

Diseño conceptual de concentrador solar de disco parabólico para generar energía térmica de alta temperatura

Conceptual design of parabolic dish solar concentrator to generate high temperature thermal energy

Wuilber Clemente* ; Ciro Espinoza; Carlos Martínez

Centro de Energías Renovables, Universidad Nacional del Centro del Perú. 12006, Huancayo-Perú

*wcclemente@uncp.edu.pe

Recibido: 10 marzo de 2021. Aceptado: 01 junio, 2021. Versión final: 10 diciembre, 2021

Resumen

La energía solar es la fuente de energía más abundante que debe utilizarse para afrontar la crisis energética mundial y reducir la acumulación de gases de efecto invernadero que influyen en el cambio climático. En esta investigación se diseña, de manera conceptual, un concentrador solar de disco parabólico para generar calor en el punto focal con una temperatura superior a los 400°C para aplicaciones múltiples como, generación de vapor, calentamiento de agua, cocción de alimentos o almacenamiento de calor. La metodología empleada se desarrolla en tres etapas: Definición del problema mediante la identificación de necesidades de los usuarios; determinación del concepto de solución mediante la evaluación de combinación de portadores de función de los componentes; y elección de la configuración, las dimensiones y los materiales, mediante la simulación del elemento esencial que es el disco parabólico con el software SolTrace.

Palabras clave: Energía renovable; energía solar; ingeniería térmica; diseño conceptual.

Abstract

Solar energy is the most abundant source of energy that must be used to face the global energy crisis and reduce the accumulation of greenhouse gases that influence climate change. In this research, a parabolic disk solar concentrator is conceptually designed to generate heat at the focal point with a temperature higher than 400 ° C for multiple applications such as steam generation, water heating, food cooking or storage. of heat. The methodology used is developed in three stages: Definition of the problem by identifying user needs; determination of the solution concept by evaluating the combination of function carriers of the components; and choice of configuration, dimensions and materials, by simulating the essential element that is the parabolic disk with the SolTrace software.

Keywords: Renewable energy; solar energy; thermal engineering; conceptual design.

ISSN impreso: 1657-6527, ISSN en línea: 2145-8502, CC BY 

Forma de citar: Clemente, W., & Espinoza, C. (2021). Diseño conceptual de concentrador solar de disco parabólico para generar energía térmica de alta temperatura. Revista Fuentes, El Reventón Energético, 19(2), 83–94. <https://doi.org/10.18273/revfue.v19n2-2021006>

1. Introducción

La energía solar, es la fuente de energía más abundante que se dispone para afrontar la crisis energética mundial debido a la demanda de energía por el crecimiento demográfico que se incrementa cada año en siete millones de personas (Naciones Unidas, 2017); generando el agotamiento de combustibles fósiles (Fuqiang *et al.*, 2017); y como consecuencia se acumulan más gases de efecto invernadero que aceleran el cambio climático (Edenhofer *et al.*, 2014). Para mitigar el cambio climático, el rediseño de nuevas tecnologías debe realizarse utilizando directamente la energía del sol y sistemas pequeños que requieren poca inversión. La utilización directa de la radiación solar es uno de los principios de la ecología porque no genera residuos (Capra, 2002). Es una energía de alta calidad, necesaria para la nueva tecnología, ya que permite generar energía con mayor eficiencia, con una planta más pequeña y una rápida recuperación de la inversión (Salgado Conrado *et al.*, 2017). Las tecnologías de energía solar concentrada satisfacen con mayor eficiencia las demandas de energía térmica y eléctrica (Zou *et al.*, 2017).

Las tecnologías de energía solar concentrada producen calor de media y alta temperatura en un área focal relativamente pequeña mediante espejos o lentes (Fuqiang *et al.*, 2016). La reducción de pérdidas de calor por convección y conducción se consigue aumentando la temperatura de funcionamiento y reduciendo la superficie de absorción (Cabeza *et al.*, 2017). Estos principios se aplican a concentradores de plato parabólico, concentradores cilindro-parabólicos, reflector de Fresnel lineal y concentrador de torre central (Chen & Wang, 2020). Para los propósitos de esta investigación se revisó cómo mejorar la eficiencia en concentradores de plato parabólico y concentradores cilindro-parabólicos.

Las tecnologías de energía solar concentrada se aprovechan de manera directa o indirecta en la generación de electricidad (Jones *et al.*, 2020), el almacenamiento de energía térmica para diferentes aplicaciones (Asma & Youssef, 2018), el bombeo de agua (Megalingam & Gedela, 2017), la climatización de ambientes (Ahmed *et al.*, 2017), diseño de cocinas y hornos solares (Bhave & Kale, 2020) y en sistemas termo solares de media y alta temperatura.

Se han realizado varias contribuciones importantes en los concentradores cilíndricos parabólicos para mejorar el rendimiento térmico; optimizado los

parámetros geométricos de la superficie colectora y del tubo receptor, mejorando los sistemas de almacenamiento térmico y los sistemas de seguimiento; utilizando nuevos materiales en la superficie reflectora e incorporando nanopartículas en el fluido de transferencia térmica (Salgado Conrado *et al.*, 2017). La mejora del rendimiento de estos concentradores se pudo lograr con métodos de modificación óptica, incrementando la relación de concentración para lograr temperaturas de operación más altas; la mejora en el sistema de seguimiento pudo aportar un incremento del 5%; donde las modificaciones térmicas solo aportaron un 2%, pero el uso de aislamiento en la parte superior del absorbedor redujo el costo del receptor en aproximadamente un 20% (Bellos & Tzivanidis, 2019). Una cocina solar construida con el principio de concentrador cilíndrico parabólico, con área de apertura de 1,3 m² y área de receptor de 0,087 m²; utilizando radiación solar de 550 W/m², alcanzó la temperatura de 250 °C, y con una radiación solar de 600 W/m², alcanzó la temperatura de 370 °C (El Moussaoui *et al.*, 2020).

