



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**ANTEPROYECTO DE UN HORNO QUE UTILIZA ENERGÍA
SOLAR TÉRMICA Y QUE OPERE AL INTERIOR DE UNA
CASA HABITACIÓN, EN LA PROVINCIA DE CURICÓ**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: Dr.-Ing. Gonzalo Salinas Salas

Paula Camila Fuentes Briso

CURICÓ - CHILE

2021

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Al concluir esta etapa de mi vida quiero agradecer a quienes hicieron posible el desarrollo de este proyecto, aquellos que fueron mi motivación, apoyo y fortaleza.

En primer lugar, agradezco a Dios por otorgarme la capacidad de estudiar, por darme la fortaleza y energía para enfrentar cada desafío y, principalmente, por haber puesto en mi vida a personas que me han acompañado en todo este proceso.

Agradezco a todos y cada uno de mi familia, en especial a dos grandes mujeres: a mi madre, por entregarme buenos valores, por sobreponer mi felicidad antes que todo, por levantarme con paciencia cuando he querido abandonar, por su apoyo incondicional y su amor infinito. Y a mi tía Rosa, por ser mi admiración y ejemplo a seguir, por sus consejos y su calidad.

A Daniel, agradecer como colega por haberme guiado cuando no entendía y como pareja por sacar lo mejor de mí, por su apoyo y su amor.

A Ciro, por aportar en mi vida con su experiencia y sus conocimientos.

Finalmente, agradecer a todos los docentes, ya que siempre me respetaron y no hicieron diferencias. Agradezco en especial, a los profesores Diego Gormaz por su dedicación, paciencia y sugerencias y a Gonzalo Salinas por su calidad como persona y por su gran vocación como profesor al aportarme sus conocimientos, ideas o sugerencias.

DEDICATORIA

Dedicado a mi madre

Jimena

Y a mis hermanos

Vicente y María Paz

RESUMEN

El uso de combustibles fósiles representa alrededor de un 68 % en la matriz de energía nacional, lo cual implica elevadas emisiones de dióxido carbónico que afectan al planeta y con ello al calentamiento global. Nace de esta necesidad, el desarrollo de tecnologías que utilicen un recurso limpio y renovable. Por otro lado, dado que existe un cierto grado de desarrollo en la construcción de hornos solares, éste resulta ser un problema de interés. Actualmente, los hornos desarrollados funcionan a partir de energía solar directa, por lo que la problemática de esta memoria es desarrollar un horno de tipo indirecto para viviendas ubicadas en la provincia de Curicó.

Como solución se planteó, primero, obtener conocimiento acerca de las distintas tecnologías solares existentes, luego determinar los requerimientos térmicos del horno, en base a estos y decisiones basadas en criterios se realizó el diseño conceptual, térmico y mecánico del horno. Finalmente, se realizó un análisis de costos haciendo una comparación con un proyecto alternativo basado en energía solar fotovoltaica, con el fin de determinar la rentabilidad y viabilidad del proyecto desarrollado.

ABSTRACT

The use of fossil fuels represents approximately 68% of the national energy matrix, this implies elevated emissions of carbon dioxide that affect planet earth and therefore, contributes to global warming. Given this need, the development of technology that uses clean and renewable resources it is fundamental. However, since there is a certain degree of development in the construction of solar furnaces, this turns out to be a problem of interest. Currently, the kilns that have already been created function directly from solar energy, so the issue in this report is to develop an indirect type of ovens for homes located in the province of Curicó.

As a solution it was proposed: firstly, to acquire background knowledge about the different existent solar technologies and then, to determine the thermal requirements of furnaces. Considering these factors and decisions based on criteria, the conceptual, thermal, and mechanical design of the furnace was carried out. Finally, an analysis of the costs was done which compares an alternative project based on solar photovoltaic energy that aims to determine the profitability and viability of the developed project.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. RESULTADOS ESPERADOS.....	5
1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	5
1.7. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	9
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. GENERALIDADES ACERCA DE LA ENERGÍA SOLAR.....	12
2.1.1. Energía solar.....	12

2.1.2.	Constante solar	12
2.1.3.	Espectro del sol.....	13
2.1.4.	Movimiento planetario	14
2.1.5.	Geometría solar.....	15
2.1.6.	Tiempo solar y tiempo civil.....	17
2.2.	COLECTORES SOLARES.....	18
2.2.1.	Colectores de baja temperatura.....	18
2.2.2.	Colectores de media temperatura	20
2.2.3.	Colectores de alta temperatura	21
2.2.4.	Elementos de óptica.....	23
2.3.	MEDIOS DE TRANSPORTE DE CALOR.....	26
2.3.1.	Agua	26
2.3.2.	Aceite mineral.....	26
2.3.3.	Sales fundidas	27
2.3.4.	Metales y aleaciones líquidas	28
2.4.	MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	29
2.4.1.	Conducción de calor	29
2.4.2.	Radiación	30
2.4.3.	Convección	31
2.4.4.	Coeficiente global de transferencia de calor.....	32
CAPITULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA		33
3.1.	REQUERIMIENTOS TÉRMICOS DEL HORNO.....	34

3.1.1.	Determinación de la potencia consumida térmica requerida.....	34
3.1.2.	Disponibilidad de energía solar en la provincia de Curicó.....	34
3.1.3.	Requerimiento de energía para la operación horno	38
3.1.4.	Cálculo preliminar del área del colector solar	38
3.2.	ÁNALISIS DE ALTERNATIVAS DE CONFIGURACIONES DE DISEÑO	40
3.2.1.	Funciones del sistema.....	40
3.2.2.	Alternativas de diseño	41
3.2.3.	Requerimientos del sistema	43
3.2.4.	Selección de la configuración de diseño	43
3.3.	DISEÑO TÉRMICO DEL HORNO	46
3.3.1.	Esquema preliminar del horno.....	46
3.3.2.	Elementos de transferencia de calor aplicados al horno.....	46
3.3.3.	Selección material paredes del horno	47
3.3.4.	Resultados de parámetros para estructura del horno	49
3.3.5.	Sistema de intercambio de calor.....	52
3.3.6.	Área del colector solar.....	54
3.3.7.	Pérdidas de calor a través de tuberías.....	54
3.4.	DISEÑO MECÁNICO DEL HORNO	56
3.4.1.	Dimensionamiento del colector solar	56
3.4.2.	Elementos de unión del sistema.....	59
3.4.3.	Dibujos 3D.....	59
CAPITULO 4.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	65

