



Desarrollo de una máquina talladora de lentes Fresnel circulares

Jeferson Alexander Monroy

Cód.: 20451824521

Neyver Alexander Achury Torres

Cód.: 21131422398

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2023

Desarrollo de una máquina talladora de lentes Fresnel circulares

Jeferson Alexander Monroy
Cód.: 20451824521
Neyver Alexander Achury Torres
Cód.: 21131422398

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Ingeniero Mecánico

Director (a):

PhD. Carlos Ramón Batista Rodríguez

Línea de Investigación:

Desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable

Grupo de Investigación:

REM

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
_____, Cumple
con los requisitos para optar
Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Tunja, 2023

Contenido

	Pág.
Introducción	1
1. Marco referencial	7
1.1 Estado del arte.....	7
1.2 Marco teórico.....	15
1.2.1 Energía Solar fotovoltaica	16
1.2.2 Sistemas fotovoltaicos de concentración de energía	17
1.2.3 Colectores solares	18
1.2.4 Lentes concentradores	21
1.2.5 Reflector Fresnel de Foco Lineal.....	23
1.2.6 Concentrador Solar con lente Fresnel.....	23
1.2.7 Aplicaciones y desarrollo de captación Fresnel	25
1.2.8 Ventajas del uso de captadores tipo Fresnel.....	27
1.2.9 Lentes circulares de Fresnel	28
2. Diseño conceptual del prototipo	30
2.1 Requerimientos técnicos para el diseño.....	31
2.2 Principios de mecanismos y funcionamiento del prototipo	32
2.3 Cálculos estructurales	36
2.4 Modelado y diseño del prototipo	39
3. Ensamble y puesta en marcha el prototipo de herramienta.....	48
3.1 Proceso de elaboración de máquina talladora.....	48
4. Análisis de los resultados obtenidos respecto a la funcionalidad de la máquina talladora de lentes Fresnel circulares	64
4.1 Pruebas de funcionamiento del prototipo construido para el tallado de lentes Fresnel circulares.....	64
Conclusiones.....	69
Recomendaciones.....	70
Referencias Bibliográficas	70
Anexos.....	75

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Concentración de la radiación.....	18
Figura 2. Colector parabólico	20
Figura 3. Colectores de disco parabólico.....	21
Figura 4. Concentrador solar con lente de Fresnel	22
Figura 5. Lente Fresnel (1) y convencional (2). Funcionamiento original Fresnel	23
Figura 6. Lente Fresnel real [óptica del concentrador].....	24
Figura 7. Captador Fresnel (Solar Praxis)	25
Figura 8. Prototipo vertical y Prototipo funcionando.....	26
Figura 9. Lente acrílica óptica de concentrador solar Fresnel con 4 matrices energía verde ...	28
Figura 10. Imagen de lente Fresnel Circular	29
Figura 11. Bosquejo del eje con cargas de torción	36
Figura 12. Diseño de la estructura base	39
Figura 13 . Despiece	39
Figura 14. Diseño e estructura AutoCAD	40
Figura 15. Varilla trapezoidal roscada.....	41
Figura 16. Especificaciones técnicas chumacera.....	42
Figura 17. Diseño de la estructura base con la varilla roscada unida.....	42
Figura 18. Chumacera kp10 rodamiento inferior	43
Figura 19. Diseño estructural con los soportes inferiores chumacera y soporte	43
Figura 20. Cabezal soporte del eje.....	43
Figura 21. Plano general.....	44
Figura 22. Despiece porta vuriles	45
Figura 23. Diseño PDF prototipo completo	46
Figura 24. Modelado prototipo (vista frontal y de perfil)	46
Figura 25. Modelado de la máquina terminada	46
Figura 26. Modelo de Corte eficiente de la lámina acrílica.....	47
Figura 27. Perfil para la base del prototipo	48
Figura 28. Estructura base	49
Figura 29. Base circular de Alucobon	50
Figura 30. Herramienta de corte buril	50
Figura 31. Varilla roscada trapezoidal.....	51
Figura 32. Chumacera.....	51
Figura 33. Fijación y acople de la varilla y chumaceras a la estructura	52
Figura 34. Fijación de Soporte	53
Figura 35. Soportes engranes, corona.....	53
Figura 36. Fijación del piñón a la base.....	54
Figura 37. Ensamble base del alucobon con engrane.....	54

Figura 38. Fijación piñón pequeño	55
Figura 39. Fijación de la varilla con chumacera.....	56
Figura 40. Fijación de la base del repuesto de pulidora para soportar varilla	56
Figura 41. Perilla	57
Figura 42. Corte de la estructura	57
Figura 43. Vista frontal de la varilla ensamblada en la estructura	58
Figura 44. Manivela.....	58
Figura 45. Molde de la pieza porta buriles	59
Figura 46. Cuadrante de presión del buril	59
Figura 47. Buje de la varilla acoplada a la porta buriles	60
Figura 48. Ensamble de partes para la herramienta de corte	60
Figura 49. Ensamble de la pieza en la estructura del prototipo.....	60
Figura 50. Prototipo de máquina para corte de lentes Fresnel circulares terminada	61
Figura 51. Prueba de corte de lámina de acrílico	64
Figura 52. Primeros cortes de acrílico	65
Figura 53. Corte para aplicar agua como refrigerante	65
Figura 54. Corte al centro de la lámina de acrílico.....	66
Figura 55. Corte por error en ubicación del buril	67
Figura 56. Lente Fresnel terminada.....	67

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Relación de potencia.....	35
Tabla 2. Especificaciones del material	40
Tabla 3. Costos de materiales y procesos	62

Resumen

La necesidad apremiante de impulsar diferentes fuentes de energías renovables, entre ellas la energía solar térmica, conlleva a plantear una solución de ingeniería a la problemática para elaborar una lente Fresnel capaz de aprovechar la luz solar en múltiples usos y a bajo costo. La siguiente investigación presenta el desarrollo de un prototipo de máquina capaz de tallar lentes Fresnel circulares a bajo costo y de buena calidad, implementando mecanismos y técnicas completamente manuales para su funcionamiento y con materiales accesibles en el mercado nacional. La metodología aplicada es de tipo experimental e investigativo con perfil exploratorio, ya que permite obtener datos confiables para futuros estudios. En la fase de diseño se presenta una guía para la construcción de la máquina, con el modelado y diseño que fueron realizados con la herramienta Solid Edge y el programa de diseño AutoCAD respectivamente, se determinaron los diferentes mecanismos de la máquina y los materiales y herramientas que se utilizaron para la construcción del prototipo. Los resultados muestran una máquina elaborada en un 95% de metal y aleaciones, solo la perilla es de material plástico y la base de alucobond, que es una composición de láminas de aluminio que la hace liviana; el resto de componentes son metálicos y con eso se logró un buen peso y buena estabilidad. Por otro lado, la fabricación de la lente Fresnel, evidencia una superficie lisa y características óptimas; respecto al tiempo de elaboración de esa pieza fue de 3 horas 50 minutos, la herramienta de corte no presenta desgaste y la máquina no presentó problemas ni fallas en su uso. Se concluye que el prototipo de máquina manual construido para el corte de lentes Fresnel circulares permite el fácil acceso a soluciones de ingeniería que generen el aprovechamiento de energías renovables en múltiples usos y a bajo costo.

Palabras Clave: Prototipo, Lentes Fresnel, energía renovable, fotovoltaica, precisión, acrílico, acero.

Abstract

The pressing need to promote different sources of renewable energy, including solar thermal energy, leads to proposing an engineering solution to the problem to develop a Fresnel lens capable of taking advantage of sunlight in multiple uses and at low cost. The following investigation presents the development of a prototype machine capable of carving circular Fresnel lenses at low cost and of good quality, implementing completely manual mechanisms and techniques for its operation and with materials accessible in the national market. The applied methodology is of an experimental and investigative type with an exploratory profile, since it allows obtaining reliable data for future studies. In the design phase, a guide for the construction of the machine is presented, with the modeling and design that were carried out with the Solid Edge tool and the AutoCAD design program respectively, the different mechanisms of the machine and the materials and tools were determined. used for the construction of the prototype. The results show a machine made of 95% metal and alloys, only the knob is made of plastic and the base is made of alucobond, which is a composition of aluminum sheets that makes it light; the rest of the components are metallic and with that a good weight and good stability was achieved. On the other hand, the manufacture of the Fresnel lens shows a smooth surface and optimal characteristics; Regarding the elaboration time of this piece, it was 3 hours 50 minutes, the cutting tool does not present wear and the machine did not present problems or failures in its use. It is concluded that the prototype of a manual machine built for cutting circular Fresnel lenses allows easy access to engineering solutions that generate the use of renewable energy in multiple uses and at low cost.

Keywords: Prototype, Fresnel lenses, renewable energy, photovoltaic, precision, acrylic, steel.

Introducción

El cambio climático representa uno de los principales desafíos de la humanidad de cara a la sostenibilidad del desarrollo de la sociedad. El Mundo necesita un nuevo modelo de crecimiento sostenible, seguro, duradero y beneficioso para todos; reconociendo que el desarrollo sostenible, el acceso universal a la energía, y la seguridad energética son críticas para compartir la prosperidad y el futuro del planeta. Para garantizar y fomentar las energías sin impacto ambiental, sostenibles y de acceso universal, y beneficiarse del sol como fuente energética, la energía termo solar jugará un papel importante para acelerar la transición entre los combustibles fósiles y nucleares hacia fuentes energéticas renovables (Coco, 2017).

En los últimos 50 años se han desarrollado diferentes tecnologías para aprovechar la energía solar térmica, entre las que se destacan los concentradores por reflexión; canales parabólicos; discos parabólicos; parabólicos compuestos; lentes Fresnel, Lineales y circulares. Con estos captadores solares se podrían cubrir demandas de energía térmica de procesos a temperaturas de hasta 400°C, suministrando casi el 50 % del consumo de energía en el sector industrial (Villar, 2018).

El interés creciente por la energía solar térmica en la última década, ha hecho que se desarrollen numerosos proyectos de esta índole, en la gran mayoría a pequeña escala y de carácter experimental. En 2016, existían unos 160 sistemas de energía solar térmica en todo el mundo, con una capacidad total de 100 MWth (140600 m²), lo que no corresponde ni al 1 % de la energía térmica total consumida en el mundo. No obstante, son una buena demostración de la viabilidad de estas tecnologías e indican que hay un gran potencial de desarrollo tanto a nivel de mercado como tecnológico. Por ejemplo, en los países de la Unión Europea el 28 % de la demanda total de energía corresponde al sector industrial, la mayoría de la cual implica procesos

a temperaturas inferiores a los 250 °C en los que se podría incorporar energía solar térmica a baja y media temperatura (Villar, 2018).

En Colombia los procesos de generación eléctrica empleados para el suministro y abastecimiento de energía día a día son más novedosos y de menor impacto para el planeta; teniendo en cuenta que, en el país, cerca de un millón de familias carecen del servicio de energía eléctrica, la energía solar fotovoltaica aparece como una alternativa a esta problemática. Colombia cuenta con un recurso solar (radiación) promedio uniforme durante el año para todo el territorio del orden de 4,5 kWh/m² (Gómez, 2018). Este escenario es propicio para la implementación de sistemas de generación termo solar, debido a que estos pueden alcanzar altas temperaturas en el medio de trabajo. Sin embargo, las pérdidas por radiación en el receptor son proporcionales a la cuarta potencia de la diferencia de temperatura entre ella y el medio ambiente, es decir, su rendimiento disminuye proporcionalmente al área de la superficie absorbente (Vizcay, 2020).

La necesidad apremiante de impulsar las diferentes fuentes de energías renovables, entre ellas la energía solar térmica, conlleva a plantear soluciones de ingeniería a la problemática a través de la elaboración de lentes Fresnel capaces de aprovechar la luz solar en múltiples usos. Los contornos de una lente Fresnel son capaces de refractar individualmente superficies, doblar los rayos de luz paralelos y enfocarlos en una distancia focal común. Tiene muchas ventajas como su peso, son de polímeros livianos y acrílicos diversos, materiales que permitan enfocar la luz de la misma manera o mejor que una lente convencional (UniverseOptical.Com., s.f). También la lente Fresnel es una buena solución para una imagen de calidad y eficiencia a un costo significativamente menor y generalmente se usa para corregir la aberración esférica (E-Tay Industrial co., ltd. s.f.).

Planteamiento del Problema

Debido a la gran importancia de implementar energías renovables y garantizar la máxima disponibilidad de herramientas pertinentes, se hace necesaria la creación y fabricación de productos de fácil acceso y de buena calidad como las lentes Fresnel; que aunque son poco conocidos comercialmente, son una alternativa a la generación de energía fotovoltaica

Para la creación de una nueva y eficiente herramienta, la lente Fresnel debe someterse a una serie de procesos en los cuales el material utilizado será transformado. Así, el acrílico es sometido a un proceso de sujeción, luego debe ser transportado por un sistema de elevación hasta la herramienta de corte que permite tallar este material en la forma adecuada, con el fin de conformar un lente liviano y con bajo costo de fabricación. Cuando este material entra en la máquina, se debe tener en cuenta establecer la presión adecuada para que no tenga movilidad al momento de realizar el tallado y no se fracture por la compresión, para que no presente desperfectos que arruinen la calidad del producto.

Por las anteriores razones, es necesaria la implementación de un sistema capaz de controlar la presión generada por las prensas o tornillos de sujeción; ya que una presión muy baja no permitiría que la herramienta de corte realice un buen trabajo. Por otro lado, una presión demasiado alta provocaría la pérdida del producto, pues este podría fisurarse o quebrarse en el proceso, ocasionando fallas y riesgos, tanto para los manipuladores de la máquina como para quienes desean observar el proceso más de cerca.

A partir de lo anterior surge el siguiente interrogante: ¿Cómo construir una máquina mecánica talladora de lentes Fresnel a bajo costo?

Para resolver este cuestionamiento se propone diseñar y construir un prototipo de máquina de corte para lentes Fresnel aprovechando el conocimiento adquirido en el programa

de ingeniería de la Universidad Antonio Nariño Sede Tunja, utilizando acrílico como materia prima, para lograr un producto eficaz y de bajo costo.

El proceso consiste en diseñar y elaborar una máquina mecánica accionada manualmente con estructura en acero que mediante una serie de mecanismos realice un corte preciso y con las características adecuadas de una lente Fresnel en material acrílico que permita el aprovechamiento de la energía solar, concentrándose en un punto capaz de alcanzar temperaturas elevadas y usarlas en numerosas aplicaciones como concentradores solares, proyectores de luz y linternas de faros entre otros.