Los concentradores de disco parabólico son los que logran mayores temperaturas por su mayor relación de concentración. Con la modificación del concentrador tipo tazón solar, se logró obtener una temperatura máxima del aceite de salida igual a 450 °C y una temperatura nominal para el funcionamiento continuo de 425 °C (Cagnoli *et al.*, 2020). Las aplicaciones de este tipo de colectores se dan con mayor frecuencia en cocinas y hornos solares. Otra investigación comparó tres prototipos de cocina solar de plato parabólicas, con un diámetro de apertura de 62 cm, una profundidad de paraboloide de 5,5 cm y una distancia focal de 44 cm, utilizando distintos materiales reflejantes para concentrar la radiación solar: acero inoxidable, papel de aluminio y cinta Mylar; con el primero se logró calentar agua a 58,2 °C, con el segundo y tercero se alcanzó una temperatura máxima del agua de 74,5 °C (Ahmed *et al.*, 2020). Una cocina solar fabricada con láminas de aluminio reflectante, con diámetro de apertura de 140 cm, una profundidad de paraboloide de 70 cm, una distancia focal de 28 cm, una relación de concentración de 25, una irradiancia media de 838 W/m², y una prueba sin carga, alcanzó la temperatura máxima 212 °C y la temperatura de estancamiento de 188 °C (Mekonnen *et al.*, 2020). Otra cocina solar con almacenamiento de calor, utilizando un plato parabólico cubierto de aluminio pulido, con diámetro de apertura de del plato de 120 cm, una profundidad de paraboloide de 10 cm y una distancia focal de 90 cm; con un sistema de almacenamiento de calor en dos kilogramos de sal

solar; utilizando una radiación solar de 550 W/m^2 , logró almacenar calor en el punto de fusión de 220° durante 110 minutos (Bhave & Kale, 2020).

El propósito de esta investigación es diseñar de manera conceptual un concentrador solar parabólico, a fin de que ésta pueda generar calor en el punto focal a una temperatura superior a los 400°C , para aplicaciones múltiples, como generación de vapor, calentamiento de agua, cocción de alimentos, o almacenamiento de calor.

2. Metodología

El diseño conceptual y categorial del concentrador solar parabólico de disco se realizó para las condiciones climáticas del Valle del Mantaro, localizado a $3\ 300 \text{ m.s.n.m.}$, con latitud $12,0313669^\circ \text{ S}$ y longitud $75,2352870^\circ \text{ W}$; con irradiancia solar de onda corta de 424 w/m^2 y temperatura ambiental promedio anual de $14,3^\circ\text{C}$ (Espinoza *et al.*, 2020). El proceso de diseño se desarrolla en cuatro etapas: definición del problema, diseño conceptual, diseño categorial y prototipado (Espinoza, 2013).

Definición del problema. La definición del problema se realiza mediante la identificación inicial de la necesidad que debe cubrir el concentrador solar, con el cual se definen los requisitos que debe cumplir. La descripción de necesidades se realiza con el registro de información sin procesar tomada de los usuarios de concentradores solares parabólicos, de artículos científicos y de patentes, para luego enunciarlas en términos de atributos priorizados del concentrador solar; la priorización se cuantificó mediante la opinión del equipo de desarrollo. Las necesidades se describen en términos de lo que el producto tiene que hacer manteniendo el mismo nivel de detalle de la información recogido del cliente y expresándolo en términos de atributo del producto (Ulrich & Eppinger, 2013).

Los requisitos del concentrador solar se definieron traduciendo la descripción de necesidades en términos de funciones que debe cumplir el producto. El grupo de diseño establece un conjunto de especificaciones que explican con detalles precisos y medibles lo que el objeto tiene que hacer, para satisfacer las necesidades del usuario (Ulrich & Eppinger, 2013). La lista de requisitos se verificó respondiendo a las preguntas: ¿Cuáles son los objetivos que la solución debe satisfacer?, ¿Qué propiedades debe tener? y ¿Qué propiedades no debe tener? (Pahl *et al.*, 2007).

Diseño conceptual. El diseño conceptual del concentrador solar se realizó identificando el objeto a través de una caja negra, la identificación de sus elementos, la definición de sus funciones y la identificación de los portadores de función de los elementos, con los cuales quedó definido el concepto de la solución. El diseño conceptual determina la estructura funcional del objeto de diseño, proporciona funciones detalladas y comprensibles, para facilitar la búsqueda de principios para las subfunciones, cuya combinación debe dar el principio de solución para la función del objeto (Riba, 2002).

La identificación del concentrador solar se realizó con una caja negra, que relaciona el objeto con su entorno a través de las entradas y salidas, que también facilitan la definición de la función del objeto expresado como transformación de entradas en salidas (C. A. Espinoza, 2014). La identificación de los elementos se ejecutó a través de un análisis que relaciona los elementos en una caja blanca y una matriz que sintetiza las funciones y determina los elementos esenciales y secundarios del concentrador solar. La identificación de los portadores de función de los elementos del colector solar se expresó en una matriz morfológica que permite evaluar la estructura que tendrá el concepto de solución. El concepto de solución es una descripción concisa y aproximada de los principios tecnológicos y la forma que tendrá un producto, expresado con bosquejos y una breve descripción conceptual (Ulrich & Eppinger, 2013).