4.1.	ANÁLISIS DE COSTOS DEL ANTEPROYECTO.....	66
4.2.	ANÁLISIS DE COSTOS PROYECTO ALTERNATIVO	69
4.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
	CONCLUSIONES.....	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Espectro solar en el tope de la atmósfera y a nivel del mar. Fuente: Nasa, 2010	13
Fig. 2 Órbita de la Tierra alrededor del Sol a lo largo del año. Fuente: García, 2017	14
Fig. 3 Geometría solar. Fuente: Rodríguez, 2013	16
Fig. 4 Clasificación de los colectores solares térmicos en función de su temperatura de trabajo. Fuente: Zabalza, 2009.....	18
Fig. 5 Partes de un colector de placa plana. Fuente: Sopelia, 2020.....	19
Fig. 6 Colector de tubos de vacío. Fuente: Sílter, 2020	20
Fig. 7 Colector cilíndrico parabólico. Fuente: Brakmann et al, 2020	21
Fig. 8 Helióstatos. Fuente: Brakmann et al, 2020	22
Fig. 9 Concentrador disco parabólico. Fuente: Brakmann et al, 2020	23
Fig. 10 Comportamiento de los rayos luminosos en la superficie de un cuerpo gris. Fuente: Salinas, 2014.....	24
Fig. 11 Representación del comportamiento de los rayos luminosos al reflejarse en una superficie de reflexión directa. Fuente: Salinas, 2014.....	25
Fig. 12 Datos geofísicos de la provincia de Curicó en la plataforma digital. Fuente: Ministerio de energía, 2021.....	35
Fig. 13 Esquema con las principales funciones del sistema a diseñar. Fuente: Elaboración propia	40
Fig. 14 Alternativas de mecanismos físicos para la solución a la problemática. Fuente: Elaboración propia.....	42
Fig. 15 Dimensiones exteriores del horno Fuente: Elaboración propia	46
Fig. 16 Representación paredes del horno. Fuente: Elaboración propia	47
Fig. 17 Disposición de tuberías y longitudes. Fuente: Elaboración propia	55
Fig. 18 Parámetros del receptor solar. Fuente: Elaboración propia.....	56

Fig. 19 Estructura del colector del horno. Fuente: Elaboración propia.....	57
Fig. 20 Fuerzas involucradas en el colector solar. Fuente: Elaboración propia	58
Fig. 21 Representación 3D del horno. Fuente: Elaboración propia	59
Fig. 22 Representación 3D de la puerta del horno. Fuente: Elaboración propia.....	60
Fig. 23 Despiece de la puerta del horno. Fuente: Elaboración propia.....	60
Fig. 24 Representación 3D estructura del horno. Fuente: Elaboración propia.....	61
Fig. 25 Despiece de la estructura del horno. Fuente: Elaboración propia	62
Fig. 26 Primera vista isométrica.. Fuente: Elaboración propia	63
Fig. 27 Segunda vista isométrica. Fuente: Elaboración propia	63
Fig. 28 Vista superior red de tuberías. Fuente: Elaboración propia	64

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Radiación global horizontal. Fuente: Ministerio de energía, 2021	35
Gráfico 2 Variación anual de la radiación. Fuente: Ministerio de energía, 2021	36
Gráfico 3 Ciclo diario de la radiación. Fuente: Ministerio de energía, 2021	37
Gráfico 4 Ciclo diario de frecuencia de sombras. Fuente: Ministerio de energía, 2021	37
Gráfico 5 Conductividad térmica de metales a diferentes temperaturas. Fuente: Elaboración propia.....	48
Gráfico 6 Pérdidas de calor en función de diferentes espesores. Fuente: Elaboración propia .	50
Gráfico 7 Comportamiento de las pérdidas de calor respecto de los espesores de los materiales que conforman su pared. Fuente: Elaboración propia	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Preparaciones de alimentos y respectivos tiempos de cocción. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 2 Requerimientos térmicos del horno. Fuente: Elaboración propia	39
Tabla 3 Requerimientos del sistema. Fuente: Elaboración propia	43
Tabla 4 Preselección de configuraciones de diseño. Fuente: Elaboración propia.....	44
Tabla 5 Matriz multicriterio para selección del fluido térmico. Fuente: Elaboración propia ...	45
Tabla 6 Pérdidas de calor a través de las paredes del horno con distintos espesores. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 7 Pérdidas de calor a través de las paredes del horno con distintos espesores de aislante térmico. Fuente: Elaboración propia	51
Tabla 8 Pérdidas de calor a través de las paredes del horno expresadas en porcentajes. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 9 Matriz multicriterio para selección de mecanismo de intercambio de calor al interior del horno. Fuente: Elaboración propia	53
Tabla 10 Valores de parámetros del colector solar. Fuente: Elaboración propia	57
Tabla 11 Piezas puerta del horno.....	61
Tabla 12 Inversión del anteproyecto. Fuente: Elaboración propia a partir de catálogos web ...	66
Tabla 13 Costos de mano de obra. Fuente: Elaboración propia	67
Tabla 14 Flujo de caja del anteproyecto. Fuente: Elaboración propia	68
Tabla 15 Indicadores financieros del anteproyecto. Fuente: Elaboración propia.....	68
Tabla 16 Inversión del proyecto alternativo. Fuente: Elaboración propia a partir de catálogos web	69
Tabla 17 Flujo de caja del proyecto alternativo. Fuente: Elaboración propia	70
Tabla 18 Indicadores financieros del anteproyecto. Fuente: Elaboración propia.....	70

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

En Chile, se han hecho importantes inversiones en implementación de energías renovables, dado que es el país que tiene la radiación solar más alta del mundo, ganando preponderancia la energía solar, dentro del mercado de generación de energía en general y energía eléctrica en particular. Este creciente desarrollo muestra la energía solar como un área laboral con un gran potencial a futuro por lo que quienes adquieran experticia en el tema se encontrarán mejor posicionados profesionalmente en la industria energética futura.