Con la elaboración de lentes Fresnel en el prototipo de máquina talladora se pretende aprovechar las energías renovables de una mejor manera y también desarrollar mecanismos que permitan minimizar costos en su fabricación, ya que en la actualidad estas lentes son muy costosas en el mercado.

También la puesta en funcionamiento del prototipo generará beneficio a la comunidad estudiantil de la universidad, ya que será aprovechada como un espacio para prácticas y futuras investigaciones, lo mismo que para ampliar el conocimiento en estas áreas de la ingeniería.

Para tal fin se diseñó y construyó una máquina mecánica con estructura metálica cien por ciento manual apta para realizar cortes finos en láminas de acrílico mediante un control de precisión y confiabilidad. Asimismo presión en los elementos de sujeción de los moldes de acrílico que permitan obtener un nuevo producto de buena calidad; teniendo en cuenta las características de durabilidad, maleabilidad que permiten condiciones de corte para alcanzar temperaturas altas y así lograr el aprovechamiento de la energía solar.

Objetivos

El objetivo general de la investigación es “Diseñar y construir una máquina mecánica talladora de lentes Fresnel circulares”; y como objetivos específicos se establecieron:

1. Determinar los requerimientos técnicos para el diseño del prototipo (materiales, componentes, mecanismos de funcionamiento y diseño conceptual).
2. Ensamblar y poner en marcha el prototipo de herramienta.
3. Realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo construido para el tallado de lentes Fresnel circulares.
4. Analizar los resultados obtenidos respecto a la funcionalidad de la máquina talladora de lentes Fresnel circulares.

Metodología

La metodología aplicada es de tipo experimental e investigativo, por tener como finalidad la manipulación de variables experimentales bajo condiciones controladas. También posee un perfil exploratorio, por realizarse con el propósito de obtener datos confiables que sirvan como base para estudios futuros.

Dentro del procedimiento para desarrollar el prototipo de máquina de tallado se contemplaron las siguientes fases: primero la búsqueda de información pertinente para efectuar el diseño de la máquina. En esta fase, se investigó sobre el proceso de tallado de un sistema adecuado de fabricación del lente Fresnel identificando esencialmente las características del acrílico, que es la materia prima a utilizar en el proyecto. Luego se hizo el diseño conceptual de posibles variables de la máquina, donde se analizaron, evaluaron y definieron aspectos de geometría (dimensiones), proceso de fabricación, selección de componentes y materiales, tanto de componentes estáticos (estructura), como de componentes dinámicos (mecanismos) de una

máquina. Posteriormente, se seleccionaron los parámetros y componentes para la construcción del prototipo de máquina. En la etapa de diseño se definieron las especificaciones técnicas para el desarrollo de la máquina como dimensiones de los componentes y herramientas a emplear en la construcción, lo mismo que sistemas de engranajes y demás mecanismos de accionamiento del prototipo de la máquina.

Para el ensamble se ejecutaron los resultados de la etapa de diseño (planos, especificaciones, manuales, etc.) y se realizaron los ajustes y pruebas necesarias para conseguir la funcionalidad deseada del prototipo. En la Fase de análisis de resultados y retroalimentación, se procedió a interpretar y analizar la información recogida, lo cual permitió establecer resultados esperados vs resultados encontrados, y luego, se hicieron ajustes pertinentes en el sistema de tallado y demás procesos comprendidos en la fabricación de lentes Fresnel circulares.

Resultados esperados

Con la realización de este proyecto se espera obtener una máquina talladora de lentes Fresnel circulares, mecánica con estructura en acero, cien por ciento manual, apta para sujetar con la debida presión los moldes de acrílico y realizar cortes finos, mediante un control preciso y confiable, para conseguir una lente Fresnel de 60 cm de diámetro, de buena calidad y a bajo costo.

1. Marco referencial

En este capítulo se presenta el estado del arte con algunas investigaciones relevantes sobre aspectos de la conversión de energía solar a través de una lente Fresnel, lo cual permite contextualizar la presente investigación; también se describen varios referentes teóricos donde se exponen aspectos y fundamentos sobre la temática abordada que permiten tener un punto de partida para el desarrollo del estudio.

1.1 Estado del arte

Se han realizado diversas investigaciones tanto a nivel científico como tecnológico que aportan al abordaje y desarrollo del prototipo de máquina talladora de lentes Fresnel. Algunas de las revisiones que expresan el estado del arte sobre la temática se presentan a continuación. Respecto a investigaciones sobre concentradores fotovoltaicos, el estudio "Concentrador fotovoltaico de alto rendimiento basado en Fresnel", elaborado por Benítez, et al, (2010) propone una óptica concentradora avanzada que comprende una lente de Fresnel y un elemento refractivo secundario, ambos con rotura rotacional simétrica, una óptica que produce tanto la concentración de luz deseada con alta tolerancia (elevado ángulo de aceptación) como una excelente luz de homogeneización por integración de Köhler.

Este concentrador contrasta con los concentradores CPV (*Concentrator Photovoltaics*) convencionales basados en Fresnel; ya que, para lograr costos competitivos para el sistema de producción en masa, es esencial que los concentradores de CPV incorporen suficientes tolerancias. El estudio concluye que el concentrador Fresnel Köhler es un dispositivo confiable y robusto de alto rendimiento que permite su producción gracias a su alta tolerancia y aspectos prácticos de fabricación. Esto significa que se pueden fabricar con las mismas técnicas (estampado en rollo continuo, estampado en caliente, moldeado por compresión, etc. para la

Primer elemento óptico; y moldeo de vidrio para el Segundo elemento óptico y que su costo de producción es esencialmente el mismo, pero su rendimiento óptico es mucho mejor.

También se estableció que el concentrador Fresnel Köhler es un excelente candidato para fabricar módulos CPV de alta concentración y bajo costo que combinan una eficiencia eléctrica muy alta a nivel de matriz (no solo a nivel de celda individual) con un ensamblaje e instalación rentables. Las soluciones de matrices de Köhler de forma libre no se limitan al concentrador FK actual. Incluso para la lente Fresnel plana como principal, se prevén múltiples opciones para futuras mejoras. La verdadera innovación en estos nuevos diseños es que son arreglos integradores Köhler de forma libre. Este grado de libertad permite el diseño de superficies ópticas que pueden realizar diferentes funciones al mismo tiempo (mejorando el rendimiento del dispositivo sin afectar su costo). Esto permite una buena uniformidad de irradiación y un alto ángulo de tolerancia a valores de concentración altos.

El artículo de Schult, et, al. (2009) presenta una opción atractiva para la comercialización de concentración de energía fotovoltaica con el uso de lente Fresnel para concentrar la luz solar en la celda solar. Los efectos de la temperatura sobre la eficiencia de las células solares son un tema bien conocido. Por el contrario, la influencia de las variaciones de temperatura durante el funcionamiento en la óptica del concentrador rara vez se ha discutido. Las simulaciones muestran que la temperatura puede tener una influencia no despreciable en el rendimiento de las lentes primarias dieléctricas.

La mayor parte de la investigación es sobre lente Fresnel para módulos Flatcon, pero los resultados pueden ser transferidos a muchos otros diseños que involucran Lente Fresnel.

Las lentes de los módulos fotovoltaicos de concentración son expuestas a un amplio rango de temperaturas. Dependiendo de la ubicación de la temperatura ambiente de la planta de energía

solar, las temperaturas pueden ir por debajo del punto de congelación en invierno y hasta más de 40°C en verano. La alta irradiación en verano aumenta la temperatura de concentración fotovoltaica en los módulos aún más. Los componentes ópticos refractivos son afectados por este cambio de temperatura principalmente de dos maneras: un cambio en el índice de refracción del material de la lente y una deformación del material y/o de la superficie de la lente debido a la expansión térmica. Estas simulaciones pueden ayudar no solo para optimizar la lente de Fresnel y la combinación del sistema de lente y celda solar para una máxima energía eléctrica de salida, sino simultáneamente para minimizar la temperatura térmica negativa efectos a un nivel de buen rendimiento.

En el estudio “Simulación y análisis de sistemas de seguimiento de control desde computador basado en geometría solar para concentración fotovoltaica en lentes Fresnel”, elaborado por Xie & Zhang (2011) se muestra que la celda solar de triple unión logró la mayor eficiencia; pero que los sistemas requieren concentración y un seguimiento preciso para mantener el foco de la luz en las células solares a medida que el sol se mueve a lo largo del día. El sistema de seguimiento se construyó con dos ejes accionados por motor con retroalimentación de sensor de ángulo. Los dos ángulos fueron determinados por las posiciones solares que se calculan a partir del algoritmo geométrico solar. El sistema de conducción fue de bucle cerrado con control PID (Controlador proporcional, integral y derivativo) para reducir los errores de salida del ángulo. Durante la simulación y la prueba, el rastreador ha sido validado por los conjuntos de datos de prueba. Con este sistema de seguimiento se podría mejorar la eficiencia de la celda solar de triple unión.

En Brasil, Militão Dib & Colafemina (2011) plantean un estudio para construir una plataforma de lentes Fresnel parabólicos diseñada y asistida por computadora. El objetivo fue

calcular, diseñar y reducir los errores de fabricación mediante un programa computacional que acelera el proceso de planificación. La teoría de Fresnel para lentes esféricas se cambió a una función esférica que da como resultado una forma cuadrada, para corregir las aberraciones esféricas de la imagen, de manera que la luz se enfocará solo en un punto. Este código llamado LF2010 está estructurado en tres partes. El primero: diseño de las dos formas básicas de lente Fresnel: altura constante y altura variable. El segundo proporciona gráficos de las funciones de transmisión de luz en esférico de Lente Fresnel y la tercera parte está intrínsecamente ligada a un software CAD que construye lente de Fresnel geométrica perfil en dos y tres dimensiones, suministrando adicionalmente los puntos generados por el mismo para fabricar un lente o un molde a través de un mecanizado de torno CNC. Para ello, el usuario deberá proporcionar los datos requeridos del proyecto, tales como: foco, material de índice de refracción, número de zonas, resolución y diámetro de apertura de la lente. Terminando con delineación experimental del estudio. Se concluyó que el espesor de la lente depende del número de zonas adoptadas, y la mejor lente que se produjo es la altura constante, porque esta era más pequeña en volumen en comparación con la altura variable, ya que colaboró para desvanecer el retraso del frente de onda. Los resultados mostraron que los límites del software dependerán de la potencia directamente desde la computadora del usuario y puede alcanzar una resolución infinita y un número de zonas de lente Fresnel.

Por otro lado, C. Martín Macareno, A. J. Gallego, M. Robledo, E. F Camacho (2011) en su artículo “Modelado y Control de un Captador Solar Tipo Fresnel” presentan el modelado matemático, así como algoritmos de control de un captador solar tipo Fresnel que pertenece a la planta de refrigeración solar situada en la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, donde se desarrolló un modelo de parámetros distribuidos, ajustando los parámetros

del mismo con datos tomados del sistema real y comparando la respuesta del modelo con la salida del sistema. Por último, se implementó una estrategia de control clásica, un PID con un compensador de perturbaciones de tipo feedforward paralelo, cuyo desempeño será validado mediante simulación usando el modelo de parámetros distribuidos.

También en España, Villar Fernández (2010) en su proyecto “Estudio del rendimiento óptico de un captador Fresnel” partió de un estudio anterior donde ya se había modelado el funcionamiento del captador Fresnel. Se crearon entonces dos modelos, uno óptico implementado en Matlab, y uno térmico en el programa EES. El hecho de utilizar dos programas distintos obligaba a copiar manualmente la salida del modelo óptico (radiación reflejada hacia el tubo receptor) e introducirla como entrada en el modelo térmico, para así obtener la temperatura de salida del agua. Por este motivo, el estudio del funcionamiento del colector se volvía una labor tediosa. Una parte del trabajo ha consistido en reescribir el modelo térmico en Matlab para acoplarlo al modelo óptico. Esto permite obtener directamente la temperatura de salida del agua, además de otras salidas que proporciona el modelo térmico (factores de pérdidas, temperaturas de las distintas superficies, flujos de calor que las atraviesan...) introduciendo una sola vez los parámetros de entrada. El acoplamiento de ambos modelos ha agilizado en gran medida el estudio del funcionamiento del colector, automatizando el proceso de simulación y reduciendo el tiempo invertido en cada simulación. Esto ha hecho posible lograr el objetivo final: realizar estudios del rendimiento óptico del colector Fresnel que requieren de un alto número de simulaciones.

Los estudios llevados a cabo han sido: Estudios anuales del rendimiento. Análisis paramétricos del rendimiento medio anual, tanto de parámetros ambientales como geométricos y cálculo de rectas de rendimiento en función de distintos parámetros geométricos. Se pretende,

mediante esta simulación masiva de distintos escenarios ambientales y geometrías de captador, obtener un conocimiento profundo del funcionamiento de un colector Fresnel, determinar la influencia de los distintos factores estudiados sobre el rendimiento óptico y, en última instancia, establecer unas pautas generales a seguir a la hora de diseñar un colector con el mejor rendimiento posible. Por último, se ha creado una GUI (Graphic User's Interface) con el objetivo de hacer más intuitivo el proceso de introducción de datos de entrada e interpretación de las salidas. Esta interfaz está destinada a estudios puntuales del rendimiento.

Por su parte, Jiménez (2017) en su estudio “Comparación de modelos físicos de un captador solar Fresnel” analiza los diferentes tipos de colectores solares que hay en la industria, desde los modelos estacionarios sin concentración solar hasta los modelos más avanzados en concentración solar con seguimiento. Se describen las características técnicas y de operación del concentrador Fresnel situado en la Escuela de Ingenieros de Sevilla, además del planteamiento tanto del modelo detallado térmico y óptico, como su posterior modelo simplificado a partir de los datos recogidos usando el programa *Matlab*. Finalmente, se implementan los factores correctores por ángulo de incidencia y variación del caudal en el modelo simplificado y su posterior comparación con el modelo detallado en diferentes condiciones de operación.

Para realizar la comparación con un modelo simplificado, se hace uso del programa *Matlab*, ya que es el más apropiado para unificar modelos. Con el modelo detallado se logra calcular la recta de rendimiento a partir de una simulación masiva de los rendimientos en diferentes condiciones que dará los parámetros del modelo simplificado a usar. Los parámetros a observar fueron la temperatura de salida del fluido caloportador y el calor útil absorbido por el colector. Tras el estudio comparativo de ambos modelos en las diferentes condiciones se llega

a concluir que los cambios en las propiedades físicas del captador Fresnel como el aumento de número de filas o la emisividad, conllevan un cambio en los coeficientes de la recta de rendimiento, especialmente en la emisividad, dejando prácticamente constante el rendimiento máximo que puede alcanzar el captador.