Para la evaluación de las alternativas propuestas en la matriz morfológica se utilizó las directrices de la norma VDI 2225. Estas directrices permiten seleccionar la solución a partir de las necesidades traducidas en requisitos, de las propiedades técnicas generales y los factores económicos seleccionados, asignando puntajes de 0 a 4 para las categorías de insatisfactorio, tolerable, adecuado, bueno y muy bueno, respectivamente (Pahl *et al.*, 2007).

Diseño categorial. En esta etapa, la configuración y el dimensionamiento se realizó de forma aproximada, ya que sirvió para construir el prototipo que será evaluado experimentalmente en otra investigación. El diseño categorial se inicia configurando y dimensionando en forma aproximada, seleccionando los materiales y procesos de fabricación con fines de evaluación que servirá de base para realizar el diseño definitivo (Espinoza, 2013). El elemento principal es el disco

parabólico, que debe tener forma paraboloidal, y que permita reflejar los rayos solares hacia el absorbedor, para este fin se utilizó el software SolTrace 3.1.0. Las herramientas de software de SolTrace se utilizan para predecir el trazado de los rayos solares que llegan al concentrador y lo reflejan al foco, ayudando a estudiar los efectos de la intensidad del flujo de calor solar siguiendo cuatro etapas: la posición del sol, las propiedades de los elementos ópticos, la geometría de los elementos y el flujo de calor de contorno (Wendelin *et al.*, 2013).

Finalmente se construyó un prototipo con la finalidad de evaluar su funcionamiento y la configuración ergonómica y geométrica de acuerdo con los requisitos. El prototipado

se realiza mediante la construcción del objeto de diseño para evaluar aspectos estéticos, ergonómicos, geométricos y funcionales (Espinoza, 2013).

3. Resultados

Descripción de las necesidades. Las necesidades del usuario se registraron como información sin procesar para luego enunciarlos en términos de atributo del producto priorizados (Tabla 1). De los enunciados se identificaron tres necesidades importantes: que la temperatura en el foco sea mayor a 400°C, que el perfil del concentrador sea parabólico y tenga un seguidor solar de dos grados de libertad.

Tabla 1. Necesidades para el diseño del concentrador solar

Información sin procesar	Enunciado de la necesidad	Jerarquía	Importancia
Se desea que eleve la temperatura con rapidez	Que el diseño del perfil del concentrador sea parabólico	2	X
Se desea que la temperatura sea superior a 400 °C	Temperatura en el foco mayor a 400°C	1	X
Se desea que la fabricación del concentrador sea fácil	Fabricación del concentrador con espejo conformado.	4	
Se desea que aproveche al máximo la radiación solar	Estructurar con seguidor de dos grados de libertad	3	X
Se desea que el sistema sea portátil.	Módulo transportable	6	
Se desea que el sistema no emita GEI al ambiente	Baja emisión del GEI	7	
Se desea que el sistema sea seguro para manipular objetos calientes	Resistente a cargas estáticas y aislantes térmicos	5	

Requisitos para el diseño. La lista de requisitos para el diseño del concentrador solar se define al traducir el enunciado de las necesidades (Tabla 2). Los requerimientos se han agrupado en siete factores o atributos que debe tener el sistema, los más importantes

requieren que se genere más de 400°C, a una distancia focal de 1000 mm, y que el seguidor solar pueda desplazarse con un ángulo azimutal de 0° a 180° y con ángulo de elevación de 0° a 90°.

Tabla 2. Lista de requisitos para el diseño del concentrador solar

Factor	Requerimientos de diseño
Energía	Generar energía térmica en el foco mayor a 400°C
Geometría	Configurar un concentrador parabólico con una distancia focal de 1000 mm
Cinemática	Tener un movimiento azimutal de 0° a 180°, y movimiento de elevación de 0° a 90°
Material	El concentrador se construirá de espejo laminado conformable de 6 mm. El absorbedor debe estar aislado térmicamente. La estructura debe ser resistente a cargas estáticas y dinámicas.
Ergonomía	Los elementos de operación, control y medición deben ser ubicados de acuerdo con las medidas antropométricas de un poblador peruano.
Seguridad	La operación y el mantenimiento debe ser seguro para el operador
Transporte	El sistema debe ser transportable, con la finalidad trasladarlo para hacer mediciones bajo diversas condiciones.

El problema de diseño queda definido con la siguiente pregunta: ¿Cómo configurar un concentrador solar para aprovechar al máximo la radiación solar y superar la temperatura de 400°C rápidamente?

Diseño conceptual. El diseño conceptual del concentrador solar se inicia con la identificación del objeto de diseño, de sus elementos, la definición de las funciones de cada elemento, la variedad de portadores

de función y se concluye con una evaluación para determinar su concepto de solución.

El objeto de diseño es un colector solar de incidencia directa, cuya función es elevar la temperatura de un fluido térmico a una temperatura mayor de 400°C, utilizando como energía la radiación solar para luego concentrarlo con un disco parabólico (Figura 1a).

