S. KRISHNASWAMY Y K. AYDIN “*Inverse Design and 3D Printing of a Metalens on an Optical Fiber Tip for Direct Laser Lithography*”. Nano Lett. Vol. 21, 2021.
- [6] N. YU, P. GENEVET, M.A. KATS, F. AIETA, J.P. TETIENNE, F. CAPASSO Y Z. GABURRO “*Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction*”. Science Vol. 334, 2011.
- [7] Y. ZHANG, Y. FU, C. MA, B. YANG Y. ZHAO “*Research on Fabrication Techniques and Focusing Characteristics of Metalens*”. Coatings Vol.12, 2022.
- [8] M. MIYATA, N. NEMOTO, K. SHIKAMA, F. KOBAYASHI Y T. HASHIMOTO “*Full-color-sorting metalenses for high-sensitivity image sensors*”. Optica Vol. 8, 2021.
- [9] J. C. BASILIO-ORTIZ Y I. MORENO “*Multilayer dielectric metalens*”. Opt. Lett. Vol. 47, 2022.

BIBLIOGRAFÍA

- [10] G. PALERMO, A. LININGER, A. GUGLIELMELLI, L. RICCIARDI, G. NICOLETTA, A. DE LUCA, J.S PARK, S. WEI, D. LIM, M. L. MERETSKA, F. CAPASSO Y G. STRANGI “*All-Optical tunability of metalenses infiltrated with liquid crystals*”. ACS Nano Vol. 16, 2022.
- [11] G. STRANGI Y F. CAPASSO “*Improving the Metalens with Liquid Crystal*”. Lab Manager, 2020.
- [12] I. MORENO, M. AVENDAÑO-ALEJO, AND C. P. CASTAÑEDA-ALMANZA “*Nonimaging metaoptics*”. Opt. Lett. Vol. 45, 2020.
- [13] B. LI, W. PIYAWATTANAMETHA Y Z QIU “*Metalens-based miniaturized optical systems*”. Micromachine Vol. 10, págs. 1-21, 2019.
- [14] F. CHENG, L. QUI, D. NIKOLOV, A. BAUER, J. P. ROLLAND, Y A. N. VAMIVAKAS “*Mechanically tunable focusing metamirror in the visible*”. Opt. express Vol. 27, 2019.
- [15] F. AIETA, P. GENEVET, N. F. YU, M. A. KATS, Z. GABURRO, Y F. CAPASSO, “*Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities*”. Nano Lett. Vol.12, 2012.
- [16] C. P. CASTANEDA-ALMANZA AND I. MORENO “*Ray tracing in metasurfaces*”. Opt. Contin. Vol. 1, 2022.
- [17] H. HSIAO, C. HUNG CHU, Y D. PING TSAI, “*Fundamentals and Applications of Metasurfaces*”. Advanced Science News Vol. 1, págs.1-21, 2017.
- [18] T. LI, “*New opportunities for metalenses in imaging applications*”. Science China Physics, Mechanics & Astronomy Vol. 63, págs. 1-3, 2020.
- [19] X. LUO “*Engineering Optics 2.0 A Revolution. A Revolution in Optical Theories, Materials, Devices and Systems*”. Springer, 2019.