En Chile, Friedman (2017) realizó un estudio sobre un Sistema de concentración solar Fresnel para aplicaciones solares a escala comunitaria con la evaluación de prototipo donde la investigación preliminar resulta del estudio de un proyecto de una impresora solar 3D que utiliza una lente Fresnel para concentrar la radiación del sol. Este se puede utilizar en aplicaciones que requieren alta temperatura, por lo cual se busca estudiar el rendimiento de una lente de escala individual. Para este logro se realiza el diseño y construcción de una estructura para montar el Fresnel. Al ser una tecnología de concentración requiere seguimiento solar para permanecer perpendicular a la radiación del sol. La temperatura en el foco se mide para determinar las aplicaciones posibles, resultando en una temperatura máxima de 690 [°C] durante el mes de diciembre. En el foco se concentra la radiación solar 246 veces. Esto resulta en un rango de operación teórico de 340 a 570 [°C] para aplicaciones útiles y un máximo teórico de 755 [°C]. Respecto a la implementación de una impresora solar con el lente se requiere aumentar la concentración y modificar la estructura para permitir una plataforma móvil en el foco. Existen aplicaciones viables en ámbitos de minería artesanal de oro o cocinas solares de escala familiar. El prototipo requiere trabajo adicional para obtener un sistema de seguimiento más robusto capaz de operar sin mantenimiento constante.

El trabajo de Godínez (2018) titulado “Diseño de un reflector Fresnel de foco lineal para aplicaciones de calor de procesos” se enfoca en el diseño óptico y mecánico de un sistema de concentración solar RFFL (Reflector Fresnel de Foco Lineal) con una capacidad de potencia

térmica de 15 000 kW y un área de captación de 8 m². El sistema óptico está conformado por un arreglo de 32 espejos planos de 0.36 m x 0.40 m cada uno, un reflector óptico secundario tipo concentrador parabólico compuesto (CPC) de factor de concentración solar de 2 soles y un tubo receptor al vacío recubierto de pintura selectiva como sistema de absorción. La estructura de soporte y de seguimiento solar está integrada por perfil PTR de 1½ pulgada de acero al carbón A36, C11 (calibre 11). El mecanismo de seguimiento solar es de un grado de libertad y es activado por un motor a pasos. La orientación del colector RFFL es este-oeste. La construcción del prototipo no se reporta en este trabajo de tesis sin embargo ya se ha iniciado con su fabricación en el Centro de Investigaciones en Óptica A.C unidad Aguascalientes. Para el diseño del prototipo se propone una metodología la cual involucra validar el diseño óptico del sistema mediante trazo de rayos, y evaluar la estabilidad y funcionalidad de la estructura de soporte mediante un análisis de elemento finito (FEM) para evaluar el factor de seguridad estructural en las zonas con mayor deformación. Adicionalmente se realizaron una serie de simulaciones para estimar la distribución de la temperatura en el receptor.

El proyecto Análisis óptico y energético de un captador Fresnel, desarrollado por López (2017) realiza un análisis óptico de un concentrador lineal de Fresnel con la herramienta de trazado de rayos Tonatiuh. Para ello, se modela el sistema de captación de Fresnel que se encuentra en la azotea de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. El análisis consiste en comparar distintas orientaciones con la orientación actual del sistema. También se estudia el impacto de varios parámetros ópticos en el rendimiento del sistema. Para ello se calcula el rendimiento óptico medio anual de cada configuración a partir de las matrices de eficiencia (rendimiento óptico en función de la elevación y acimut solar). Además, se analiza el uso del modificador del ángulo de incidencia para el cálculo del rendimiento óptico medio

anual. Se concluye que una modificación en la orientación del sistema puede proporcionar un incremento del 4% en el rendimiento medio anual mientras que un error de pendiente del 3mrad conlleva una caída de un 7% aproximadamente. Además, el uso del concentrador secundario conlleva un incremento del 5.5% en el rendimiento medio anual. El uso del modificador del ángulo de incidencia para el cálculo del rendimiento medio anual conlleva una desviación en el cálculo de menos de un punto porcentual.

Jaramillo (2017) presenta el desarrollo, las técnicas usadas y los resultados alcanzados en cuanto al diseño de un Receptor Solar para Experimentación. Los receptores son parte de otros dispositivos más complejos llamados Concentradores Solares. En este caso se utiliza un concentrador solar con lente de Fresnel, cuya función es la de aprovechar la Energía Solar Concentrada para la obtención de aplicaciones de manufactura. Para llevar a cabo esta investigación, se requirió realizar el análisis completo del problema, conocer el Estado del Arte y definir sus especificaciones. A su vez abarcó tres áreas del conocimiento que permiten clasificar a este proyecto como Mecatrónico, las cuales son: • Diseño mecánico • Diseño electrónico • Comunicación de datos e interfaz humano máquina. Estos puntos, junto con el desarrollo y técnicas usadas para cumplir el objetivo, se desglosan en los apartados correspondientes de este trabajo.

1.2 Marco teórico

En este apartado se describen principios de funcionamiento de sistemas fotovoltaicos de concentración de energía y métodos sobre aplicaciones de sistemas para aprovechar la Energía Solar Concentrada. También se refieren algunas tecnologías utilizadas en colectores y concentradores solares con características y funcionamiento de lentes Fresnel como opciones para la conversión de energía solar.

1.2.1 Energía Solar fotovoltaica

En la actualidad existen diferentes tecnologías para aprovechar la energía solar, la más conocida, tal vez es la fotovoltaica la cual consiste en la generación de energía eléctrica directa al incidir con radiación solar una celda solar fotovoltaica. La radiación solar que llega al límite externo de la atmósfera es de 1400 w/m^2 sobre la superficie terrestre, en regiones de baja latitud y alta heliofanía (“transparencia” de la atmósfera) pueden llegar, a mediodía, hasta poco más de 1000 w/m^2 . Esta densidad de energía permite aplicaciones térmicas de la energía solar de baja temperatura, tales como los colectores solares planos o los cultivos bajo cubierta. Cuando se necesitan temperaturas medias (más de $150 \text{ }^\circ\text{C}$) y altas (hasta varios miles de grados) se necesita concentrar la radiación solar. Algunas aplicaciones son la generación de energía eléctrica, los hornos solares (para aplicaciones metalúrgicas) o las cocinas solares de concentrador (Concentradores Solares, s.f.).

Entre los principales atractivos que ofrecen los sistemas fotovoltaicos, están:

- Su gran modularidad (desde unos pocos watios hasta centenares MW) les permite ser capaces de producir cantidades pequeñas de electricidad en el mismo lugar de la demanda.
- No precisan suministro de combustible alguno para su operación.
- Al disponer de partes móviles, son muy fiables y su operación y mantenimiento son muy sencillos y al alcance de personal escasamente especializado.
- Son absolutamente no contaminantes.
- Su vida operativa es muy larga, probablemente superior a los 30 años, sin que muestren degradación.

1.2.2 Sistemas fotovoltaicos de concentración de energía

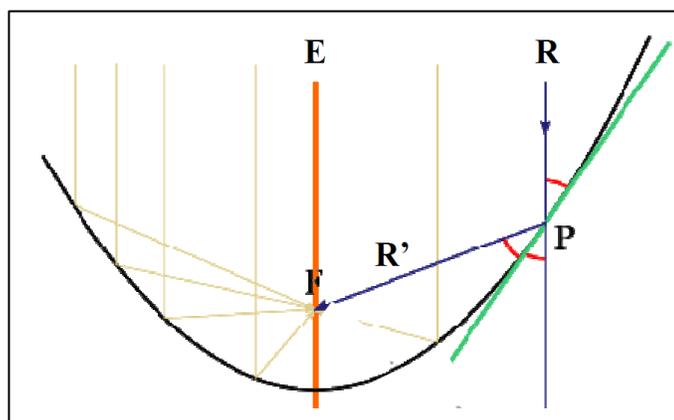
La concentración fotovoltaica consiste en sustituir las células solares, el elemento con diferencia más caro de los sistemas fotovoltaicos, por sistemas ópticos llamados “concentradores” que dirijan la luz sobre células más pequeñas, con la condición de que éstas conviertan eficientemente la mayor densidad de energía que reciben, y los elementos ópticos añadidos sean efectivamente más baratos que el área de silicio sustituida. Por tanto, mientras que en los sistemas fotovoltaicos convencionales la colección de la energía solar y la conversión de ésta en electricidad eran dos funciones desempeñadas por la célula solar, la concentración desacopla ambas funciones, siendo la colección realizada por el concentrador y la conversión por la célula (Chemisana, 2009).

La generación de potencia por concentración solar (CSP), por sus siglas en inglés concentrating solar power, utiliza dispositivos ópticos (lentes o espejos) para captar y concentrar la radiación solar en puntos o zonas focales (receptor). A través del receptor se hace circular un fluido de trabajo el cual se calienta por efectos del alto flujo radiactivo y este traslada la energía térmica a un bloque de generación de potencia convencional (Godínez, 2018).

El consumo global de energía ha incrementado drásticamente en las últimas décadas, los principales sectores consumidores son el industrial, el de generación de energía eléctrica y el de transporte. La Agencia Internacional de Energía estima que muchos de estos procesos térmicos en la industria de alimentos, bebidas, plásticos, textiles y de papel entre otras, ocurren en temperaturas de baja y mediana temperatura ($<250^{\circ}\text{C}$), esta temperatura puede alcanzarse fácilmente con tecnologías termo solares de media temperatura, entre las cuales se encuentra la tecnología Reflector Fresnel de Foco Lineal (RFFL) (Godínez 2018).

Para concentrar la radiación, es decir, obtener intensidades mayores por unidad de superficie, esto se logra mediante superficies reflectantes parabólicas. Esto se debe a una propiedad de la parábola, y es que “el ángulo formado por la tangente en cualquier punto de la parábola con la recta paralela al eje de la parábola en ese punto, es igual al formado por dicha tangente con la recta que une el punto de tangencia con el foco de la parábola”. Si la parábola (o superficie parabólica) es reflectante y la recta paralela al eje es un rayo de luz, este se reflejará siempre con un rayo que pase por el foco. (Figura 1)

Figura 1: Concentración de la radiación



Fuente: Tomado de Godínez, 2018

Así, el rayo que ingrese paralelo al eje E de la parábola, tal como el R, se reflejará en el punto P con R' que pasa por el foco F. Cualquier otro rayo, como los representados con color claro, se reflejarán pasando siempre por F. En la práctica, F no es un punto, ya que el sol tiene un tamaño aparente (su imagen no es puntual), por lo que en torno al punto F aparece una zona de muy alta densidad, llamada “entorno focal” (Concentración radiación solar, s.f.).

1.2.3 Colectores solares

Un colector solar o sistema termo solar es un dispositivo diseñado para captar radiación solar, funciona “al incrementar la temperatura de un fluido de trabajo como el agua o aceite

sintético, convirtiendo en la mayoría de casos este líquido en vapor y poder generar electricidad y así suplir necesidades domésticas como lo es el Agua caliente sanitaria, la desalinización de agua entre otras muchas aplicaciones” (Sabogal Paz, 2019 en Tarazona, 2021).

Los colectores solares se dividen dependiendo de su temperatura de funcionamiento; los de baja, media y los de alta temperatura. En los sistemas de media temperatura, existe el Concentrador Lineal Fresnel, siendo este una solución a un Colector Cilindro- Parabólico debido a su fácil montaje y económica construcción, ya que este sistema dirige la radiación por medio de una fila de espejos planos, los cuales son dirigidos a un tubo absorbedor; éste tiene en la parte superior un espejo curvo el cual se encarga de concentrar la radiación para obtener un aprovechamiento de la radiación solar (Platzer, Mills & Gardner, 2021).

La simulación en este tipo de sistemas es esencial para su selección, ya que puede disminuir los costos y se puede predecir el comportamiento de estos y asimismo determinar la eficiencia que tendría en el lugar a implementar. Por esto es importante el manejo del simulador TRNSYS, el cual se basa en un enfoque modular para resolver sistemas de energía térmica requiriendo un archivo de entrada para simular las condiciones meteorológicas del lugar de interés. Como resultado final genera un archivo interactivo de salida ilustrado en un gráfico en el dominio el tiempo, que dependiendo del tipo de simulación, puede arrojar datos de temperatura, trabajo, eficiencia, calor de entrada entre otros. TRNSYS proporciona una buena concordancia con un error que oscila entre el 5% y el 10%, siendo esta una de sus grandes ventajas (Shrivastava et al., 2017).

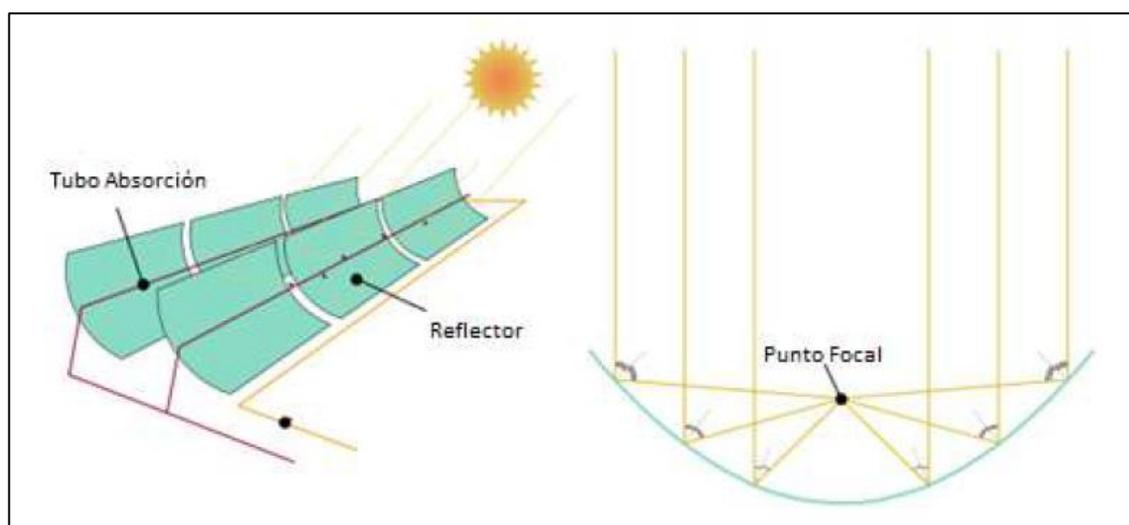
Asimismo, en el campo de la investigación es muy utilizado para el análisis óptico de sistemas termo solares, el software Soltrace siendo este un código innovador para modelamiento óptico que fue desarrollado por investigadores del Laboratorio Nacional de Energía Renovable

(NREL), utilizando la tecnología de RayTrace, con la variante que los datos de salida se presentan en diagramas de dispersión, mapas de flujo y gráficos de rendimiento (Wendelin, 2018).