Por otro lado, este desarrollo profesional asociado a una industria que contribuye a la reducción del uso de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), los que representan alrededor de un 68% en la matriz de energía nacional, permite aportar a la necesaria reducción de las emisiones de dióxido carbónico que afecta al planeta y sus efectos en el calentamiento global.

Por su parte, el concepto de generación distribuida de energía tiene una alta relevancia social, ya que, a medida que se desarrollen tecnologías de menor costo de energía eléctrica, térmica, etc. las que utilizan un recurso limpio, traerá consigo una mejor calidad de vida de las personas, reduciendo el nivel de pobreza energética en las zonas rurales e incluso en las ciudades. Al tener acceso a energía segura, asequible y no contaminante, en el caso de calefacción, por ejemplo, lo que redundaría en condiciones de habitabilidad adecuadas y promover el conocimiento del usuario: éstas son las cinco dimensiones que condicionan la pobreza energética en Chile (Ministerio de energía, 2018)

Por todo lo anterior mencionado y dado que existe un cierto grado de desarrollo en la construcción de hornos solares, resulta entonces ser un problema de interés para la industria nacional, que motiva a enfrentar esta problemática y profundizar los conocimientos del uso de la energía solar aplicados a un problema concreto. Bajo este contexto el tema por desarrollar busca impulsar el uso de la energía solar en procesos donde se requiera una temperatura elevada dentro de hogares. En este caso desarrollando un horno de cocción de alimentos (pan y similares). El anteproyecto se desea desarrollar en la provincia de Curicó asumiendo una latitud -35° (sur).

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Como se mencionó anteriormente existe un cierto grado de conocimiento en la construcción en hornos solares a nivel mundial, por lo que este resulta ser un problema de interés para el país. Los hornos, tradicionalmente, usados en viviendas utilizan energía obtenida, directamente, desde la combustión de leña y gas o indirectamente a través de la energía eléctrica. Según un informe de energía del gobierno de Chile (Ministerio de energía, 2018) se estima que un 65,5% utiliza hornos con un consumo promedio de energía anual de una vivienda de 306 kW·h.

La cocción de alimentos a partir de energía solar es una actividad que ya se realizaba en el año 1650 (Muthusivagami, 2010). Sin embargo, no se han desarrollado sustancialmente la tecnología de hornos solares, ya que estos, dependen de muchos aspectos como la variabilidad de la irradiancia solar con respecto a otras fuentes continuas de calor y el uso masivo de combustibles.

Los hornos solares existentes, en su mayoría, son desarrollados a gran escala. Esto significa que se emplean para aplicaciones donde se requiere de una alta temperatura, siendo ampliamente utilizados en centrales de energía solar térmica algunas de las cuales funcionan a través de un sistema óptico para proporcionar radiación solar concentrada. Donde esta energía se emplea para diversos fines tales como la generación de energía eléctrica, la fusión de metales, procesos industriales, etc. La tecnología de las centrales solares se encuentra actualmente en fase de pleno desarrollo. Sin embargo, según (Díaz, 1998) existen problemas de almacenamiento de energía térmica. También existen hornos de pequeña escala, las llamadas “cocinas solares” que son directamente expuestas al Sol. No obstante, se tiene muy poco conocimiento de hornos solares del tipo indirecto, que son aquellos que aprovechan la energía solar almacenada en un fluido térmico para alcanzar altas temperaturas. Estos hornos son más complejos de diseñar y tienen un alto costo (Urkiola, 2014). Claramente las desventajas limitan y desincentivan el uso de hornos solares, por esta razón se requiere de hacer nuevas propuestas de diseño.

Por lo que la problemática del proyecto desde el punto de vista ingenieril es desarrollar un horno de tipo indirecto para viviendas ubicadas en la provincia de Curicó. Donde la mayor dificultad radica en el transporte de la energía solar captada por el colector al horno.

Las áreas comunes de desarrollo e investigación de un Ingeniero Civil Mecánico son, entre otras, el uso y transformación de la energía térmica. Lo que en el plan de formación general se aborda desde la perspectiva de la termodinámica, transferencia de calor, mecánica de fluidos, fundamentalmente. A estas temáticas, como conjunto se le denomina termo fluidos, incluyendo sus aplicaciones prácticas en maquinaria. Luego, el tema por desarrollar corresponde a esta área, ya que, se requiere aplicar estos conocimientos, al diseño de un horno.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Para desarrollar un horno térmico en donde su funcionamiento se base en la energía solar y que este opere dentro de una vivienda se propone como solución realizar un anteproyecto que se ubicará en la provincia de Curicó, donde primero se obtendrá el conocimiento acerca de las distintas tecnologías solares existentes, para luego realizar un diseño conceptual del horno. Se realizarán los cálculos necesarios para la operación del horno y posteriormente se realizará el diseño mecánico de este, dando las respectivas recomendaciones de materiales, disposición de tuberías, entre otros aspectos. Finalmente, se realizará un análisis de costos para ver si esta solución a la problemática es rentable.

1.4. OBJETIVOS

En esta sección se describirán los objetivos: general y específicos, los cuales ayudarán en el desarrollo de la solución a la problemática.

1.4.1. Objetivo general

A continuación, se describe el objetivo general, el cual resume la idea central y finalidad del trabajo a desarrollar apuntando a la solución del problema planteado anteriormente.