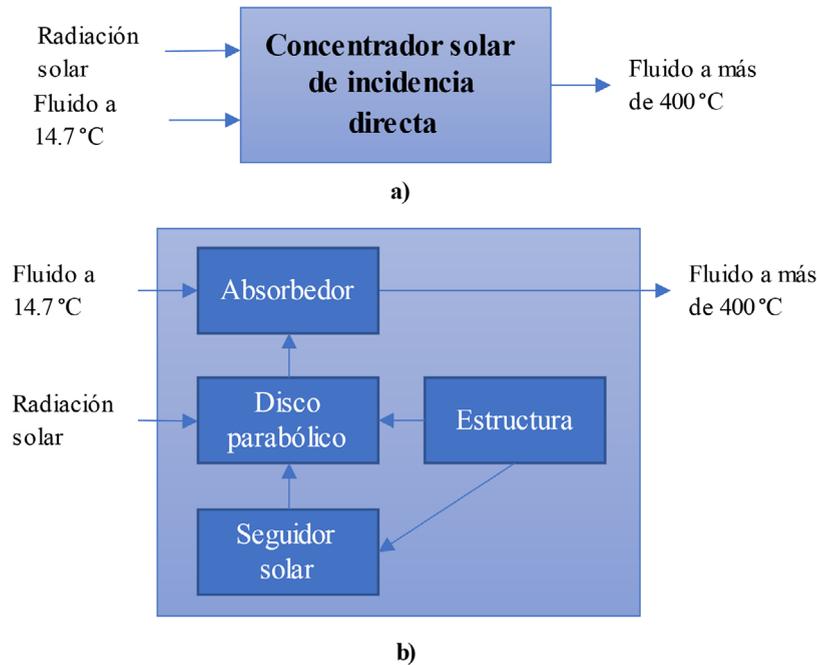


Figura 1. Modelo del concentrador solar, a) relación con el entorno, b) elementos del concentrador solar.

En la figura 1b se presenta la organización de los elementos del concentrador solar y la forma como están relacionados sus elementos, lo cual permite definir la función específica que realiza, el flujo que se produce y el principio que se aplica (Tabla 3). El disco parabólico permite el flujo de la radiación solar para concentrarlo en el absorbedor mediante el principio óptico de reflexión. El absorbedor permite el flujo de la energía térmica hacia el fluido de transferencia

térmica mediante el principio de transferencia de calor por conducción. El seguidor solar hace que el disco parabólico se mantenga perpendicular a la radiación solar mediante un mecanismo de dos grados de libertad y la estructura soporta todos los elementos y el movimiento del disco y el mecanismo mediante una estructura estática debido a que la velocidad de movimiento es baja.

Tabla 3. Función de los elementos del concentrador solar y principio utilizado

Elemento	Función	Principio
Disco parabólico	Concentrar la radiación solar en el absorbedor	Óptico
Absorbedor	Calentar el fluido de transferencia térmica	Transferencia de calor
Seguidor solar	Mover disco parabólico perpendicular a la radiación solar	Mecanismo de dos grados de libertad
Estructura	Soportar el peso y movimiento de los elementos.	Estructura estática

Con la función definida de cada elemento, se procedió a identificar los portadores de función, expresándolo en una matriz morfológica que permite contar con alternativas para determinar posibles soluciones. Se

ha propuesto tres alternativas para cada una de las funciones parciales del concentrador solar, luego de la evaluación se selecciona la solución III, por cumplir los requisitos de diseño (Tabla 4).

Tabla 4. Matriz morfológica del Concentrador solar

Funciones parciales	Portadores de función		
	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03
Concentrar la radiación solar	Parábola de espejo segmentado	Parábola de espejo conformado	Parábola de plancha inoxidable
Calentar fluido de transferencia térmica	Serpentín de cobre	Serpentín de acero	Cubo cilíndrico
Mover disco parabólico	Mecanismo de dos grados de libertad	Mecanismo de un grado de libertad	Mecanismo Manual
Soportar peso de elementos	Estructura tipo pórtico	Estructura tipo torre	Estructura tipo trípode
SOLUCIÓN	Solución II	Solución I	Solución III

Se evaluaron los requisitos de diseño, las propiedades técnicas y los criterios económicos de las tres posibles soluciones conceptuales presentadas en la matriz morfológica (Tabla 4). En las tres evaluaciones, la solución III obtuvo la mayor ratio (Tablas 5, 6 y 7).

Tabla 5. Evaluación de requisitos de diseño

Criterios técnicos	Soluciones		
	I	II	III
1) Energía	3	3	4
2) Geometría	3	3	3
3) Cinemática	3	3	4
4) Material	3	3	4
5) Ergonomía	3	3	3
6) Seguridad	3	4	3
7) Transporte	2	2	3
Total	20	21	24
$Ratio = \frac{Total}{28}$	0,71	0.75	0.86

Tabla 6. Evaluación de las propiedades técnicas de las soluciones

Criterios técnicos	Soluciones		
	I	II	III
1) Acción sobre el flujo	2	3	3
2) Modelo de funcionamiento	3	3	3
3) Ajuste fiable y precisa	2	2	4
4) Uso razonable de energía	3	3	4
5) Pocas piezas	2	4	3
6) Fabricación sencilla	2	3	2
7) Fácil montaje	2	3	3
8) Funcionamiento sencillo	3	3	3
9) Mantenimiento sencillo	2	2	3
10) Fácil utilización	4	3	4
Total	23	29	32
$Ratio = \frac{Total}{40}$	0,63	0.73	0.80

Tabla 7. Evaluación de criterios económicos de las soluciones

Criterios económicos	Soluciones		
	I	II	III
Bajo costo de material	2	3	3
Bajo costo de ensamblaje	3	2	4
Tiempo de prueba corto	3	2	3
Posibilidad de fabricar en taller propio	3	3	2
Bajo costo de fabricación	3	3	3
Total	14	13	15
$Ratio = \frac{Total}{20}$	0,70	0.65	0.75

En la Figura 2, se presenta la comparación de las evaluaciones de las propiedades técnicas y los criterios económicos, donde se observa que la solución III se ubica al lado derecho superior y muy próximo a la línea diagonal. Entonces, la solución conceptual III es la que se selecciona para la siguiente etapa de diseño.