Existen dos tipos de concentradores:

- a) Los parabólicos cilíndricos (curvatura única) llamados “2D” por ser de “dos dimensiones” que permiten densidades y temperaturas medias en el entorno focal (200-300°C) (Figura 2) y
- b) Los paraboloides de revolución (doble curvatura) llamados “3D”, por ser en “tres dimensiones” que permiten temperaturas aún superiores a los 3000 °C.

Figura 2. Colector parabólico



Fuente: tomado de Friedman, 2018

La parábola dirige al foco la radiación directa por lo que requiere un sistema de seguimiento solar. El uso de un foco lineal significa que sólo se utiliza seguimiento en un eje, con el movimiento este a oeste del sol.

La tecnología de colectores cilindro parabólicos con seguimiento activo trabaja a mayor eficiencia para temperaturas superiores a los 100°C, logrando hasta 400°C. Se utilizan en

aplicaciones de generación eléctrica, calentando fluidos de alto calor específico que luego alimentan un ciclo de vapor turbinado a través de intercambiadores de calor.

Para utilizar un sistema de seguimiento en dos ejes existe la tecnología de disco parabólico, que utiliza un punto focal en vez de un sistema de tuberías focales. Esto produce razones de concentración entre 600 y 2000, lo que permite que la temperatura en el receptor puede sobrepasar los 1500 °C. Al ser receptores puntuales, cada colector puede ser operado de manera independiente, permitiendo regular la producción del campo en su totalidad. (Figura 3)

Figura 3. Colectores de disco parabólico



Fuente: Tomado de Friedman, 2018

Otra tecnología que permite una gran área de incidencia es la torre solar o helióstato, donde se disponen espejos con seguimiento en dos ejes que reflejan la luz a un foco común.

1.2.4 Lentes concentradores

Los sistemas de concentración requieren un sistema de seguimiento solar que mantenga el plano perpendicular a la radiación solar directa para mantener un foco efectivo. Así, una lente de Fresnel utiliza una geometría precisa para imitar el funcionamiento de una lente biconvexa (o de lupa) sin requerir un grosor inviable, lo que permite un área de concentración mayor.

Asimismo, para determinar las aplicaciones viables con un sistema de concentración es necesario determinar la radiación y temperaturas alcanzables en el foco (Friedman, 2017).

Un sistema de concentración alternativo utiliza lentes transparentes que permiten redirigir la radiación de un área mayor sobre la zona efectiva del sistema. Esto se puede usar para mejorar el funcionamiento de un sistema diseñado para radiación ambiente pero es más atractivo para sistemas diseñados para funcionar a niveles de radiación que no ocurren naturalmente. Esto permite diseñar por ejemplo celdas fotovoltaicas diseñadas para temperaturas considerables con buena eficiencia, a diferencia de las disponibles comercialmente que funcionan a potencia nominal para temperaturas ambientes de 25 °C. La configuración de lentes más comunes son las llamadas Fresnel, (Figura 4) que utilizan las propiedades de refracción prismática para aproximar el funcionamiento de un lente convencional como el utilizado en lupas comunes y corrientes. Esto permite producir lentes mucho más delgados y livianos de materiales de bajo costo (Friedman, 2017).

Figura 4. Concentrador solar con lente de Fresnel



Fuente: Tomado de Sierra & Vázquez (2005)

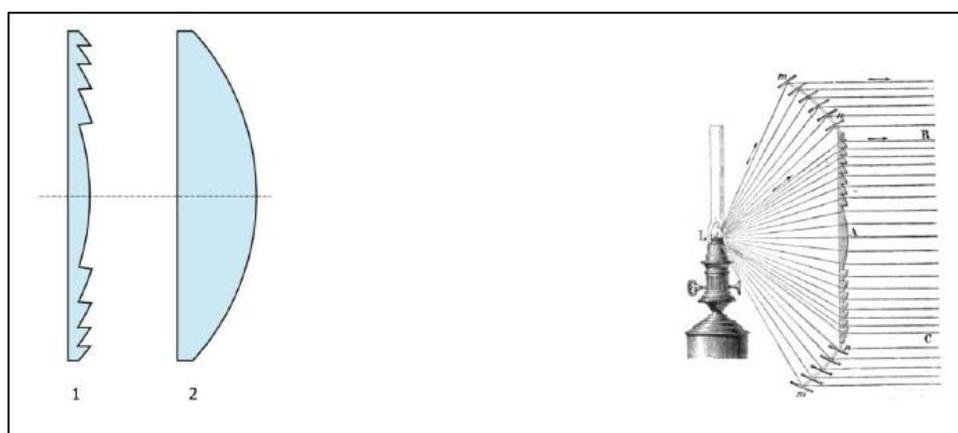
1.2.5 Reflector Fresnel de Foco Lineal

Los sistemas de concentración solar de Reflector Fresnel de Foco Lineal (RFFL) en esencia se componen por un arreglo de espejos planos y un receptor lineal, el cual se posiciona en la línea focal del arreglo óptico construido con las líneas de espejos. Generalmente suele utilizarse un sistema óptico secundario de concentración en la línea focal para maximizar la concentración solar y obtener un flujo de radiación en el receptor mucho mayor. Actualmente la planta con tecnología RFFL más grande del mundo se encuentra en Calasparra, España, inaugurada en 2012 con una estimación de generación de 50 millones de kWh al año, suministrando energía eléctrica para aproximadamente 12 000 hogares y reduciendo las emisiones CO₂ anuales en 16 toneladas (Godínez, 2018).

1.2.6 Concentrador Solar con lente Fresnel

Los lentes Fresnel, originalmente fueron diseñados para uso en faros, permitiendo dirigir la luz producida por una lámpara en un haz de luz. Este mismo principio funciona a la inversa, tomando una radiación que incide de manera paralela y enfocándola en un punto (Figura 5).

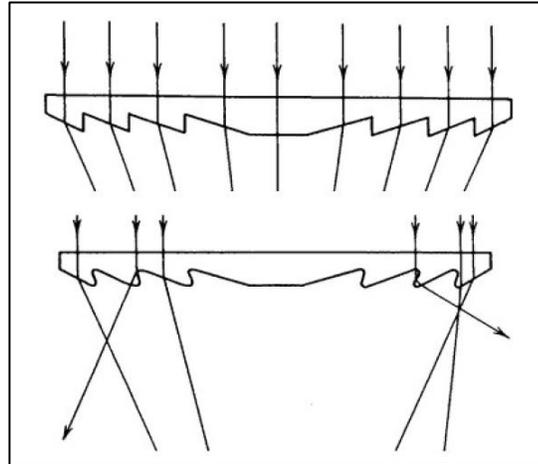
Figura 5. Lente Fresnel (1) y convencional (2). Funcionamiento original Fresnel



Fuente: tomado de Fiedman (2017)

Una limitación del método de concentración por refracción es que requiere seguimiento solar. Una pequeña variación en el ángulo de incidencia modifica la distancia focal por lo que se requiere radiación perpendicular al lente (Figura 6).

Figura 6. Lente Fresnel real [óptica del concentrador]

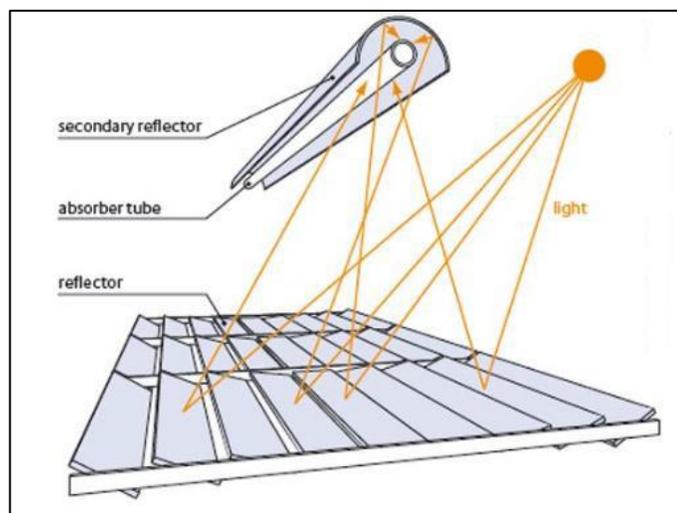


Fuente: Concentrador óptico (s.f.)

Las lentes Fresnel del concentrador solar tienen la forma de un tablero de dardos, con anillos concéntricos de prismas alrededor de una lente que es una lupa. Todas estas características les permiten enfocar la luz dispersa del Sol en un haz estrecho. Las lentes de Fresnel de concentrador solar son favorables desde el punto de vista del peso y el costo y pueden encontrar usos en las aplicaciones actuales. Una lente Fresnel se divide en una serie de zonas, cuya separación puede ser tan pequeña como unas pocas décimas de milímetro hasta varios centímetros. Dentro de cada zona de apertura, la superficie de la lente está inclinada para que refracte la luz en la misma cantidad angular que una lente esférica normal de la misma distancia focal. En general, estas facetas de lentes son planas, pero con superficies inclinadas ya que el efecto de la curvatura sería insignificante al afectar el tamaño de la imagen. Si las facetas fueran una porción significativa del radio de apertura y más grandes que el tamaño de imagen focal deseado, entonces sería necesaria la curvatura de las facetas (E-tay industrial.co.ltda taiwan s.f.).

Los captadores Fresnel (Figura 7) son una alternativa de menor coste a los captadores cilindro-parabólicos, llegando a alcanzar temperaturas de trabajo similares (de hasta 300 - 400 °C), si bien su rendimiento es peor. Esta configuración permite optimizar el aprovechamiento del terreno y minimizar los bloqueos entre filas de espejos (Villar Fernández, L, 2018).

Figura 7. Captador Fresnel (Solar Praxis)



Fuente: tomado de Solar Concentra (2015)

El sistema concentrador está constituido por superficies reflectoras con un elevado radio de curvatura que interceptan, concentran y reflejan la radiación solar dirigiéndola hacia el tubo receptor, situado en un plano diferente al de reflexión. Como el objetivo es concentrar los rayos solares sobre la superficie del receptor, el sistema concentrador debe disponer de un mecanismo de control que le permita seguir la trayectoria del sol de modo que siempre se encuentre enfocado hacia él. Una vez que la radiación concentrada llega al receptor, éste la convierte en energía térmica mediante una transferencia de energía al fluido de trabajo.

1.2.7 Aplicaciones y desarrollo de captación Fresnel

Los primeros sistemas de captación Fresnel se utilizaron en proyectos de gran escala para la generación de energía eléctrica a través de la generación de vapor, con capacidades de

hasta cientos de MW. A menor escala, los captadores Fresnel presentan las condiciones de operación adecuadas para su introducción en procesos térmicos industriales. Este tipo de captadores se puede instalar en tejados debido a su buena distribución del peso y su baja resistencia al viento. Además, su buen aprovechamiento del espacio los hace muy adecuados en lugares donde este está limitado.

Debido a la gran variedad de captadores solares existentes, es necesario un método común para determinar su rendimiento y que permita comparar los diversos resultados. Dicho método es el test estándar ISO 9806, mediante el cual se determinan experimentalmente los parámetros de caracterización térmicos y ópticos, en función de los cuales está expresado el rendimiento del captador (para cada tipología de captador los parámetros térmicos y ópticos serán distintos). El empleo de estos parámetros permite calcular la energía producida por un captador solar en cada instante, y de este modo, calcular la energía obtenida en un período de tiempo y bajo unas condiciones de operación dadas (Figura 8).

Figura 8. Prototipo vertical y Prototipo funcionando



Fuente: Friedman, 2017

1.2.8 Ventajas del uso de captadores tipo Fresnel

Las ventajas de uso de los captadores solares tipo Fresnel en comparación con los captadores cilindro-parabólicos, son:

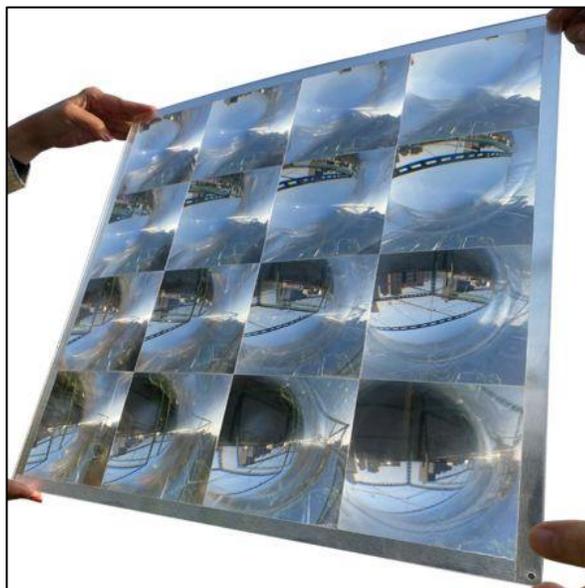
- Espejos y sistema de seguimiento de bajo coste.
- Tubo absorbedor fijo, no se necesitan juntas de alta presión flexibles.
- No se necesitan tubos de vacío.
- No se necesitan codos de expansión (el absorbedor está libre por un extremo para dilatarse).
- Reflectores planos y situados cerca del suelo, reduciendo las cargas de viento.
- Uso eficiente del suelo, las filas de colectores pueden situarse cerca una de la otra.
- Fácil acceso a las partes móviles y superficiales.

Otro elemento a favor de los lentes Fresnel se debe a que las pérdidas por transmisión aumentan con el espesor lo que limita el tamaño de lentes convencionales. La aproximación mejora al aumentar la cantidad de cortes, con la mayor dificultad siendo la agudeza de las facetas prismáticas. Al no ser cortes ideales, existen imperfecciones que no concentran al foco. Una limitación del método de concentración por refracción es que requiere seguimiento solar. Una pequeña variación en el ángulo de incidencia modifica la distancia focal por lo que se requiere radiación perpendicular al lente (Friedman, 2017).

Los concentradores solares también tienen la ventaja de que las celdas solares se pueden espaciar más, ya que la luz se puede enfocar en cada celda. Esto significa que es necesario fabricar menos células solares y que los paneles cuestan menos para construir. Además, los ingenieros ahora pueden colocar vidrio grueso o plástico sobre el panel solar para protegerlo de

los micro meteoritos (Figura 9), algo que les resultaría difícil si tuvieran que preocuparse por permitir que llegue suficiente luz a las células solares (E-tay industrial.co. Ltda. taiwan, s.f.).

Figura 9. Lente acrílica óptica de concentrador solar Fresnel con 4 matrices de energía verde



Fuente: E-tay industrial.co.ltda. taiwan, (s.f.)