“Desarrollar el anteproyecto de un horno que utilice energía solar y que opere en el interior de una casa estándar en la provincia de Curicó”.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar el estado del arte a cerca de la tecnología solar.
- Determinar los requerimientos térmicos del horno.
- Analizar la forma de satisfacer dichos requerimientos empleando energía solar.
- Desarrollar un diseño conceptual, térmico y mecánico del horno.
- Desarrollar un análisis de costos del anteproyecto.

1.5. RESULTADOS ESPERADOS

Al término del proyecto, se espera contar con un informe de carácter científico-técnico, que contendrá los resultados del desarrollo del anteproyecto.

Durante el desarrollo de la memoria de título se alcanzarán resultados parciales asociados a los objetivos planteados en esta memoria, de modo que se espera contar con un análisis del estado del arte a partir de una recopilación bibliográfica que contenga información relativa al comportamiento geofísico del Sol y la Tierra y del avance de las tecnologías existentes para la captación y uso de la energía solar.

A esto se agrega la fundamentación científico-técnica de la evaluación de los requerimientos térmicos del horno y el valor que alcanza este requerimiento para el caso analizado.

Se obtendrán las distintas alternativas de colectores solares, medios de transporte de fluido térmico y configuraciones con sus respectivos análisis técnicos, que se consideraron en este caso.

A partir del análisis realizado que considera los requerimientos energéticos y las posibles formas de satisfacerlo, en términos de la mejor combinación posible, sistema de colección y sistema de transporte de energía se desarrolla el diseño conceptual dejando registro de esto en un documento *ad hoc*.

Finalmente, se contará con la documentación técnica y económica que sustente el anteproyecto desarrollado del horno.

1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En este ítem se expondrá la metodología, que se llevará a cabo, para cumplir cada uno de los objetivos específicos, que permiten obtener el producto final. A continuación, se describe para cada objetivo específico, las actividades a realizar, los recursos, el tiempo en el que se planea desarrollar y los productos esperados, asociados a cada uno de éstos.

Realizar el estado del arte a cerca de la tecnología solar

Actividades:

- Búsqueda bibliográfica de antecedentes relativos a la energía solar y el comportamiento geofísico del Sol y la Tierra.
- Búsqueda bibliográfica del comportamiento de las distintas tecnologías de captación de energía solar existentes.
- Búsqueda bibliográfica de los medios de transporte de energía solar, en particular mediante fluidos.
- Búsqueda bibliográfica de la fundamentación científica de los distintos mecanismos de transferencia de calor.

Recursos:

- Dedicar desde 3 a 5 horas semanales. Alrededor de 3 semanas para cada punto descrito anteriormente.
- Otros recursos: PC, Word[®], Internet, Zoom[®] y literatura técnica-científica.

Tiempos:

- 3 meses, aproximadamente, de revisión bibliográfica y análisis de esta para establecer el estado del arte de la tecnología solar.

Productos esperados:

- Información relevante acerca de la energía solar y datos que tendrían importancia en el desarrollo de esta memoria. (constante solar, disponibilidad solar, incidencia, etc.).
- Conocimiento del comportamiento geofísico de la relación Tierra-Sol. (ángulos solares de incidencia, coordenadas, tiempo solar, etc.)
- Conocimiento de los colectores solares existentes y su comportamiento óptico.
- Conocimiento de los distintos fluidos térmicos utilizados para el transporte de energía solar, tales como agua, aire, sales fundidas, etc.
- Obtención de la modelación matemática de los mecanismos de transferencia de calor que serán utilizadas para el desarrollo de esta memoria.

Determinar los requerimientos térmicos del horno

Actividades:

- Determinación de parámetros térmicos preliminares del horno.
- Evaluación de los requerimientos térmicos del horno.

Recursos:

- Dedicar 2 horas diarias desde lunes a viernes.
- Otros recursos: PC, Word[®], Internet, Zoom[®], Mathcad[®] y literatura técnica, entre ellas, normas técnicas.

Tiempos:

- Esta fase del proyecto se desarrollará en dos semanas.

Productos esperados:

- Cálculo potencia térmica requerida por el horno.
- Disponibilidad de energía asociada a la provincia de Curicó a través del explorador solar.
- Cálculo del área en función de la forma del colector.

Analizar la forma de satisfacer dichos requerimientos empleando energía solar

Actividades:

- Análisis de las distintas configuraciones posibles del diseño físico del horno.
- Evaluación de las configuraciones de diseño.

Recursos:

- Dedicar 2 horas diarias de lunes a viernes.
- Otros recursos: PC, Word[®], Internet, Zoom[®], Mathcad[®], literatura técnica y normas técnicas.

Tiempos:

- Esta fase del proyecto se desarrollará dentro de 2 semanas.

Productos esperados:

- Obtención de opciones que registre las distintas alternativas de colectores solares, medios de transporte de fluido térmico.
- Análisis técnico de las posibles configuraciones.
- Preselección de las mejores configuraciones de diseño.
- Matriz de decisión de las configuraciones de diseño preseleccionadas.

Desarrollar un diseño conceptual, térmico y mecánico del horno

Actividades:

- Diseño conceptual del horno.
- Diseño térmico del horno.
- Diseño mecánico del horno.

Recursos:

- Dedicar 2 horas diarias de lunes a viernes.
- Otros recursos: PC, Word[®], Internet, Zoom[®], Mathcad[®], Inventor[®].

Tiempos:

- Esta fase se desarrollará dentro de un mes, aproximadamente.

Productos esperados:

- A partir de la bitácora antes señalada, se seleccionará una tecnología de concentración solar.
- A partir de la bitácora antes señalada, se seleccionará un medio de transporte de energía solar.
- Selección de materiales (aislación) y geometría del horno.
- Obtención de los espesores de los materiales seleccionados
- Cálculo del área del colector solar teniendo en cuenta las pérdidas de calor estimadas.
- Selección de la manera de transferir el calor hacia el horno.
- Selección de elementos de unión o sujeción del horno.
- Recomendaciones de la red de tuberías para el transporte de energía solar.