BIBLIOGRAFÍA

- [20] N. YU Y F. CAPASSO “*Flat optics with designer metasurfaces*”, Nat. Mater., Vol. 13, 2014.
- [21] K. OGANDO Y H. PASTORIZA “*Metasuperficies nanoestructuradas para la integración de elementos ópticos en sistemas microfabricados*”. Tesis Doctoral, Argentina: Instituto Balseiro Universidad Nacional de Cuyo Comisión Nacional de Energía Atómica Argentina, pág. 64, 2015.
- [22] J. A. PAULSON, F. CAPASSO “*Metalens with artificial muscle*”. News Harvard 2021.
- [23] E. ARBABI, A. ARBABI, S. M. KAMALI, Y. HORIE Y A. FARAON “*Controlling the sign of chromatic dispersion in diffractive optics with dielectric metasurfaces*”. Optica Vol. 4, 2017.
- [24] B. WANG, F. DONG, Q. LI, D. YANG, C. SUN, J. CHEN, Z. SONG, L. XU, W. CHU, Y. XIAO, Q. GONG, Y. LI “*Visible-Frequency Dielectric Metasurfaces for Multiwavelength Achromatic and Highly Dispersive Holograms*”. Nano Lett. Vol.16, 2016.
- [25] T. MING LUN, H. HUI-HSIN, C. CHENG HUNG, C. MU KU, G. SUN, L. AI-QUN, Y T. DING PING “*Metalenses: Advances and Applications*”. Adv. Opt. Mater. Vol. 1, 2018.
- [26] F. AIETA, M.A. KATS, P.E GENEVET Y F. CAPASSO, “*Multiwavelength achromatic mbtasurfaces by dispersive phase compensation*”. Science Vol. 347, 2018.
- [27] G. RUI Y Q. ZHAN, “*Tailoring optical complex fields with nano-metallic surfaces*”. Nanophotonics Vol.4, 2014.
- [28] I. MORENO “*Metalentes: Nanotecnología óptica*”. eek Vol.8, 2019.

BIBLIOGRAFÍA

- [29] N. YU Y F. CAPASSO “*Optical Metasurfaces and Prospect of Their Applications Including Fiber Optics*”. J. Ligh. Technol. Vol. 33, págs. 1-6, 2015.
- [30] T. GISSIBL, S. THIELE, A. HERKOMMER Y H. GIESSEN “*Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives*”. Nat. Photonics Vol. 10, 2016.
- [31] S. SORGATO, J. CHAVES, H. THIENPONT, AND F. DUERR “*Design of illumination optics with extended sources based on wavefront tailoring*”. Optica Vol. 6, 2019.
- [32] L. HSU, M. DUPRÉ, A. NDAO, AND B. KANTE “*Efficient design of random metasurfaces*”. Optics Lett. Vol. 43, 2018.
- [33] F. CHENG, L. QUI, D. NIKOLOV, A. BAUER, J. P. ROLLAND, Y A. N. VAMIVAKAS “*Mechanically tunable focusing metamirror in the visible*”. Opt. Express Vol. 27, 2019.
- [34] H. F. YANG, A. Z. JIN, Q. LUO, J. J. LI, C. Z. GU Y Z. CUI “*Electron beam lithography of HSQ/PMMA bilayer resists for negative tone lift-off process*”. Microelectron. Eng. Vol. 85, págs. 5-6, 2008.
- [35] H. S. EE Y R. AGARWAL “*Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate*”. Nano Lett. Vol. 16, 2016.
- [36] “*Nonimaging Optics*”: https://hmong.es/wiki/Nonimaging_optics (Consulta: 23/05/2023).
- [37] J. CHAVEZ “*Introduction to nonimaging optics*”. CRC Press Taylor & Francis Group, págs. 3-115.

BIBLIOGRAFÍA

- [38] A. ÁLVAREZ FERNÁNDEZ-BALBUENA “*Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar*”. Tesis Doctoral, España: Universidad Complutense de Madrid, Escuela Universitaria de Óptica, págs. 13-53, 2011.
- [39] R. WINSTON, J. C. MIÑANO Y P. BENÍTEZ “*Nonimaging Optics*”. Elsevier Academic Press, 2005.
- [40] R. WINSTON, L. JIANG, AND M. RICKETTS “*Nonimaging optics: a tutorial*”. Adv. Opt. Photon Vol.10, 2018.
- [41] H. RIES Y A. RABL “*Edge-ray principle of nonimaging optics*”. J. Opt. Soc. Am. A Vol. 11, 1994.
- [42] J. C. MIÑANO “Two-dimensional nonimaging concentrators with inhomogeneous media: a new look”. J. Opt. Soc. Am. A Vol. 11, 1985.
- [43] J. C. MIÑANO AND J. C. GONZALEZ “*New method of design of nonimaging concentrators*”. Appl. Opt. Vol. 16, 1992.
- [44] P. A. DAVIES “*Edge-ray principle of nonimaging optics*”. J. Opt. Soc. Am. A Vol. 11, 1994.
- [45] P. BENÍTEZ “*Conceptos avanzados de óptica anidólica: diseño y fabricación*”. Tesis Doctoral, España: Universidad Politécnica de Madrid, 1998.
- [46] D. BIOSCA ROJAS Y M. HERNÁNDEZ SANZ “*Diseño y análisis de un dispositivo óptico de cobertura para IR-WLAN por SMS en tres dimensiones*”. Revista Cubana de Ingeniería Vol. 1, 2010.
- [47] F. CORRENTE, P. BENÍTEZ, W. LIN, J. C. MIÑANO Y F. MUÑOZ “*SMS design and aberrations theory*”. Optical Systems Design Vol. 8550, 2012.