Los actuales concentradores solares de lente Fresnel tienen una transmisión de luz alta del 92% que es adecuada para el sistema de colector de energía solar, enciende un fuego bajo la luz solar, calentador de agua caliente, horno solar. La lente de Fresnel del sensor infrarrojo PIR tiene una buena capacidad para enfocar la luz que se usa ampliamente en el concentrador solar y la luz LED.

1.2.9 Lentes circulares de Fresnel

Las lentes Fresnel son buenas lentes de concentración para pequeñas aplicaciones de energía solar, especialmente las circulares (Figura 10). Por ejemplo, los concentradores que se prueban con celdas solares de silicio y arseniuro de galio son generalmente del tipo circular Fresnel. La elección se hace en parte por su bajo costo, pero también porque se pueden obtener altas concentraciones de una lente de plástico de precisión, con concentraciones de brillo

superiores a 2000. En estas aplicaciones, es necesario seguir al sol para mantener la pequeña imagen solar centrada en el elemento receptor (E-tay industrial.co.ltda. s.f.).

Figura 10. Imagen de lente Fresnel Circular



Fuente: (tomado de Friedman, 2017)

2. Diseño conceptual del prototipo

La metodología aplicada en el estudio es de tipo experimental e investigativo, por tener como finalidad la manipulación de variables experimentales bajo condiciones controladas. También posee un perfil exploratorio, por realizarse con el propósito de obtener datos confiables que sirvan como base para estudios futuros.

Dentro del procedimiento para desarrollar el prototipo de máquina de tallado se contemplaron las siguientes fases: primero la búsqueda de información pertinente para efectuar el diseño de la máquina. En esta fase, se investigó sobre el proceso de tallado de un sistema adecuado de fabricación del lente Fresnel identificando esencialmente las características del acrílico, que es la materia prima a utilizar en el proyecto. Luego se hizo el diseño conceptual de posibles variables de la máquina, donde se analizaron, evaluaron y definieron aspectos de geometría (dimensiones), proceso de fabricación, selección de componentes y materiales, tanto de componentes estáticos (estructura), como de componentes dinámicos (mecanismos) de una máquina. Posteriormente, se seleccionaron los parámetros y componentes para la construcción del prototipo de máquina como cálculo estructural y modelado y diseño del prototipo.

Dentro de los requerimientos técnicos también se definieron criterios que permiten cumplir con exigencias de seguridad, manipulación, funcionamiento, calidad y costo, entre otras; lo mismo que sistemas de resistencias, fricción y rozamiento, corte, precisión, fuerza, sujeción, torsión y demás mecanismos de accionamiento del prototipo de la máquina.

Para el ensamble se ejecutaron los resultados de la etapa de diseño (planos, especificaciones, manuales, etc.) y se realizaron los ajustes y pruebas necesarias para conseguir la funcionalidad deseada del prototipo. En la Fase de análisis de resultados y retroalimentación, se procedió a interpretar y analizar la información recogida, lo cual permitió establecer resultados esperados

vs resultados encontrados, y luego, se hicieron ajustes pertinentes en el sistema de tallado y demás procesos comprendidos en la fabricación de lentes Fresnel circulares.

2.1 Requerimientos técnicos para el diseño

Los requerimientos de diseño surgen de las expectativas y necesidades del prototipo a construir el cual permite obtener una lente Fresnel de 60 cm de diámetro, de buena calidad y a bajo costo. La máquina debe cumplir con las siguientes exigencias:

1. Ser una máquina talladora de lentes Fresnel circulares, mecánica estable y segura
2. Que su operación y manejo sea ciento por ciento manual y,
3. Que a través de las pruebas de funcionamiento sea apta para sujetar con la debida presión moldes de acrílico y realizar cortes finos, mediante un control preciso y confiable.

Por lo anterior se tuvieron en cuenta factores como costo, manipulación, mantenimiento, funcionalidad, impacto ambiental y transporte; estableciendo las razones de su aplicación en función de criterios técnicos y favorables a la hora del diseño y fabricación de la herramienta prototipo.

En cuanto al costo, las materias primas utilizadas como el acero, lámina de acrílico, tornillos, tuercas, cuchillas, discos, guillotinas, engranes, etc. se adquirieron en el mercado local a precios asequibles. La operación de esta máquina manual es sencilla, aunque permite realizar cortes finos de moldes acrílicos, no requiere mayor destreza para su manejo.

Por otro lado, este prototipo, al estar diseñado para tallar lentes Fresnel que permitan generar energía fotovoltaica, requiere adoptar un proceso riguroso para alcanzar un producto final de excelente calidad utilizando láminas e insumos adecuados para obtener una lente eficaz y confiable.

2.2 Principios de mecanismos y funcionamiento del prototipo

El proceso de funcionamiento se basa en la realización de cortes más seguros y precisos adaptados a los requerimientos específicos del prototipo a partir del uso de principios básicos de mecánica para su manipulación y operación, entre otros se destacan las palancas de tercer género, en donde la fuerza se encuentra en el medio de la resistencia y el punto de apoyo. También los principios de fuerzas de fricción y rozamiento, potencia, fuerza motriz, velocidad angular, resistencias, corte, precisión, fuerza, sujeción, torsión y demás mecanismos de accionamiento del prototipo de la máquina.

Para realizar los cálculos o estudios y estimaciones que , primero que todo se empieza analizando los puntos donde se presenta fricción y rozamiento de partes.

1. En el rodamiento de la varilla lisa eje
2. En la Chumacera de la varilla lisa eje
3. La fricción entre los engranes
4. Fricción con el cojinete de deslizamiento
5. Fricción del material acrílico con la herramienta de corte

Datos:

- Radio del plato máximo = $R_{pm} = 300 \text{ mm}$
- Longitud de la manivela = $L_m = 9\text{cm} \Rightarrow 90 \text{ mm}$
- Diámetro eje varilla lisa 48mm
- Distancia eje central del plato a la orilla = $34 \text{ cm} = 340 \text{ mm}$
- Tiempo de Una Circunferencia = $1,54 \text{ min} = 111 \text{ s}$

Se comienza calculando la fuerza motriz = f_m , para esto deducimos los siguientes datos:

Estimando de 190 Gramos multiplicado por 9,81 de gravedad.

Tenemos la Fuerza Normal

$$F_N = 2N_{\max}$$

En tablas se encuentra un coeficiente de rozamiento del acrílico con el acero de 0,4

$$\mu = 0,4$$

Entonces se tiene que la fuerza de rozamiento es igual a:

$$f_r = f_n \cdot \mu$$

$$f_r = 2 \times 0,4 = 0,8N$$

$$f_r = 0,8N$$

Con estos datos, se calcula el momento resistivo por fricción del corte M_{rc}

$$M_{rc} = f_r \times r_{\max}$$

$$M_{rc} = 0,8 \times 0,3m$$

$$M_{rc} = 0,24 \text{ N.m}$$

Luego se calcula el momento resistivo total con la sumatoria de momentos resistivos.

$$\sum M_r = M_{rt}$$

$$M_{rt} = M_{ic} + M_{ri} + M_{r2} + M_{r3} + M_{r4}$$

M_1 por fricción en balineras, cojinetes, y rodamientos es igual al 0,3% del valor del momento resistivo por fricción al corte (M_{rc}).

$$M_r = 0,03 \times M_{ic}$$

$$M_{ri} = 0,03 \times 0,24$$

$$M_{ri} = 0,007$$

Entonces se tiene que:

$$M_{rT} = 0,24 + 4(0,007)$$

$$M_{rT} = 0,24 + 0,028$$

$$MrT = 0,268 \text{ N.m}$$

ahora se calcula el torque motriz:

$$Tm = fm \cdot Lm$$

Dando como resultado el torque motriz que es igual a la fuerza motriz por radio de la manivela. Asumiendo que el torque motriz tiene que ser mayor que el momento resistivo por fricción del corte.

$$Tm > MrT$$

Se asume una constante $kd = 1,5$

kd = coeficiente de diseño que tiene en cuenta:

en situación de ajuste de los valores de fricción total

Entonces:

$$Tm \geq kd \times MrT$$

$$Tm \times 1,5 MrT$$

$$Tm = 1,5 \times 0,268 \text{ Nm}$$

$$Tm = 4,02 \text{ Nm}$$

$$Tm=4Nm$$

Se tiene que el Torque motriz es igual o menor que la fuerza motriz por longitud de la manivela.

Desde el punto de vista constructivo ergonómico, se asume inicialmente una longitud de la manivela de 9 cm - 10 cm, para la comodidad y acople adecuado en superficies y al momento de la rotación no sea tan extenso.

Luego se pasa a calcular la fuerza motriz que el operario tiene que usar para el funcionamiento.

$$f_m = \frac{T_m}{LM}$$

$$f_m = \frac{4 \text{ N.m}}{0,09\text{m}}$$

$$f_m = 44.44 \text{ N}$$

Dividiendo por gravedad 9,81 obtenemos:

$$f_m = 4,53 \text{ Kg fuerza}$$

Dando como resultado la fuerza que tiene que emplear la persona que esté operando la máquina.

Ahora se calcula la potencia necesaria para realizar el trabajo:

Potencia = Torque motriz \times velocidad angular

$$P = T_m \times \omega$$

$$PW = T_m (\pi \times M \setminus 30)$$

Por último, se toma el valor que arrojó al cronometrar la primera vuelta de prueba con un acrílico de 40 cm de diámetro en su corte más alejado.

En 1.51 minutos dio una (1) vuelta

Θ

1 662 0,34

Tabla 1. Relación de potencia

n	Pw (watts)
1	0,62
2	1,24
3	0,34
4	

Fuente: Autores, 2023

En la mitad del corte radio de 10 cm

$$P_w = T_m (\pi \times n \setminus 30)$$

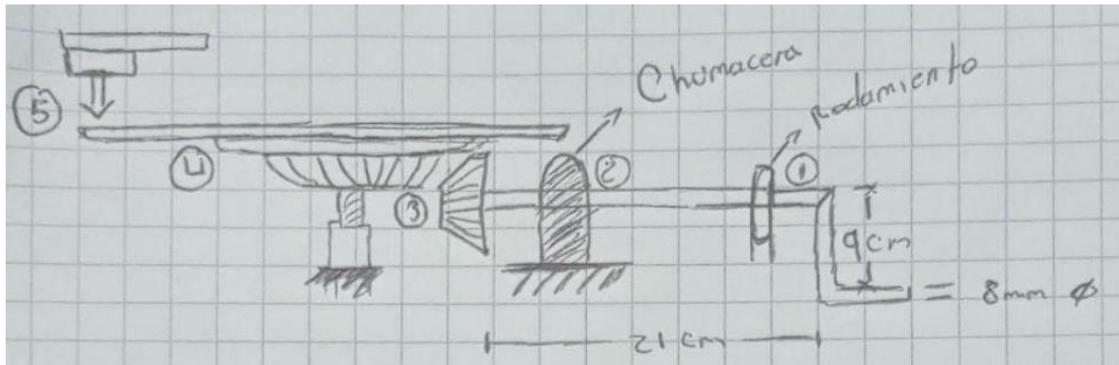
$$P_w = 4 (\pi \times 0,75 \setminus 30)$$

$$P_w = 0,314 w$$

2.3 Cálculos estructurales

Cálculo del factor de seguridad y estudio del compartimiento del eje sujeto a la manivela.

Figura 11. Bosquejo del eje con cargas de torsión



Fuente: Autores, 2023

Debido a este trabajo, las cargas en este eje quedan sometidas a torsión.

$$\text{Esfuerzo} = \tau$$

$$\text{Torque motriz} = T_m$$

$$\text{Radio} = R$$

$$\text{Momento polar inercia} = J_P$$

$$\text{Factor Seguridad} = S_f$$

$$\text{Resistencia a la cedencia elástica} = S_g$$

$$\text{Resistencia material a esfuerzo cortante} = S_c$$

$$\tau = \frac{T_m}{J} \times R$$

Cálculo

$$\tau = \frac{(Tn)}{(\pi * r^4) / 2)}$$

$$\tau = \frac{(2 * Tm)}{(\pi * r^4)}$$

$$Jp = Ix + Iy$$

$$JP = \frac{\pi * (r^4)}{4 + (\pi * r^4) / 4}$$

$$JP = \frac{(\pi * r^4)}{2}$$

$$JP = \frac{(\pi * (D/2)^4)}{2}$$

$$P = \frac{(\pi * D^4)}{(3^2)}$$

$$\tau = \frac{(2 * 4)}{(\pi * 0,004)^3}$$

$$\tau = \frac{(8)}{(\pi * 0,004)^3}$$

$$\tau = 39.788,735.8 \text{ Pa}$$

$$\tau = 39,8 \text{ Mpa}$$

Se asume por defecto $Sf = 1.5$

$$Ss = 0,50 > 5y$$

$$\tau = Ss * Sy / Sf$$

$$\tau = \frac{1,5 * 39,8}{0,507}$$

$$Sy = 177.75 \text{ Mpa}$$

Se seleccionó como eje de la manivela un material de acero arcilloso que tiene resistencia a la cedencia 207 Mpa y limite última de 379 Mpa) según tablas de materiales.

Ahora se calcula la flexión de la máquina en el punto de unión del eje de la manivela, por lo cual el mayor momento flector estará en el extremo.

Mf= momento de flexión

Fm= fuerza motriz

Lm= longitud de la manivela

Mf= Fm* Lm

Mf= 44.4 N*0,09M

Mf= 3.99 Nm aproximando 4 Nm

Se calcula el esfuerzo normal a flexión

$\sigma = m_f \cdot r / I_x$

$\sigma = m_f \cdot r / \pi r^4 / 4$

$\sigma = 4 \cdot m_f / \pi \cdot r^3$

$\sigma = 4 \text{ Nm} \cdot 0,004 / \pi r^4 / 4$

$\sigma = 39,8 \cdot 2$

$\sigma = 79,6 \text{ Mpa}$

$\sigma = s_y / s_f$

s_y = resistencia a la cedencia

s_f resistencia del material

$s_y = 79,6 \cdot 1,5$

$s_y = 119,4 \text{ Mpa}$

Relación de transmisión

12 dientes piñón pequeño

37 dientes coronan piñón grande

$V_r = z_1 / z_2 \text{ } 12/37$

$V_r = 0.324$

Es de reducción ya que la velocidad angular de salida es menor que la velocidad angular de entrada.

2.4 Modelado y diseño del prototipo

A continuación, se presenta la guía para la construcción de la máquina, con el modelado y diseño que fueron realizados con la herramienta Solid Edge y el programa de diseño AutoCAD respectivamente.