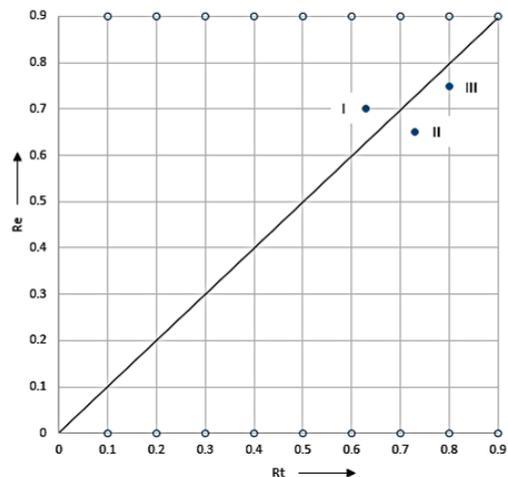


Figura 2. Comparación de ratio de propiedades técnicas y criterios económicos

Diseño categorial. El diseño categorial se desarrolla mediante la definición del modelo y la simulación de los componentes esenciales que son el disco parabólico y el absorbedor.

El diseño del concentrador solar de disco parabólico se desarrolla mediante modelos matemáticos, y los resultados de la aplicación se registran en la Tabla 8. Se inicia con la ecuación general de la parábola y la vista de sección del disco parabólico representado en la Figura 3.

$$x^2=4fy \tag{1}$$

El diámetro de la apertura del concentrador se puede determinar reemplazando las coordenadas (x,y) por (a/2,h) mediante la relación.

$$(a/2)^2=4fh \tag{2}$$

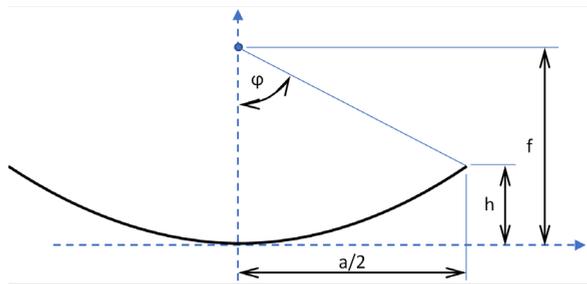


Figura 3. Vista de sección del disco parabólico

La altura de la parábola es la distancia entre la longitud focal y el ancho de apertura que está relacionada con la ecuación.

$$h=a^2/16f \tag{3}$$

Tabla 8. Parámetros de diseño calculados del concentrador solar de disco

Parámetros	Dimensiones
Latitud	12.0314° S
Longitud	73,2353° O
Irradiación solar (I)	424 w/m ²
Diámetro de disco (a)	1,2 m
Área de apertura (A _a)	1.13 m ²
Ángulo de borde (φ)	33,4°
Distancia focal (f)	1,00 m
Diámetro del absorbedor (d)	0,15 m
Área del absorbedor (A _a)	0,018 m ²
Altura de la parábola (h)	0.09 m
Relación de concentración (Rc)	64
Reflectividad (α)	0,9
Transmisividad (ρ)	0,9
Emitancia del absorbedor (ε)	0,2
Constante de Stefan Boltzmann(σ)	5.67x10 ⁻⁸ w/m ² K ⁴
Temperatura del fluido de entrada (T _e =14.3°C)	288°K

El ángulo del borde de la depresión de la parábola se estima mediante la relación.

$$\phi=\text{arccotan}(a/2(f-h)) \tag{4}$$

La relación de concentración es la relación entre el área de apertura y el área de la cara del absorbedor que se puede definir mediante la ecuación.

$$Rc=A_d/A_a=a^2/d^2 \tag{5}$$

El cálculo de la temperatura de equilibrio máximo se determina mediante la ecuación 6, suponiendo una transmisión perfecta de radiación hacia el absorbedor (Gonzales, 2012).

$$T_{c\text{max}}^4 = \frac{\alpha^{oc} X G_{\Omega} \rho_c}{\varepsilon^{ol} \sigma} + T_e^4 \tag{6}$$

La temperatura máxima que puede alcanzar el concentrador solar de disco, con los parámetros de diseño de la Tabla 8, es de 706°K (433°C)

A continuación, se describen los resultados de las cuatro etapas de simulación con SolTrace. En la primera etapa de simulación con SolTrace, se seleccionó las coordenadas para el Valle del Mantaro que está ubicado en latitud 12,0314° Sur y longitud 73,2353° Oeste y la coordenada global permite representar el perfil de la forma del sol con una distribución Gaussiana (Figura 4).



Figura 4. Perfil de la forma del sol (elaborado con SolTrace)

En la segunda etapa se registra las propiedades ópticas de disco parabólico y del absorbedor; para el disco parabólico se registra la reflectividad (0,90) y la transmisividad (0,90) y para el absorbedor la reflectividad (0,00) y la transmisividad (0,90).