- A partir, del desarrollo conceptual y mecánico del horno se obtendrá un esquema del diseño del equipo.

Desarrollar el anteproyecto técnico, el análisis de costos y su documentación

Actividades:

- Desarrollo del anteproyecto.
- Realización de un análisis económico.
- Análisis de una alternativa en base a componentes estándar.

Recursos:

- Dedicar 3 horas diarias de lunes a viernes.
- Otros recursos: PC, Word®, Excel®, Internet, Zoom®, Mathcad®.

Tiempos:

- Esta fase se desarrollará dentro de un mes, aproximadamente.

Productos esperados:

- Evaluación de los costos de inversión del anteproyecto.
- Determinación del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).
- Evaluación los costos de inversión de un horno usando paneles fotovoltaicos.
- Realizar una comparación entre el anteproyecto desarrollado y un horno comercial que opere a partir de paneles fotovoltaicos.
- A partir, de esta comparación y todos los resultados anteriores esperados se obtendrán las conclusiones.

1.7. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El primer capítulo, la introducción, ofrece una visión clara y preliminar del trabajo desarrollado ayudando a comprender el tema principal de esta memoria. Primero, se definieron los antecedentes y la motivación por el cual se seleccionó el tema y área de trabajo, luego se planteó la problemática a resolver con su respectiva propuesta de solución. Luego, se definieron los

objetivos, así como los alcances. Finalmente, se describieron la metodología y herramientas utilizadas y los resultados esperados, todo en base a cada objetivo específico.

El segundo capítulo, corresponde al marco teórico, este se dividirá en cuatro grandes ítems: en el primero se describirán las generalidades de la energía solar donde se realizará una búsqueda bibliográfica de antecedentes relativos a la energía solar y el comportamiento geofísico del Sol y la Tierra, en el segundo ítem se realizará una búsqueda bibliográfica de las distintas tecnologías de captación de energía solar existentes y su comportamiento óptico, en el tercer ítem se encontrarán los medios de transporte de energía solar desde el colector al punto de consumo, en particular mediante fluidos y por último, se realizará una búsqueda bibliográfica de la fundamentación científica de los distintos mecanismos de transferencia de calor.

El tercer capítulo contendrá el desarrollo de la solución a la problemática, el propósito de este capítulo es mostrar el proceso de desarrollo del anteproyecto. Primero se calcularán los requerimientos térmicos del horno, luego se realizará un análisis de las posibles configuraciones físicas para llevar a cabo el funcionamiento del horno. A partir de lo anterior, se seleccionará la configuración más adecuada y se realizará el diseño conceptual y mecánico del anteproyecto.

En cuarto capítulo se realizará un estudio económico de este realizando una comparación con una segunda alternativa, la cual consiste en un horno que opera a partir de paneles solares fotovoltaicos. Esto evidenciará la rentabilidad del anteproyecto.

Finalmente, en el último capítulo se mostrarán las conclusiones de la memoria en base a los resultados.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. GENERALIDADES ACERCA DE LA ENERGÍA SOLAR

En esta sección, se realizará una búsqueda bibliográfica de antecedentes relativos a la energía solar y el comportamiento geofísico del Sol y la Tierra. Con el fin, de obtener la información relevante acerca de la energía solar y datos que tendrían importancia en el desarrollo de esta memoria.

2.1.1. Energía solar

La energía solar es la fuente de energía principal de vida en el planeta: dirige los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la vida en la Tierra. La energía solar es el origen de la mayoría de las fuentes de energía renovables, ya que esta dirige los movimientos del viento, el agua y el crecimiento de las plantas. La energía solar absorbida por la Tierra en un año es equivalente a 20 veces la energía almacenada en las reservas de combustibles fósiles en el mundo y 10.000 veces superior al consumo actual (Demillón Pascual & Aguirre Reyes, 2012).

Para los fines de aprovechamiento de su energía, el Sol es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, con un diámetro de $1,39 \cdot 10^9$ m, situado a una distancia media $1,5 \cdot 10^{11}$ m respecto de la Tierra. A esta distancia se le llama unidad astronómica (Hermosillo, 1995).

Se estima que la temperatura al interior del Sol debe ser del orden de 10^7 K, pero en la fotosfera, es decir, en la superficie externa del Sol, la temperatura es 5.800 K, este dato fue calculado según el modelo de radio activo del cuerpo negro (Hermosillo, 1995).

El Sol está compuesto principalmente por hidrógeno y helio, que representan un 92,1% y 7,8% de la masa del sol en la fotosfera (Sepúlveda Hirzer, 2005).

2.1.2. Constante solar

La cantidad de radiación por unidad de área que recibe la Tierra en el tope de la atmósfera es casi una constante, puede variar ligeramente a lo largo del año debido a la pequeña excentricidad de la órbita de la Tierra respecto al Sol. El valor actualizado y más preciso es $1.360,8 \pm 0,5$ W/m² (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017), este valor se conoce como la constante solar.

2.1.3. Espectro del sol

La distribución de energía procedente del Sol en función de la longitud de onda es muy importante para el funcionamiento de los colectores de energía solar. La variación es básicamente la de un cuerpo negro 5800 K, pero se ve modificada por la absorción de la atmósfera.

La temperatura del Sol difiere de acuerdo con la aplicación particular. El valor de 5800 K se utiliza para describir la variación de intensidad con la longitud de onda para el espectro solar en el infrarrojo visible y próximo. La temperatura bolométrica (tiene en cuenta la radiación electromagnética en todas las longitudes de onda) es 6.350 K, esta se utiliza para valorar el rendimiento de un horno solar (Meinel & Meinel, 1982). La figura 1 muestra el espectro solar en el tope de la atmósfera y a nivel del mar.