Primero, se empezó con el diseño de la estructura base con un hierro que sea fácil de conseguir y de características favorables para la máquina.

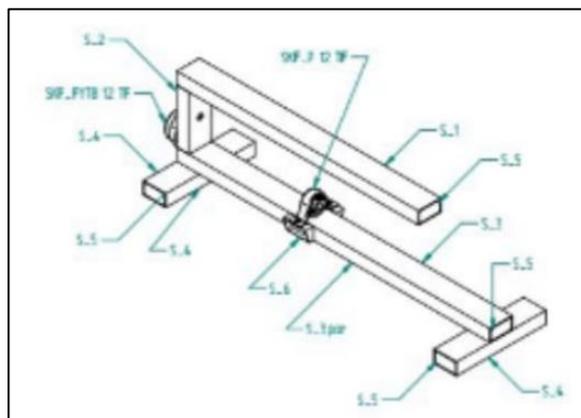
Figura 12. Diseño de la estructura base



Fuente: Autores, 2023

En la figura 13 se presenta un despiece ordenado para al momento de empezar a diseñar las piezas con las medidas adecuadas.

Figura 13 . Despiece



Fuente: Autores, 2023

Tabla 2. Especificaciones del material

Número: 1,2,3,4
 Material: Tubo Rectangular
 de 50mmx27mm
 Espesor: Calibre 18
 Cantidad: 2
 Peso c/u: 1Kg

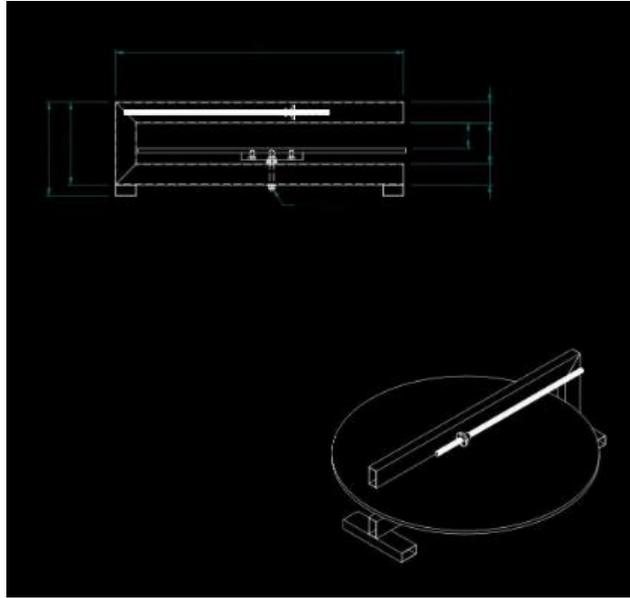
Número de elemento	Nombre archivo (sin extensión)	Tb_R	Lng	Cantidad	Masa (Artículo)
1*	S_2	50mm*27mm Clb=18	120.00 mm	1	0.167 kg
2*	S_1	50mm*27mm Clb=18	540.00 mm	1	0.757 kg
3*	S_3	50mm*25mm clb=18	700.00 mm	1	0.982 kg
4*	S_4	50mm*27mm Clb=18	200.00 mm	2	0.280 kg

Fuente: Autores, 2023

Se optó por un material de acero para la estructura con el propósito de obtener mayor estabilidad y firmeza. Comercialmente el perfil de 2x1” es utilizado para estructuras.

El primer diseño que se hizo fue con los perfiles soldados por la parte más delgada, pero se evidenció que era mejor utilizar la parte más larga para que quedara más estable. Otro cambio que se realizó en el diseño principal fue posicionar la estructura de la varilla debajo del perfil superior y no en un costado para mayor estabilidad y diseño más compacto.

Figura 14. Diseño e estructura AutoCAD



Fuente: Autores, 2023

La varilla trapezoidal que se escogió para la máquina tiene las siguientes características:

- Largo de la varilla: 500 mm
- Diámetro 12b mm
- Paso de 4 mm x vuelta

Figura 15. Varilla trapezoidal roscada



Fuente: Autores, 2023

La varilla se ordenó mecanizar a 8 mm para permitir hacer una chumacera de 8 mm de diámetro interno.

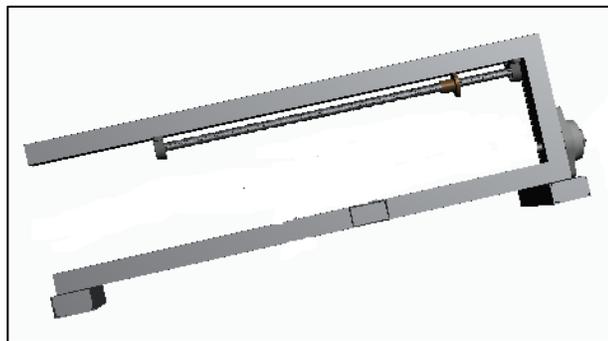
Figura 16. Especificaciones técnicas chumacera



Fuente: Autores, 2023

Así resultó el diseño de la estructura base con la varilla y las chumaceras y la parte del cabezal que va a soportar la varilla lisa y manivela con un rodamiento interno de 10 mm. (Figura 17).

Figura 17. Diseño de la estructura base con la varilla roscada unida



Fuente: Autores, 2023

Para la chumacera de la base inferior se encargó una chumacera kp10 (Figura 17)

- Rodamiento kp000
- Diámetro 10 mm
- Material de aleación en zinc

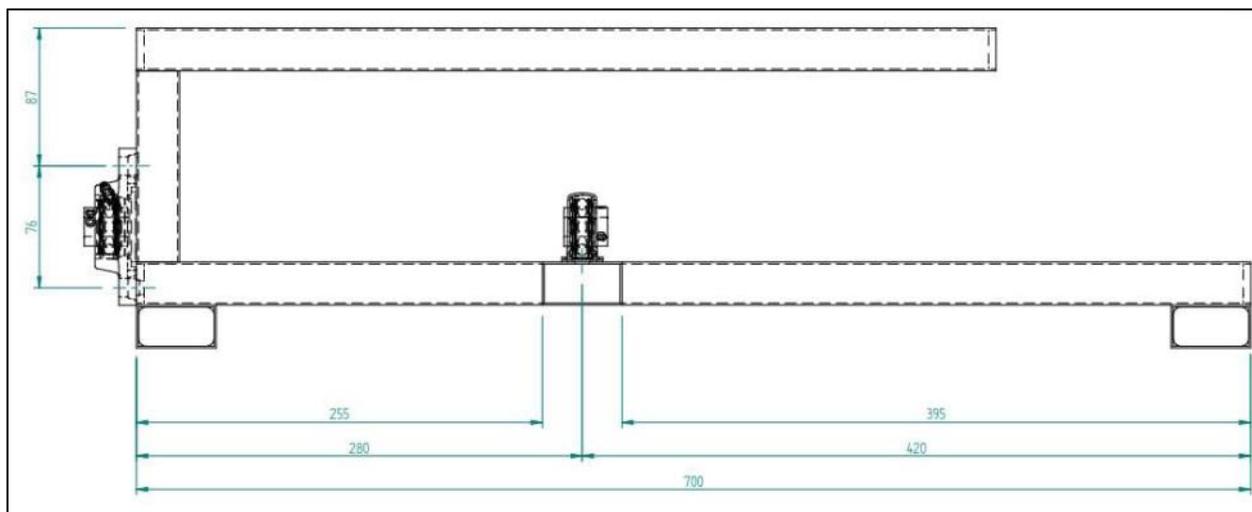
Figura 18. Chumacera kp10 rodamiento inferior



Fuente: Autores, 2023

En la figura 19 se observa un esquema de diseño de la estructura y las partes que soportan el eje de la manivela.

Figura 19. Diseño estructural con los soportes inferiores chumacera y soporte



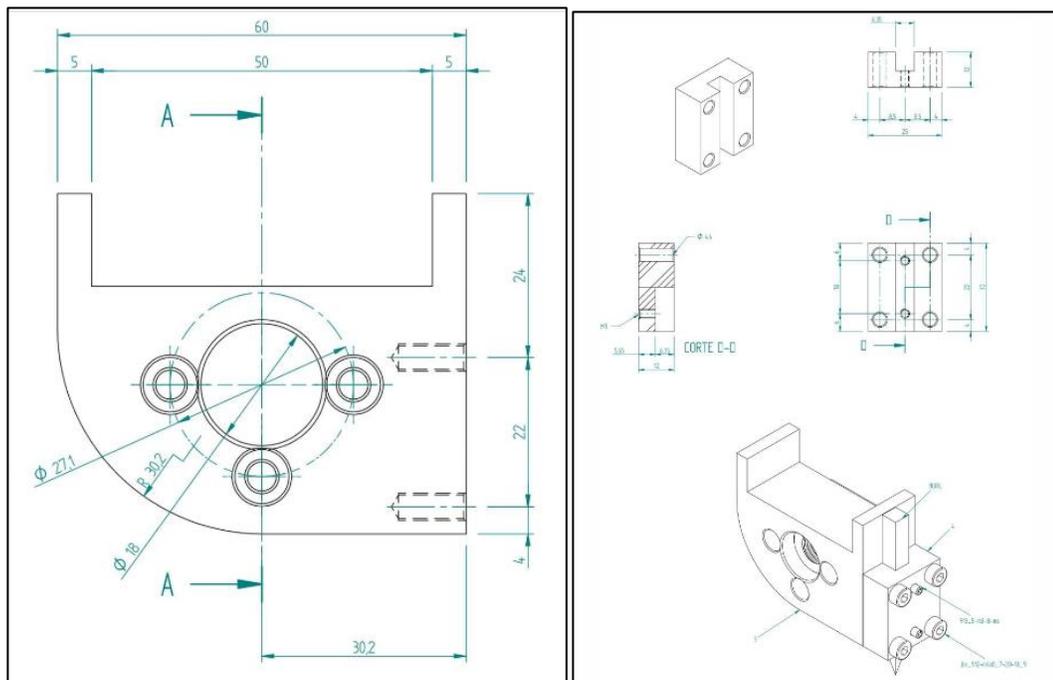
Fuente: Autores, 2023

A continuación se procedió detalladamente con el diseño del cabezal que se obtuvo de una pulidora pequeña con tornillo goloso de 1" de largo y 8 mm de ancho para poder atornillar firmemente la estructura. (Figura 20)

Figura 20. Cabezal soporte del eje

Para el despiece de la pieza que va a servir de porta viriles y que permite el desplazamiento horizontal de la herramienta de corte de 1mm aproximado por cada corte por sus partes pequeñas, se planea ordenar cortar en una CNC en master mecanizados. (Figura 22)

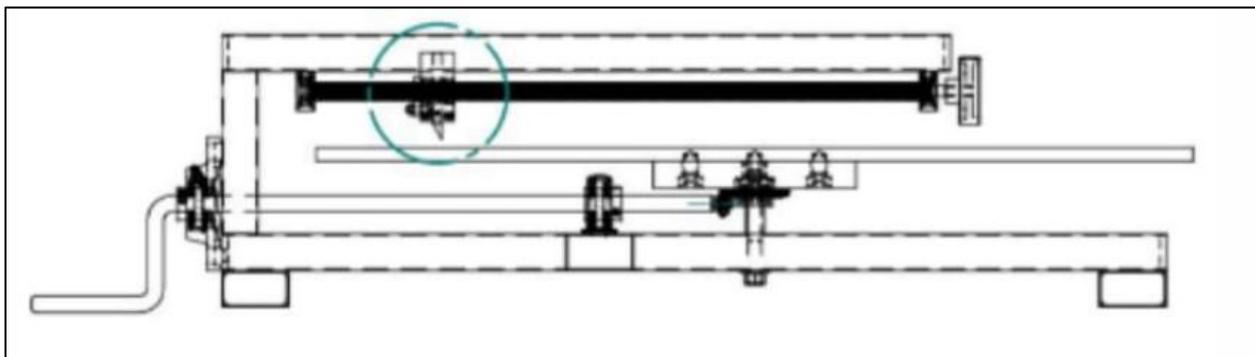
Figura 22. Despiece porta viriles



Fuente: Autores, 2023

Ahora se tiene el diseño de la máquina en pdf 3d ya con todas sus partes.

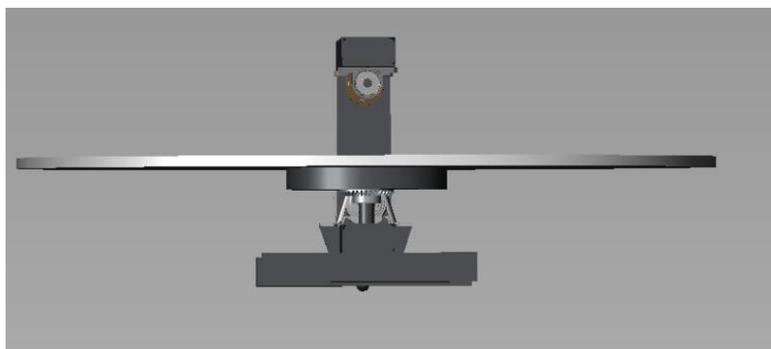
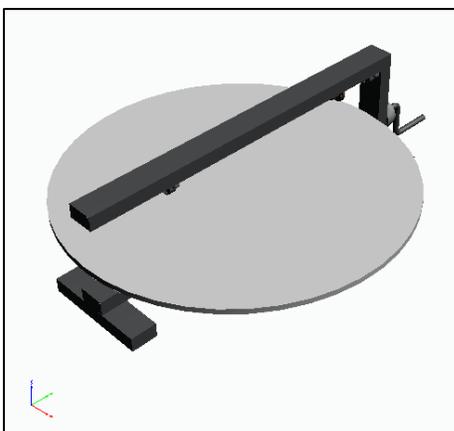
Figura 23. Diseño PDF prototipo completo



Fuente: Autores, 2023

A continuación, se presentan unas vistas de modelado en 3d Solid Word para la ejecución de la máquina prototipo. (Figura 24)

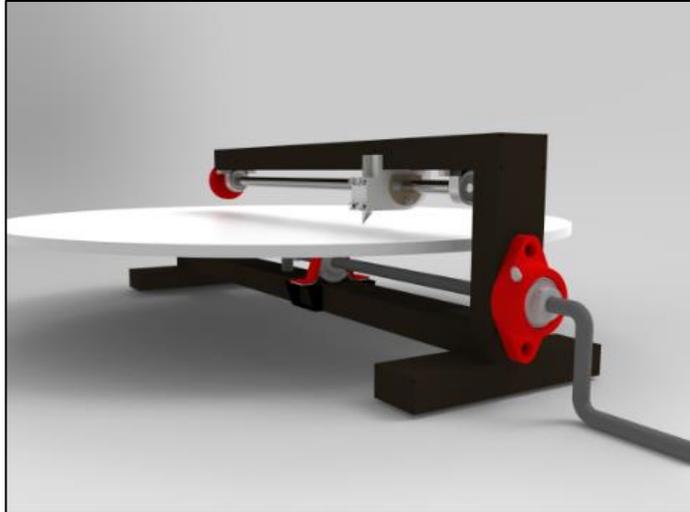
Figura 24. Modelado prototipo (vista frontal y de perfil)



Fuente: Autores, 2023

En la figura 25 se observa el modelado del prototipo terminado.