En la tercera etapa se determina la geometría del disco parabólico y del absorbedor; el disco tiene una apertura

circular de 1,20 m y una superficie parabólica de foco 1,00 m; el absorbedor tiene una apertura circular de 0,15 m y una superficie plana.

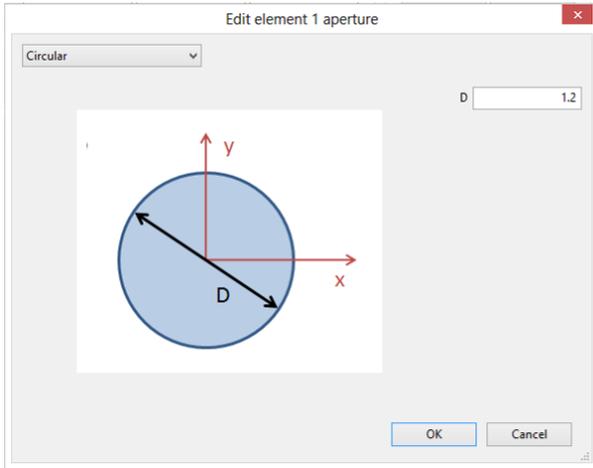


Figura 5. Edición de la apertura del disco (elaborado con SolTrace)

En la Figura 5 selecciona la forma del plato circular y en el campo D de se registra el valor del diámetro en metros. En la Figura 5 se selecciona la forma del perfil parabólico y se registra los valores de Cx y Cy calculando ambos valores con la formula indicada para C considerando que el foco mide un metro.

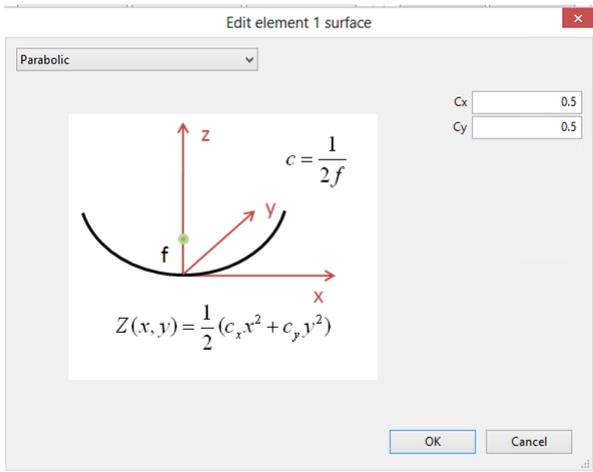
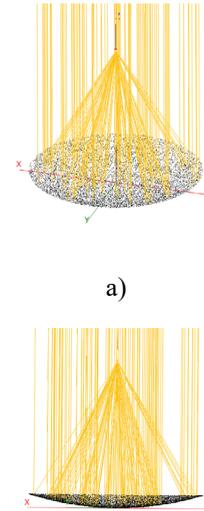


Figura 6. Edición de la superficie parabólica del disco (elaborado con SolTrace)

En la cuarta etapa se determina el flujo de calor de contorno. En la Figura 7 se muestra un diagrama de las intersecciones de rayos con el disco parabólico, para concentrarse en el absorbedor, nótese que todos los rayos son amarillos. En el SolTrace, los rayos amarillos son aquellas que recorren todo el camino hasta el plano objetivo, mientras que los rayos rojos son aquellos que no llegarán al plano objetivo (Wendelin *et al.*, 2013).

Nótese que en la Figura 7 no existen rayos de color rojo, lo que indica que el modelo no desperdicia la radiación que llega al plato parabólico.



a)

b)

Figura 7. Diagrama de intersecciones de rayos. a) vista en isométrico, b) vista frontal (elaborado con SolTrace)

En la Figura 8 se muestra la predicción de la distribución de potencia por unidad de área (flujo de calor) sobre la cara plana del absorbedor en W/m², generada con SolTrace; el mismo que deberá ser comparada con una medición experimental en otra investigación.

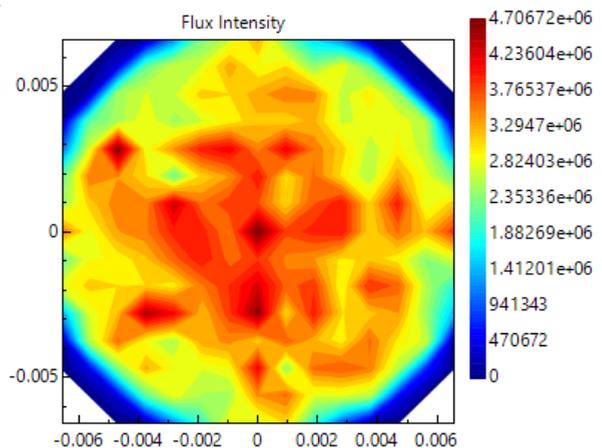


Figura 8. Mapa de flujo de calor en el absorbedor (elaborado con SolTrace)

Construcción del prototipo. El disco parabólico del prototipo se construyó con vidrio de 5 mm de espesor y 1,4 m, dispuesto en un molde generado con la curvatura de la parábola de 1,2 m de diámetro, de 1 m de altura focal y 0,09 m de altura de la parábola. El vidrio se conformó en un horno a 500°C aproximadamente.

El resto de los componentes se construyó de acero estructural (Figura 9).