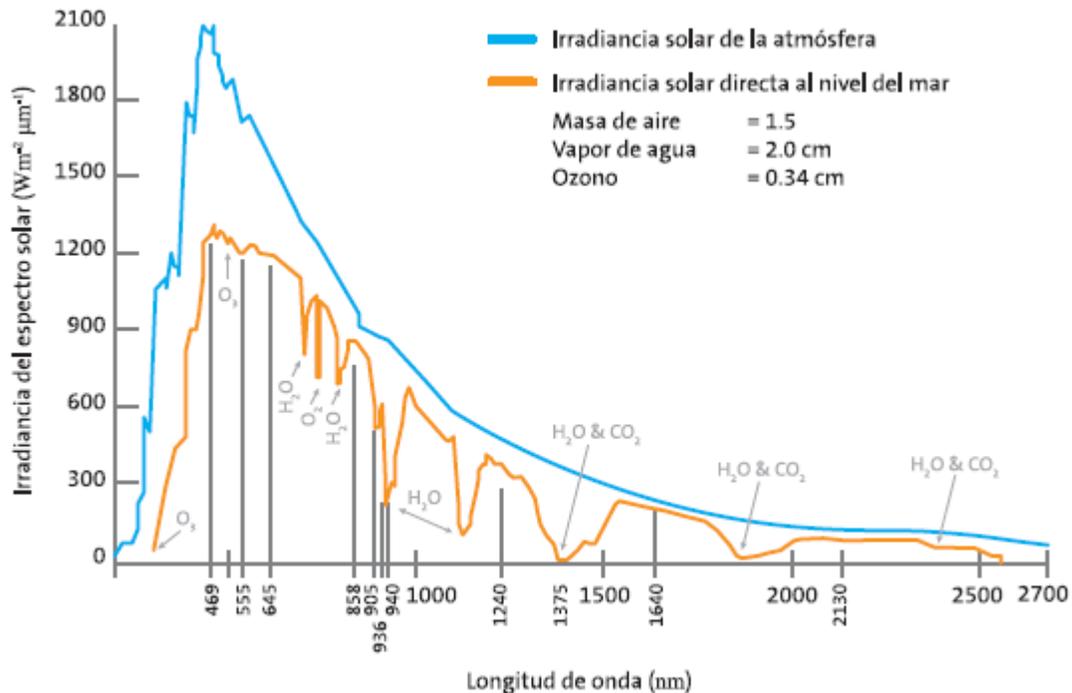


Fig. 1 Espectro solar en el tope de la atmósfera y a nivel del mar. Fuente: Nasa, 2010

La zona espectral se clasifica de acuerdo con las longitudes de onda emitidas: menores a 0,38 μm corresponde a la radiación ultravioleta, entre 0,38 μm y 0,78 μm corresponde a la radiación visible y mayores a 0,78 μm corresponde a la radiación infrarroja (Palma, 2005).

2.1.4. Movimiento planetario

La Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica. Un ciclo se completa en 365 días y se denomina movimiento de traslación. A su vez, la Tierra gira alrededor de su propio eje con una duración de, aproximadamente, 24 horas y este giro se denomina movimiento de rotación. El eje de la Tierra está ligeramente desplazado $23^{\circ} 26' 13,7''$ (declinación solar) con respecto al plano de la órbita (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017).

Este movimiento en conjunto con la oblicuidad terrestre produce las estaciones del año. De estos dos movimientos depende de la cantidad de energía solar que se recibe en una determinada región de la Tierra a lo largo del año.

De esta forma en el solsticio de diciembre los rayos del Sol caen perpendicularmente en el trópico de Capricornio, y en el solsticio de junio en el trópico de Cáncer. De los trópicos hacia los polos, los rayos solares nunca caen, perpendicularmente, sobre la superficie de la Tierra, de modo que esas regiones reciben menos radiación solar.

La distancia mayor entre el Sol y la Tierra durante el año geofísico sucede en el solsticio de invierno y la menor en el solsticio de verano. La figura 2 muestra la relación de la órbita terrestre con respecto a las estaciones meteorológicas y el movimiento aparente del Sol.

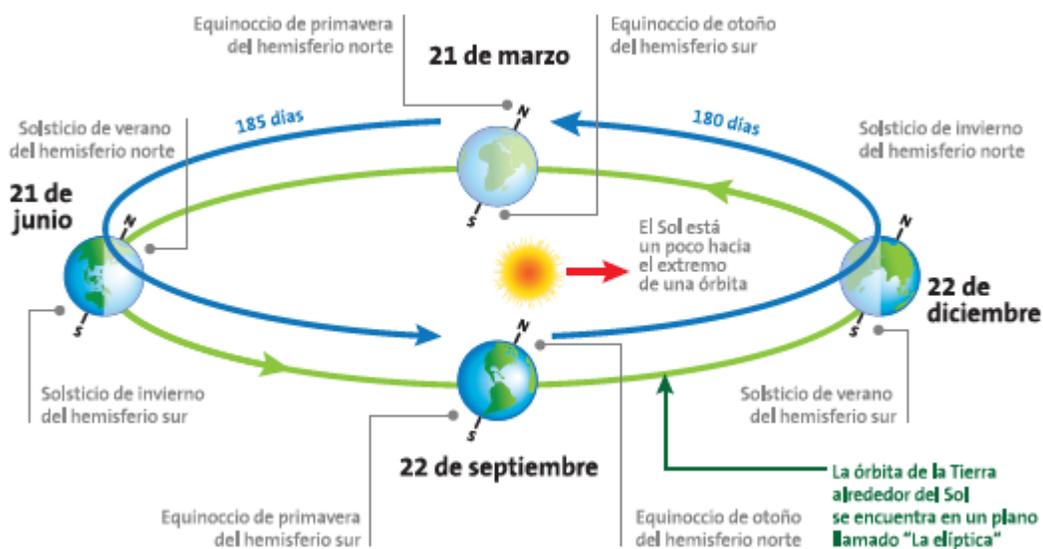


Fig. 2 Órbita de la Tierra alrededor del Sol a lo largo del año. Fuente: García, 2017

No solo de la interacción del Sol con la Tierra depende la cantidad de radiación solar que recibe una determinada región sobre la superficie de la Tierra. Existen fenómenos que se presentan durante el paso de la radiación electromagnética proveniente del Sol a través de la atmósfera, los que atenúan la cantidad de radiación transmitida por efecto de: la dispersión, la reflexión y la absorción. Se estima que alrededor de un 23 % de la radiación solar incidente en la atmósfera, será atenuada por estos fenómenos, antes de llegar a la superficie de la Tierra (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017).