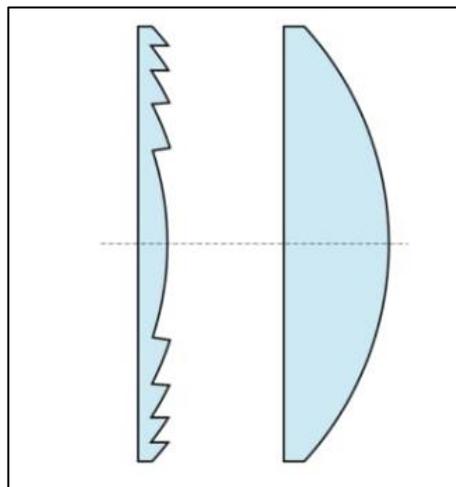
Figura 25. Modelado de la máquina terminada



Fuente: Autores, 2023

En cuanto al corte de la lente Fresnel, en la Figura 26, se puede apreciar un ejemplo de cómo debe quedar el corte para poder lograr que el acrílico concentre calor eficientemente.

Figura 26. Modelo de Corte eficiente de la lámina acrílica



Fuente: Autores, 2023

3. Ensamble y puesta en marcha el prototipo de herramienta

Para el ensamble de la máquina talladora de lentes Fresnel circulares se tuvo en cuenta los resultados de la etapa de diseño (planos, especificaciones, requerimientos técnicos, guías, etc.) y se realizaron los ajustes y pruebas necesarias que permitieron conseguir la funcionalidad deseada del prototipo.

3.1 Proceso de elaboración de máquina talladora

Primero que todo se escoge el perfil que se va a emplear para la base de la máquina con unas medidas de 4 cm x 7,5 cm. (Figura 27)

Figura 27. Perfil para la base del prototipo



Fuente: Autores, 2023

Después del diseño y teniendo una idea clara de cómo va cada parte y sus respectivas piezas se comienza con la construcción de la estructura cortando dos (2) perfiles a 70 cm y uno a 20 cm con ángulo de 45 grados para poder soldarlos entre si y soldar dos bases de 30 cm a cada extremo para darle más estabilidad, luego se aplica una base o fondo color gris. (Ver Figura 28)

Figura 28. Estructura base



Fuente: Autores, 2023

Para el corte del acrílico se adquiere una base circular de 40 cm de diámetro de material alucobond la cual sirva de plato base para el acrílico que se va a cortar.

Figura 29. Base circular de Alucobond



En los laboratorios de la Universidad Antonio Nariño – Sede Tunja, en el esmeril se elaboró una punta cóncava en un buril de acero rápido la cual va a ser la pieza de corte del acrílico, que realizado en forma adecuada, permita la concentración de calor.

En la figura 30 se muestra el resultado final de la herramienta de corte elaborada.

Figura 30. Herramienta de corte buril



Fuente: Autores, 2023

Se decidió utilizar un buril de $\frac{1}{4}$ de acero rápido y hacerle una punta en un esmeril ya que esta herramienta en acrílico podemos hacer que no tenga mucha fricción y no alcance una temperatura alta para evitar que se quemara el material en los cortes o quede en el material alguna marca se realiza con esta herramienta como prueba del prototipo.

Después se selecciona adecuadamente la varilla roscada que va a ayudar al desplazamiento de la herramienta de corte longitudinal encontrando una varilla roscada trapezoidal de 12mm T12x 500 mm de color plateado de paso 4 mm x vuelta.

Figura 31. Varilla roscada trapezoidal.



Fuente: Autores, 2023

El siguiente paso fue conseguir las chumaceras que permitieran el rodamiento y base para la varilla. Para esto, se obtuvo unas chumaceras con rodamiento de 8 mm interno de referencia comercial kp08 tamaño total: 55 x 13 x 28 mm. Diámetro interior 8 mm entre los dos agujeros de fijación 42 mm de material aleación de zinc con un peso de 38 g. (Figura 32)

Figura 32. Chumacera



Se mecanizó la varilla en los extremos en 8 mm y de largo de 1 cm a un extremo y de 2.5 cm a otro extremo donde va soldada la perilla para hacer girar la varilla; luego se fijaron las chumaceras y la varilla a la estructura con tornillo de 6 mm rosca ordinaria con dos tuercas a cada orificio. (Figura 33)

Figura 33. Fijación y acople de la varilla y chumaceras a la estructura



Fuente: Autores, 2023

Luego para fijar el soporte y hacer rotar la base se utilizó un repuesto de una pulidora, sus dos engranes, tornillo fijante y pasantes para poder ensamblarlos en el prototipo de máquina talladora de lentes Fresnel circulares. (Figura 34)

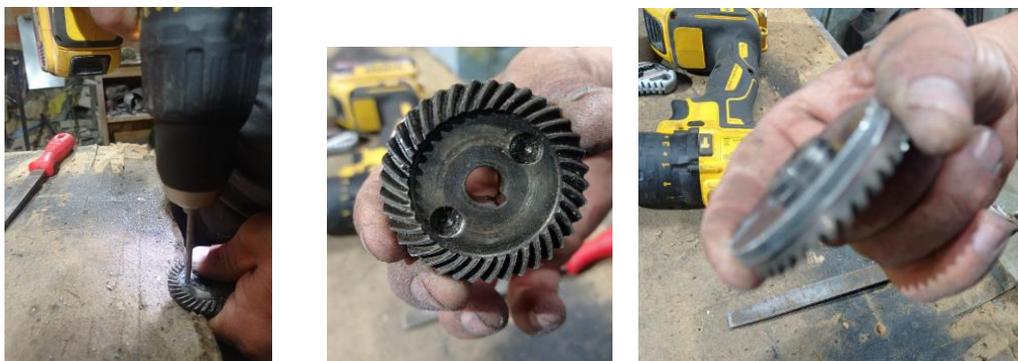
Figura 34. Fijación de Soporte



Fuente: Autores, 2023

En este paso perforamos con una broca de un cuarto para atornillar al plato la base del eje de la estructura. (Figura 35.)

Figura 35. Soportes engranes, corona



Fuente: Autores, 2023

Con estos soportes, se utilizó el piñón grande para fijar al plato base de alucobon para poder insertarlo en la base y hacerlo rotar. Luego, con un pasador soldamos en la parte baja del soporte para encontrar un punto de apoyo donde entra el rodamiento.

Figura 36. Fijación del piñón a la base



Fuente: Autores, 2023

Al mismo tiempo se suelda el piñón pequeño en una varilla lisa para hacer la polea que es la que va a dar el movimiento de rotación al plato base.

Con una pulidora y disco de corte para metal, cortamos el eje a medida de 3 mm después del eje para poder apoyar la materia prima utilizada que es el acrílico.

Luego se ensambla la base del alucobond con el engrane y con un pin # 9 ajustamos la base al eje para evitar que se salga y que haga una buena precisión en la rotación

Figura 37. Ensamble base del alucobond con engrane



Fuente: Autores, 2023

Después soldamos con láminas delgadas 6013 para poder hacer unos puntos de soldadura más finos y soldamos el engrane a la punta de la varilla lisa.

Figura 38. Fijación piñón pequeño



Fuente: Autores, 2023

Siguiendo con el proceso de construcción del prototipo, con una chumacera de diámetro de rodamiento interno de 10 mm., se asegura la varilla liza para soportar y permitir la rotación de la varilla, esta se asegura con tornillos goloso.

Figura 39. Fijación de la varilla con chumacera



Fuente: Autores, 2023

Mientras tanto, al otro lado de la base se asegura con tornillo la base del repuesto usado de la pulidora para el soporte de la varilla. (Figura 40)

Figura 40. Fijación de la base del repuesto de pulidora para soportar varilla



Fuente: Autores, 2023

Finalmente, con soldadura MIC se suelda una perilla con tornillo de 5mm a la varilla roscada para hacer la rotación de la varilla permitiendo el movimiento de la pieza porta buril, pieza que conlleva al corte en el acrílico.

Figura 41. Perilla



Fuente: Autores, 2023

Para permitir la rotación de la perilla y el movimiento de la herramienta de corte, se corta la estructura para quedar a la medida de la perilla.

Figura 42. Corte de la estructura

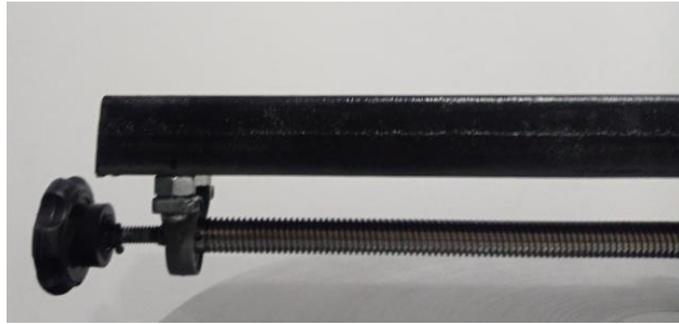
Para seguir con diseño de estructura ver en figura 12



Fuente: Autores, 2023

Luego se corta el perfil superior donde va soportada la varilla roscada y para poder permitir la rotación de la perilla cortamos a medida de 53 cm la perilla tiene un diámetro de 4 cm y queda a una distancia de 2 cm a la estructura.

Figura 43. Vista frontal de la varilla ensamblada en la estructura



Fuente: Autores, 2023

La pieza final se ordenó modelar en una CNC con el diseño en una lámina de acero de 1020. Cabe destacar que SAE 1020 es un acero de bajo contenido de carbono, de fácil mecanizado y buena soldabilidad; por su contenido de carbono estos aceros se utilizan para la fabricación de piezas estructurales o de maquinaria de mediana resistencia. (Cía. General de aceros, 2023)

Para la elaboración de la manivela, se utiliza una varilla lisa de 8 mm de diámetro y un ángulo de 90° y 9 cm de alto, a la manivela se logró darle el dobléz con una prensa.

Figura 44. Manivela



Fuente: Autores, 2023

Luego, en corte laser se hace el molde de la pieza de 46 mm de alto y 60 mm de largo para que encaje como rieles y se desplace de forma vertical en la estructura, permitiendo así el

movimiento de la herramienta de corte. Para estas medidas se ordena cortar en master mecanizados con una duración de día y medio se corta las láminas en laser.

Figura 45. Molde de la pieza porta buriles



Fuente: Autores, 2023

Después se suelda la pieza que va a hacer la presión del buril, parte por parte para hacer el cuadro que va a fijar y presionar el buril con un tornillo de presión para darle más firmeza.

Figura 46. Cuadrante de presión del buril



Fuente: Autores, 2023

Esta pieza tiene 25 mm de largo x 25 mm de ancho, con una forma de espacio cuadrada para apoyar el buril de $\frac{1}{4}$ de 6,5 mm

Ahora se hace una perforación con un taladro de árbol para poder incrustar el buje de la varilla roscada; el tiempo que se tardó en hacerse la perforación es 25 min.

Figura 47. Buje de la varilla acoplada a la porta buriles



Fuente: Autores, 2023

Posteriormente se fija con tornillos golosos de una pulgada de largo y luego se ensamblan todas las partes a la varilla roscada.

Figura 48. Ensamble de partes para la herramienta de corte



Fuente: Autores, 2023

Al ensamblarla en la estructura del prototipo, se obtiene el siguiente resultado (Figura 49).

Figura 49. Ensamble de la pieza en la estructura del prototipo



Fuente: Autores, 2023

Por último, se arreglan los detalles lijando las rebabas o sobrantes de las soldaduras, puliendo las partes y se aplica una pintura negra de poliuretano a toda la estructura base.

La máquina, ya terminada tiene las siguientes características:

Altura total: 18,5 cm

Distancia horizontal: 70 cm

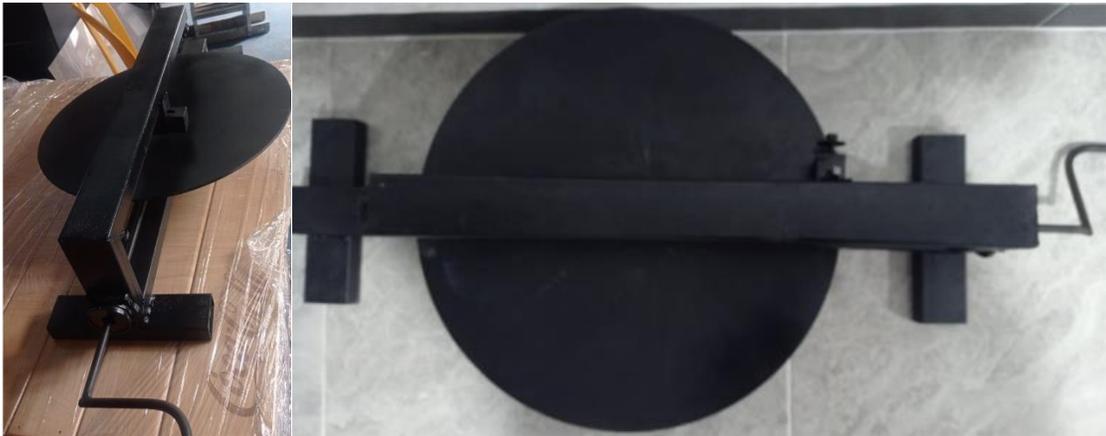
Estructura superior largo: 55 cm

Diámetro del plato base: 40 cm

Distancia del eje central a la orilla de la estructura: 34 cm

La máquina tiene un 95% de metal y aleaciones y solo la perilla es de material plástico y la base de alucobon que es una composición de dos láminas de cubierta de aluminio que la hace liviana rellena de mineral agregado; el resto de componentes son metálicos y con eso se logró un buen peso y buena estabilidad. (Figura 50)

Figura 50. Prototipo de máquina para corte de lentes Fresnel circulares terminada



Fuente: Autores, 2023

Tabla 3. Costos de materiales y procesos

No.	Material o Proceso	Valor unitario	Cantidad	Costo total
1	Perfil metálico de 70 cm	8.000	3	24.000
2	Varilla trapezoidal	110.000	1	110.000
3	Mecanizado de la varilla	20.000	2	40.000
4	Chumacera kp8	22.000	2	44.000
5	Soldadura 6013 x libra	13.000	1	13.000
6	Repuestos de pulidora	150.000	4	150.000
7	Perilla de giro	5.000	1	5.000
8	Soldadura MIC	20.000	1	20.000
9	Varilla liza x 50 cm	4.000	1	4.000
10	Tornillos goloso de 1"	200	10	2.000
11	Tuerca 5/16	250	4	1.000
12	Chumacera kp10	35.000	1	35.000
13	Rodamiento 10 mm	6.000	1	6.000
14	Corte CNC modelado	260.000	1	260.000
15	Buril 1/4	3.000	2	6.000
16	Perforación taladro de árbol	15.000	1	15.000
17	Acrílico 40 cm diámetro	50.000	1	50.000
18	Acrílico 10 cm	10.000	2	20.000
19	Mecanizado eje	20.000	1	20.000
20	Pintura negra brillante	45.000	1	45.000
21	Base de alucobon 40 cm	60.000	1	60.000
22	Otros gastos (lijas, tornillos, etc.)	320.000	1	320.000
23	Acrílico 20 cm	35000	1	35000
24	Gastos de taller herramientas	1'200000	1	1'200000
25	Gastos de traslado asesorías	1'180.000	4	1'180.000
23	Total, gastos			\$3'665.000

Fuente: Autores, 2023

4. Análisis de los resultados obtenidos respecto a la funcionalidad de la máquina talladora de lentes Fresnel circulares

En la Fase de análisis y retroalimentación, se procedió a interpretar y analizar los resultados obtenidos a través de las pruebas de funcionalidad realizadas, lo cual permitió establecer resultados esperados vs resultados encontrados, para luego, hacer los ajustes pertinentes en el sistema de tallado y en procesos, tanto mecánicos como de eficacia comprendidos en la fabricación de lentes Fresnel circulares.