Figura 9. Prototipo del concentrador solar de disco

4. Discusión de resultados

El proceso de innovación del concentrador solar se desarrolla en cuatro etapas: definición del problema, diseño conceptual, diseño categorial y prototipado (Espinoza, 2013); en otras palabras, el proceso de diseño requiere de la especificación de la información, especificación del concepto de solución, especificación de la construcción y especificación de la producción (Pahl *et al.*, 2007). En este diseño se ha seguido el proceso de cuatro etapas, pero no en forma lineal, se han realizados retrocesos o adelantos en algunas actividades, para realizar los ajustes de datos en base a búsqueda de información y discusión del equipo de diseño, para cada etapa.

La innovación de un producto se inicia con la identificación de las necesidades del usuario que luego se transforman en los requisitos que debe cumplir el diseño del concentrador solar; al evaluar estos requisitos logramos formular el problema de diseño. La aplicación de la filosofía de diseño en la innovación de productos se orienta a los problemas de las partes interesadas, con una perspectiva holística y la experimentación en el proceso y resultado del diseño (Nakata & Hwang, 2020). La recopilación de información sobre el producto a innovar mediante análisis de mercado, estudios de tendencias o requisitos

conocidos (Pahl *et al.*, 2007); no es suficiente, es necesario interactuar con el grupo de interés para recolectar identificar sus necesidades (información sin procesar) y luego traducirlos en enunciados de la necesidad en términos técnicos (ver Tabla 1).

Para encontrar el concepto de solución del concentrador solar, se inicia relacionando el objeto con su entorno, sus entradas y salidas, y la función que cumple. Luego, se identifica y relaciona los elementos cuyas funciones contribuirán con obtener la función del objeto. Cada elemento desarrolla su función basada en un principio tecnológico. Para encontrar estos principios tecnológicos se puede hacer uso de diferentes técnicas creativas. El diseño conceptual determina la solución principal, abstrayendo los problemas esenciales, estableciendo estructuras funcionales, buscando principios de trabajo adecuados y luego combinando esos principios en una estructura de trabajo (Pahl *et al.*, 2007).

Durante el diseño categorial, la atención se centró en el disco parabólico, simulando el desempeño óptico con el software de SolTrace, donde quedó definida la geometría del disco parabólico y el absorbedor, el material a usar en su construcción. Las temperaturas de operación más altas se pueden lograr con métodos de modificación óptica e incrementando la relación de concentración (Bellos & Tzivanidis, 2019). El diseño categorial se inicia configurando y dimensionando en forma aproximada, seleccionando los materiales y procesos de fabricación con fines de evaluación que servirá de base para realizar el diseño definitivo (Espinoza, 2013). Para determinar las especificaciones de diseño, se hace necesario evaluar los aspectos técnicos y económicos de diseños preliminares para obtener más información sobre las ventajas y desventajas de las diferentes variantes, y seleccionar la más prometedora (Pahl *et al.*, 2007).

La evaluación del prototipo se realizará en otra investigación, debido a que las condiciones del contexto no han permitido construir todas las variantes a evaluar mediante un diseño experimental para evaluar los aspectos geométricos y funcionales. En el prototipo se evalúa los aspectos estéticos, ergonómicos, geométricos y funcionales (Espinoza, 2013). Estos también permiten seleccionar la variante más prometedora en el cual se verifica la función del producto, la solidez, la compatibilidad espacial, etc., y es en esta etapa donde queda definido la viabilidad financiera del proyecto (Pahl *et al.*, 2007).

5. Conclusiones

La innovación de un producto se inicia con la identificación de las necesidades mediante la interacción con el usuario, donde se obtiene la información sin procesar; luego se realiza la traducción, con el equipo de diseño, para enunciar las necesidades en términos técnicos, que darán lugar a la definición del problema de diseño.

Con el diseño conceptual se establece el concepto de solución o solución principal, relacionando el objeto con su entorno, definiendo la función y las subfunciones, y la estructura u organización que tendrán los componentes, buscando los principios tecnológicos adecuados para la ejecución de las subfunciones mediante la evaluación técnica y económica de las variantes.

Para la construcción de las variantes o prototipos, se requiere de las especificaciones de diseño aproximadas de la geometría, las dimensiones y los materiales; principalmente de los elementos esenciales que son motivo de la innovación. El diseño categorial permite proponer la evaluación de las variantes más prometedoras.

La alternativa de solución que obtuvo mayor puntaje en la evaluación se caracteriza por concentrar la radiación solar con una parabólica fabricada con espejo conformado, un serpentín de cobre como absorbedor, un mecanismo de seguimiento de dos grados de libertad y una estructura tipo trípode.

La intensidad del flujo de la radiación solar que se logra concentrar en el absorbedor varía entre 3×10^6 y 4×10^6 Watts de energía, lo que permite obtener temperaturas superiores a los 400°C con una irradiación solar de 424 w/m^2 .

En conclusión, el diseño conceptual y categorial se determinó que el concentrador solar debe ser construido con un disco parabólico de espejo conformado en caliente, con una apertura circular de 120 cm, con distancia focal de 100 cm, y altura de la parábola de 9 cm; el absorbedor debe tener una apertura circular menor de 15 cm y una superficie para obtener una temperatura superior a los 400°C .