2.1.5. Geometría solar

El sistema de coordenadas geofísicas de posicionamiento en la superficie del planeta está basado en un sistema de referencia, internacionalmente aceptado que se basa en dos ángulos medidos desde orígenes arbitrarios del sistema de referencia:

- Longitud (L): se define como el ángulo entre el meridiano cero (meridiano que pasa por Greenwich) y el meridiano que pasa por una ubicación específica (Axaopoulos, 2011)..
- Latitud (ϕ): se define como como el ángulo entre el plano ecuatorial y una línea desde el centro de la Tierra hasta un lugar específico en la superficie de la Tierra (Axaopoulos, 2011).

El plano de referencia es el plano ecuatorial que es perpendicular al eje de rotación.

En el sistema horizontal, el plano de referencia es el horizonte del observador. Este plano se cruza con la esfera celeste en el horizonte. La intersección de la normal en este plano y la esfera celeste se llama el cenit (Z).

Para modelar cualquier tipo de sistema que se basa en la radiación solar, es importante conocer la posición del Sol en cada momento, la que puede describirse mediante dos ángulos:

- Azimut (α): el azimut solar es la distancia angular entre el sur y la proyección horizontal de los rayos del sol. Cuando este ángulo es positivo indica una posición al este del sur y negativo indica una posición al oeste del sur (Azqueta, 2006).
- Altitud solar (h): es el ángulo de la línea que une los centros del Sol y el observador con su proyección en el plano horizontal desde -90° a 90° . La altitud solar es positiva cuando el Sol esta sobre el horizonte, negativa cuando el Sol está por debajo del horizonte. La distancia hasta el cenit es el complemento del ángulo de altitud y se denomina ángulo cenital (θ_z), que está dado por la ecuación 1:

$$\theta_z = 90^\circ - h \quad (1)$$

La figura 3 muestra gráficamente los ángulos que describen el posicionamiento descrito en los párrafos anteriores.

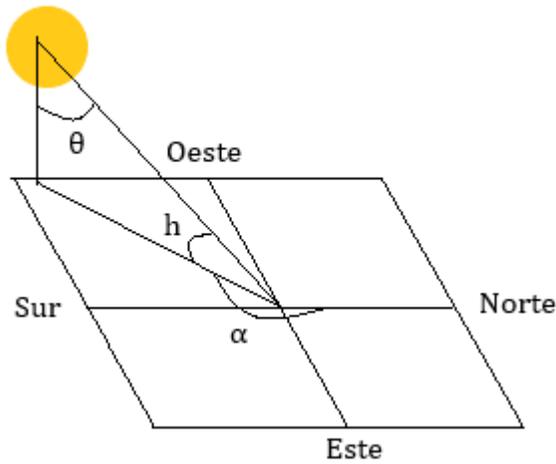


Fig. 3 Geometría solar. Fuente: Rodríguez, 2013

En el sistema Ecuatorial, el plano de referencia es el Ecuador. Los dos ángulos para determinar la posición del Sol, en cualquier momento son:

- Declinación solar (δ): es el ángulo entre los rayos del sol y el plano del Ecuador de la Tierra. Varía por un ángulo de hasta $\pm 23^\circ 27'$. La declinación solar alcanza su máximo el 21 de junio, solsticio de invierno y su mínimo el 20 de diciembre, solsticio de verano. En los equinoccios la declinación solar es 0° (marzo y septiembre) (Azqueta, 2006). La declinación en grados para un día determinado puede calcularse mediante la ecuación 2:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2)$$

Donde:

n : número de día

- Ángulo de la hora (ω): es la distancia angular entre el círculo de la hora del Sol y meridiano del local. Para un observador en la Tierra el Sol parece moverse alrededor de la Tierra por

la tasa de 360° en 24 h o 15° por hora. El ángulo es negativo antes del mediodía solar y positivo, luego del mediodía.

2.1.6. Tiempo solar y tiempo civil

El tiempo solar está basado en el movimiento angular aparente del Sol en el cielo; el mediodía solar ocurre cuando el Sol atraviesa el meridiano del observador.

El tiempo civil o también llamado tiempo local, no coincide con el tiempo solar. Para convertir el tiempo estándar a tiempo solar se realizan dos correlaciones. La primera consiste en corregir por la diferencia de longitudes entre la que se encuentra el observador y en la que está basado el tiempo civil (Duffie & Beckman, 2013).

La segunda correlación es la ecuación del tiempo en donde se consideran las variaciones del tiempo de rotación de la Tierra, el cual afecta el tiempo en que el Sol cruza el meridiano del observador.

2.2. COLECTORES SOLARES

En esta sección se realizará una búsqueda bibliográfica de las distintas tecnologías de captación de energía solar existentes y su comportamiento óptico.

Actualmente, se pueden encontrar en el mercado una gran variedad de captadores solares de diferentes formas, tamaños y precios dado su material o la aplicación que se le quiera dar. Existen tres grandes grupos de colectores solares, en función a la temperatura a la que sean capaces de calentar el fluido: baja (menos de 100°C), media (entre 100°C y 400°C) y alta temperatura (más de 400°C). En la figura 4, se muestran los tipos de colectores solares térmicos en función de su temperatura de trabajo.