4.1 Pruebas de funcionamiento del prototipo construido para el tallado de lentes Fresnel circulares

Las pruebas se iniciaron con el corte de una lámina de acrílico de 40 cm de diámetro y de 2 mm de espesor, dejando un espacio de 1 cm en la orilla por un defecto del acrílico. (Figura 51)

Figura 51. Prueba de corte de lámina de acrílico



Fuente: Autores, 2023

No se realizó con un acrílico de 60 cm que es un aspecto relacionado con el resultado esperado ya que es un material por no muy fácil de conseguir y costoso por eso se realizo con uno de 40 cm ya que con este se puede demostrar el funcionamiento la máquina tiene la capacidad para elaborar una prueba de hasta 75 cm de diámetro superando la medida promedio

El primer corte, se hace con una profundidad muy superficial, de menos de un milímetro y se nota que al hacer la primera vuelta muestra unos resultados aceptables; la circunferencia la marca de manera óptima y por ende la estabilidad de la máquina es buena. El tiempo de duración de las primeras circunferencias es de 1min 51 segundos.

Figura 52. Primeros cortes de acrílico



Fuente: Autores, 2023

Después de las primeras circunferencias se puede observar unos buenos cortes. Sin embargo, para evitar un poco de fricción y quemar el acrílico con el buril se usa agua y se aplica directamente con una jeringa de 9 cm como refrigerante y hacer el corte más limpio.

Figura 53. Corte para aplicar agua como refrigerante



Fuente: Autores, 2023

Ya en el centro del corte, por la distancia los cortes son más rápidos y las circunferencias más límpidas. A simple vista se muestra que la máquina funciona y se esperan buenos resultados en el acrílico (Figura 54)

Figura 54. Corte al centro de la lámina de acrílico



Fuente: Autores, 2023

Terminando los cortes se evidencia que el diseño tuvo un error al poner el buril a un lado y no encima del eje central, lo cual no permite hacer circunferencias hasta el punto centro.

Figura 55. Corte por error en ubicación del buril



Fuente: Autores, 2023

Así quedó finalmente la lente Fresnel circular.

Figura 56. Lente Fresnel terminada



Fuente: Autores, 2023

Haciendo la comparación con el lente resnel que esta en la universidad Antonio Nariño sede tunja que es el objetivo al que teníamos previsto podemos observar que nos acercamos al objetivo principal de nuestro proyecto

Figura 57. Lente Fresnel



El resultado final de la fabricación de la lente Fresnel, después de limpiarla con agua y quitarle todos los restos y esquirlas de los cortes, evidencia una superficie lisa y con buenos resultados; la máquina funciona como esperábamos. Respecto al tiempo de elaboración de esa pieza fue de 3 horas 50 minutos, la herramienta del corte no presenta desgaste y la máquina no presentó problemas ni fallas en su uso los resultados del acrílico al trabajarlos con el prototipo muestran que en una pieza de acrílico se puede hacer el tallado con una mejor herramienta de corte y de forma mas automatizada se podría lograr unos resultados mas precisos

Conclusiones

Con la realización de esta investigación se logró el corte de un prototipo de lente Fresnel con buenas características, la herramienta de corte funcionó como se esperaba y la máquina trabajó con buena eficiencia y seguridad, estable y precisa. Asimismo, los componentes funcionaron a la perfección y cada pieza cumplió con su objetivo. Por otro lado, los costos de la máquina fueron los que se promediaron en el anteproyecto, o sea, dentro del margen establecido, no así el tiempo de elaboración, que fue más de lo planeado, ya que para adquirir las partes fue muy complicado pues algunas, se tuvieron que adaptar, ya que comercialmente son muy escasas pero

Se logro construir una máquina capaz de tallar una lente Fresnel con buenas características de seguridad, precisión y eficiencia tal como fue planeado, además se logró elaborar una lente de 40 cm de diámetro. La máquina tiene un 95% de metal y aleaciones y solo la perilla es de material plástico y la base de alucobond que es una composición de dos láminas de cubierta de aluminio que la hace liviana rellena de mineral agregado; el resto de componentes son metálicos y con eso se logró un buen peso y buena estabilidad y el resultado final de la fabricación del prototipo lente Fresnel, después de limpiarla con agua y quitarle todos los restos y esquirlas de los cortes, evidencia una superficie lisa y con buen rendimiento funcional. La herramienta del corte no presentó desgaste y la máquina no presentó problemas ni fallas en su uso po eso el prototipo de máquina manual realizado para el corte de lentes Fresnel da fácil acceso a soluciones de ingeniería que permiten el aprovechamiento de energías renovables en múltiples usos.

Recomendaciones

Rediseñar la parte del porta buriles para poder hacer cortes hasta el centro, ya que no se logró llegar al centro del material por dejar la herramienta a 3 cm del punto centro.

Automatizar y seleccionar una herramienta de corte mas precisa para lograr mejores resultados en cuanto a la concentración de calor

Hacer un estudio detallado de refrigerantes para evitar fricción y maras en los cortes.

Referencias Bibliográficas

- Benítez, P., Miñano, J C., Zamora, P. Mohedano, R. Cvetkovic, A., Buljan, M., Chaves, J. & Hernández M. (2010) "*Concentrador fotovoltaico de alto rendimiento basado en Fresnel*", Opt. Expreso 18, A25-A40
<https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-18-S1-A25&id=198413>
- Cía. General de aceros (2023) *Acero AISI/SAE 1020*. Colombia
<https://www.cga.com.co/producto/acero-aisi-sae-1020/>
- Coco Enríquez. L. (2017) *Nueva generación de centrales termosolares con colectores solares lineales acoplados a ciclos supercríticos de potencia*. Escuela técnica superior de ingenieros industriales. Universidad Politécnica de Madrid. España. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Energética.

https://oa.upm.es/44002/1/LUIS_COCCO_ENRIQUEZ.pdf

Concentradores Solares (s.f.)

<https://www.unida.org.ar/Virtuales/Energias/Clase%204/CONCENTRADORES%20SOLARES.pdf>

Concentrador óptico (s.f.) <https://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>

Chemisana Villegas, D. (2009) Diseño y caracterización de un concentrador térmico – fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica. Área de Física Aplicada del Departamento de Medio Ambiente y Ciències del Sòl. Universitat de Lleida. Lleida, marzo de 2009. España. <https://repositori.udl.cat/handle/10459.1/63741>

E-Tay industrial.co.ltd. (s.f) *¿Qué es la Lente de Fresnel?* Taiwán

<https://www.mymagnifier.com/es/faq/E-TAY-faq-001.html>

Friedman Ramírez, D. I. (2017) Sistema de Concentración Solar Fresnel para Aplicaciones Solares a Escala Comunitaria, Evaluación de Prototipo. Universidad de Chile, Facultad de ciencias en física y matemáticas. Dpto. de ingeniería eléctrica. Santiago de Chile.

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/145345/Sistema-de-concentracion-solar-Fresnel-para-aplicaciones-solares-a-escala-comunitaria.pdf?sequence=1>

Gómez Ramírez, J. (2018) La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas. Universidad santo Tomás, Colombia.

<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/10312>

Godínez Granados, G. (2018) *Diseño de un reflector Fresnel de foco lineal para aplicaciones de calor de procesos*. Junio de 2018 León, Guanajuato, México. Revista: Centro de investigaciones en óptica, A.C.

<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/772/1/17422.pdf>

HoSung Lee. (2010). *Thermal Desing*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Concentradores solares PDF (s.f.) Concentración de la radiación solar.

<https://www.unida.org.ar/Virtuales/Energias/Clase%204/CONCENTRADORES%20SOLARES.pdf>

Jaramillo Mora, A. (2017) *Diseño de un receptor solar para experimentación*. Universidad Nacional Autónoma de México Programa de maestría y doctorado en ingeniería, ingeniería mecánica – mecatrónica, tesis que para optar por el grado de maestro en ingeniería, Facultad de ingeniería México, D. F., octubre 2017.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/13706/1/tesis.pdf>

Jiménez Flores, A. (2017) *Comparación de modelos físicos de un captador solar Fresnel* Departamento de Ingeniería Energética. Grupo Termotecnia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla,

https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/66510/TFG_%20Antonio%20Jim%C3%A9nez%20Flores.pdf?sequence=1&isAllowed=y

López Álvarez J. A. (2017) *Análisis óptico y energético de un captador Fresnel*. Departamento Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2017

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/71050/fichero/1050-LOPEZ.pdf>

Martín Macareno C., Gallego A. J., M. Robledo, E. F Camacho (2011) *Modelado y Control de un Captador Solar Tipo Fresnel*. Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla Camino de los Descubrimientos s/n 41092 Sevilla, España. <https://www.researchgate.net/publication/332902070>

Militão Dib, M. H.; & Colafemina, J. P. (2011) Computer Aided Design of Fresnel Lenses (Diseño de lentes Fresnel asistido por ordenador). Departamento de Tecnología Mecánica del Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de São Paulo, Brasil. *Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 11 a 15 de Abril de 2011. Caxias do Sul – RS.*

Naciones Unidas (2018), *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.

Platzer, W. J., Mills, D., & Gardner, W. (2021). Chapter 6—Linear Fresnel Collector (LFC) solar thermal technology. En K. Lovegrove & W. Stein (Eds.), *Concentrating Solar Power Technology (Second Edition)* (pp. 165–217). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00006-2>

Rátiva Robayo, W. H. y Suárez Arenas, J. E. (2018) *Perfeccionamiento de calefactor solar cónico y análisis comparativo con calefactor solar tubular*. Universidad Antonio Nariño Facultad de ingeniería mecánica, electrónica y biomédica, programa de electromecánica. Tunja, Colombia.

Rivera, G., y Tovar, F. (2016) Prototipo de un colector solar parabólico para la generación de energía eléctrica. *UGCiencia* 22, 149-158.

[https://revistas.ugca.edu.co/Texto%20del%20artículo-2412-1-10-20170328%20\(2\).pdf](https://revistas.ugca.edu.co/Texto%20del%20artículo-2412-1-10-20170328%20(2).pdf)

Sabogal Paz, N. (2019). Diseño de prototipo de desalinizador solar por proceso de humidificación y deshumidificación. *instname:Universidad de los Andes*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/45547>

Solar Concentra, *Mercado potencial en España y aplicaciones en tecnologías solares de concentración de media temperatura*, 2015.

<http://www.solarconcentra.org/wp-content/uploads/2017/05/Mercado-potencial-y-aplicaciones-tecnologicas-solares-de-concentracion-de-media-temperatura.pdf>

- Shrivastava, R. L., Vinod Kumar, & Untawale, S. P. (2017b). Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 126–143. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.005>
- Sierra, C. & Vázquez, A. J. (2005). *NiAl coatings on carbon steel by self-propagating high-temperature synthesis assisted with concentrated solar energy: mass influence on adherence and porosity*. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 86, 33 - 42. 2015, Noviembre, De ScienceDirect Base de datos.
- Tarazona-Romero B.E., J.G Ascanio-Villabona, L. Betancur-Arboleda, L. R. Páez-Castro, Mauro Alejandro Uribe Sanabria (2021) Estudio del rendimiento de un dispositivo de reflector Lineal Fresnel (LFC) aplicando los softwares TRNSYS y Sol Trace. Departamento de Ingeniería Electromecánica, Unidades Tecnológicas de Santander. <https://www.researchgate.net/publication/353665643>
- Thorsten Schult, T. Neubauer, M, Bessler, Y.; Nitz, P.; y Gombert. A. (2009) Temperature Dependence of Fresnel Lenses for Concentrating Photovoltaics (Dependencia de la temperatura de lentes Fresnel por concentración fotovoltaica).
- Villar Fernández, L. (2018) *Análisis paramétrico de una instalación de energía solar para generación de vapor en el sector industrial*. Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. Sevilla, España. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91686/fichero/TFG-1686-VILLAR.pdf>
- Villar Fernández, R. (2011) *Estudio del rendimiento óptico de un captador Fresnel*

<https://docplayer.es/72414958-Rafael-villar-fernandez-estudio-del-rendimiento-optico-de-un-captador-fresnel.html>

Vizcay Alonso, Mikel. (2020) *Resolución numérica de la transferencia de calor en situaciones de interés en sistemas termo-solares*. Universidad politécnica de Catalunya, Barcelona, España. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/333129>

UniverseOptical.Com (s.f) *Qué es una lente Fresnel*. España. <https://www.universeoptics.com/es/que-es-una-lente-fresnel/>

Wendelin, T., Jorgensen, G., & USDOE. (2018). *SolTrace*. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). <https://doi.org/10.11578/dc.20190312.6>

Xie F. and Zhang, G. (2011) "Simulation and Analysis of Computer Control Tracking System Based on Solar Geometric for Fresnel Lenses Concentration Photovoltaics," *2011 Third International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2011, pp. 101-104. Hangzhou, China. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6038156>

Anexos

Evidencias fotográficas