Referencias bibliográficas

- Ahmed, M. H., Giaconia, A., & Amin, A. M. A. (2017). Effect of solar collector type on the absorption system performance. *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 304–309. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191284>
- Ahmed, S. M. M., Al-Amin, M. R., Ahammed, S., Ahmed, F., Saleque, A. M., & Abdur Rahman, M. (2020). Design, construction and testing of parabolic solar cooker for rural households and refugee camp. *Solar Energy*, 205, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.007>
- Asma, M., & Youssef, T. (2018). Modeling of The Parabolic trough Solar Field with Molten Salt for The Region of Tozeur in Tunisia. *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 993–997. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566976>
- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2019). Alternative designs of parabolic trough solar collectors. *Progress in Energy and Combustion Science*, 71, 81–117. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.11.001>
- Bhave, A. G., & Kale, C. K. (2020). Development of a thermal storage type solar cooker for high temperature cooking using solar salt. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 208, 110394. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110394>
- Cabeza, L. F., Solé, A., Fontanet, X., Barreneche, C., Jové, A., Gallas, M., Prieto, C., & Fernández, A. I. (2017). Thermochemical energy storage by consecutive reactions for higher efficient concentrated solar power plants (CSP): Proof of concept. *Applied Energy*, 185, 836–845. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.093>
- Cagnoli, M., Falsig, J. J., Pagola, I., Peña-Lapiente, A., Sanchez, M., Savoldi, L., Villasante, C., & Zanino, R. (2020). Design methodology for a prototype helical receiver adopted in the MOSAIC solar bowl system. *Solar Energy*, 208, 905–916. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.012>

- Capra, F. (2002). *The hidden connections. Integrating the biological, cognitive and social dimensions of the life into a science of sustainability* (First edit). Doubleday.
- Chen, Q., & Wang, Y. (2020). Research Status and Development Trend of Concentrating Solar Power. *2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 390–393. <https://doi.org/10.1109/ICRERA49962.2020.9242893>
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Agrawala, S., Bashmakov, I. A., Blanco, G., Broome, J., Bruckner, T., Brunner, S., Bustamante, M., Clarke, L., Creutzig, F., Dhakal, S., Dubash, N., Eickemeier, P., Farahani, E., Fischesdick, M., Fleurbaey, M., Gerlagh, R., ... Zwickel, T. (2014). Resumen para formuladores de políticas. In Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA) (Ed.), *Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de Trabajo III del IPCC al AR5* (p. 32). Prensa de la Universidad de Cambridge. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf
- El Moussaoui, N., Talbi, S., Atmane, I., Kassmi, K., Schwarzer, K., Chayeb, H., & Bachiri, N. (2020). Feasibility of a new design of a Parabolic Trough Solar Thermal Cooker (PSTC). *Solar Energy*, 201, 866–871. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.079>
- Espinoza, C. A. (2013). *Design methods in mechanical engineering*. Atlantic International University.
- Espinoza, C. A. (2014). *Metodología de investigación tecnológica* (C. Espinoza Montes (ed.); Primera Ed). <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/1146/mit1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Espinoza, C., Clemente, W., & Martínez, C. (2020). Meteorological variability and use of solar energy in the Mantaro Valley, Peru. *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(3), 1307–1315. <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/11274>
- Fuqiang, W., Zhennan, G., Jianyu, T., Lanxin, M., Zhenyu, Y., & Heping, T. (2016). Transient thermal performance response characteristics of porous-medium receiver heated by multi-dish concentrator. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 75, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.028>
- Fuqiang, W., Ziming, C., Jianyu, T., Yuan, Y., Yong, S., & Linhua, L. (2017). Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1314–1328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.174>
- Gonzales, J. (2012). *Energías renovables*. Editorial Reverté.
- Jones, E. S., Alden, R. E., Gong, H., Frye, A. G., Colliver, D., & Ionel, D. M. (2020). The Effect of High Efficiency Building Technologies and PV Generation on the Energy Profiles for Typical US Residences. *2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 471–476. <https://doi.org/10.1109/ICRERA49962.2020.9242665>
- Megalingam, R. K., & Gedela, V. V. (2017). Solar powered automated water pumping system for eco-friendly irrigation. *2017 International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI)*, 623–626. <https://doi.org/10.1109/ICICI.2017.8365208>
- Mekonnen, B. A., Liyew, K. W., & Tigabu, M. T. (2020). Solar cooking in Ethiopia: Experimental testing and performance evaluation of SK14 solar cooker. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100766. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100766>
- Naciones Unidas. (2017). *La población mundial aumentará en 1.000 millones para 2030*. Perspectivas de La Población Mundial 2017. <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-2017.html>
- Nakata, C., & Hwang, J. (2020). Design thinking for innovation: Composition, consequence, and contingency. *Journal of Business Research*, 118, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.06.038>
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). *Engineering Design. A Systematic Approach* (Tercera E). Springer. <https://doi.org/10.1109/9780470546338.ch33>

- Riba, C. (2002). *Diseño concurrente* (Universidad Politécnica de Cataluña (ed.); Primera ed). Ediciones UPC.
- Salgado Conrado, L., Rodríguez-Pulido, A., & Calderón, G. (2017). Thermal performance of parabolic trough solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1345–1359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.071>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (Quinta Edición). McGraw-Hill Interamericana.
- Wendelin, T., Dobos, A., & Lewandowski, A. (2013). SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems. In *National Renewable Energy Laboratory* (Issue October). NREL. <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/59163.pdf>
- Zou, B., Dong, J., Yao, Y., & Jiang, Y. (2017). A detailed study on the optical performance of parabolic trough solar collectors with Monte Carlo Ray Tracing method based on theoretical analysis. *Solar Energy*, 147, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.055>