BIBLIOGRAFÍA

- [48] J. C. MIÑANO, P. BENÍTEZ, W. LIN, J. INFANTE, F. MUÑOZ Y A. SANTAMARÍA “*An application of the SMS method for imaging designs*” Opt. Express Vol. 17, 2009.
- [49] “*Método de construcción de cadena simple para concentradores de rayos de borde a la medida en energía solar de flujo máximo coleccionistas*”. 2014.
- [50] D. CHEMISANA VILLEGAS “*Diseño y caracterización de un concentrador térmico fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica*”. Tesis Doctoral, España: Universidad de Lleida, Área de Física Aplicada, págs. 24-37, 2009.
- [51] R. ESPINOSA GONZALEZ “*Diseño y construcción de un evaporador solar para la obtención de miel de agave*”. Tesis de Maestría, México: Universidad Autónoma de la Ciudad de México, págs. 21-23. 2018.
- [52] S. TAPIA S. Y J.A. DEL RÍO P. “*Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica*”. Revista Mexicana de Física Vol. 55, 2009.
- [53] J. M. Gordon “*Simple string construction method for tailored edgeray concentrators in maximum-flux solar energy collectors*”. Pergamon, Solar Energy Vol. 56, 1996.
- [54] J.A. AGUILAR-JIMÉNEZ, N. VELÁZQUEZ, R. LÓPEZ-ZAVALA, A. ACUÑA, F. CASTELLANOS-BALDERAS Y J. ÁLVAREZ “*Estudio experimental de concentradores solares tipo CPC bajo orientación norte-sur y este-oeste*”. Researchgate, 2016.
- [55] W. AJBAR “*Sistema de concentradores solares de canal parabólico para la generación de calor de proceso: diseño, construcción y modelado matemático*”. Tesis de Maestría, México: Universidad Autónoma del Estado de Morelos Instituto de investigación en ciencias básicas y aplicadas, págs. 26-78, 2018.

BIBLIOGRAFÍA

[56] A. RABL, J. O'GALLAGHER Y R. WINSTON “*Design and test of non-evacuated solar collectors with compound parabolic concentrators*”. Pergamont Solar Energy Vol. 25, 1980.

[57] M. TERRÓN HERNANDEZ “*Estudio Téorico experimental de un receptor de calor con aletas acoplado a un concentrador parabólico compuesto*”. Tesis Doctoral, México: Centro de Investigación Científica de Yucatán, Posgrado en Ciencias Renovables, págs. 9-40, 2018.

[58] MICHAEL CHENG “*About importing and simulating a phase profile of a DOE lens*”. Zemax company.

[59] ARTURO GEOMETRÍA Video: “*Envolvente de una circunferencia*”
<https://www.youtube.com/watch?v=pyhNIDGQ0o0> (Consulta: 5/09/2023)

[60] M. AVENDAÑO-ALEJO, I. MORENO, AND L. CASTAÑEDA “*Caustics caused by multiple reflections on a circular surface*”. Am. J. Phys., Vol. 78, 2010.

[61] “*Ray tracing of thin lenses*”.
http://optcampus.opti.vision/cecourse.php?url=ray_tracing/ (Consulta: 24/05/2023).

[62] “*Mirror Ray Tracing*”.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geoopt/mirray.html> (Consulta: 24/05/2023).

[63] “*Ray Tracing Mirrors*”.
<https://www.studysmarter.co.uk/explanations/physics/wavesphysics/ray-tracing-mirrors/> (Consulta: 24/05/2023).