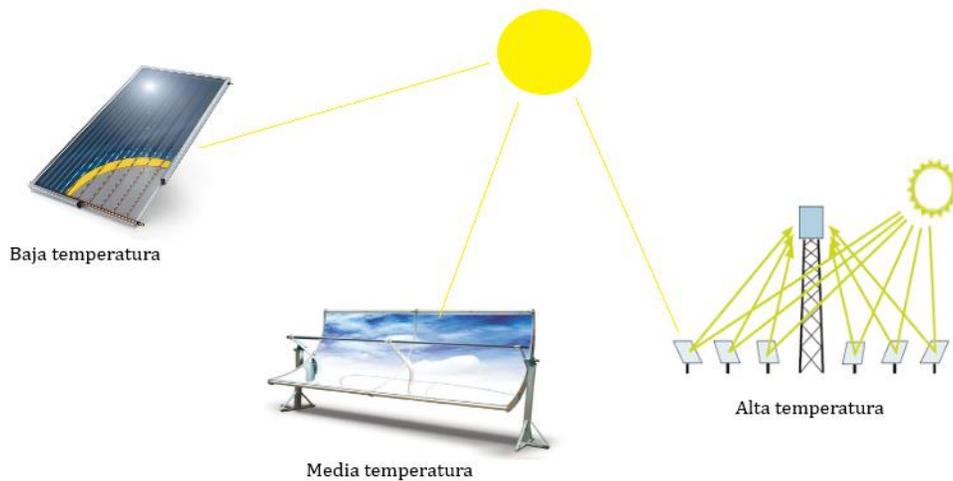


Fig. 4 Clasificación de los colectores solares térmicos en función de su temperatura de trabajo.

Fuente: Zabalza, 2009

2.2.1. Colectores de baja temperatura

Estos colectores realizan la captación de forma directa, sin concentración de los rayos solares. Además, la temperatura del fluido calentado está siempre por debajo del punto de ebullición del agua (Zabalza & Aranda, 2009).

2.2.1.1. Colectores placa plana

Los colectores de placa plana consisten en un panel absorbente oscuro, una cubierta transparente que permite que la energía solar pase a través de ella, pero reduce las pérdidas de calor ya que

limita los efectos convectivos. El calor en forma de radiación es absorbido por un fluido de transporte de calor (aire, anticongelante o agua), la que se almacena en un estanque de acumulación (Valdez, 2006).

Estos colectores tienen pérdidas de calor importantes, dado que, si bien la cubierta limita el escape de calor en forma de radiación infrarroja, no puede evitar su aumento de temperatura por efecto del aire caliente que queda confinado entre la cubierta y la placa de absorción de radiación la que se transfiere debido a la convección que se genera. Este flujo de calor se cede al ambiente mediante una combinación de conducción y convección cuando la temperatura de los alrededores es más baja. Dado lo anterior, se han introducido una serie de mejoras para aumentar la eficiencia térmica, a fin de reducir el fenómeno descrito. En la figura 5 se muestra un colector de placa plana.

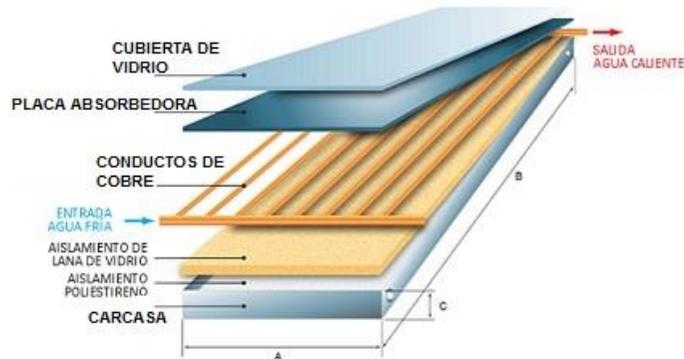


Fig. 5 Partes de un colector de placa plana. Fuente: Sopelia, 2020

2.2.1.2. Colectores de tubo de vacío

Los colectores de tubos utilizan tubos de calor con núcleo de cobre en lugar de pasar el líquido directamente a través de ellos. Estos colectores están compuestos por múltiples tubos de vidrio, cada uno de los cuales contiene núcleo absorbente. El calor del extremo caliente de las tuberías de calor se conduce al fluido de transferencia, típicamente propilenglicol, y se hace circular a un intercambiador de calor de un tanque de agua caliente doméstico y/o un sistema de calefacción (Planas, 2019).

El vacío que rodea el exterior del tubo reduce en gran medida la convección y por ende la pérdida de calor al exterior, permitiendo así una mayor eficiencia que los colectores de placa plana, especialmente en condiciones de baja temperatura atmosférica. En la ilustración 6, se muestra un colector de tubos de vacío.

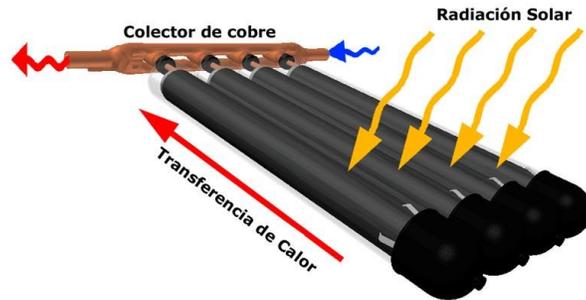


Fig. 6 Colector de tubos de vacío. Fuente: Siliter, 2020

2.2.2. Colectores de media temperatura

Estos colectores tienen un pequeño índice de concentración de los rayos solares, consiguiendo, de este modo, temperaturas más elevadas que los colectores de baja temperatura, al aumentar la radiación por unidad de superficie. La temperatura de trabajo se sitúa en un rango de 100-400°C (Zabalza & Aranda, 2009).

2.2.2.1. Colector cilíndrico parabólico (CPC)

El concentrador cilíndrico parabólico cuenta con un arreglo de espejos en forma de cilindro parabólico, en el foco se sitúa un conducto por donde se desplaza un fluido (aceites térmicos, agua, aire, sales fundidas), la energía trasferida hacia este fluido puede ser utilizada de manera inmediata o utilizar un medio de almacenamiento de calor. Dependiendo de la longitud de exposición, el área de captación solar y la irradiancia, dicho fluido puede aumentar su temperatura, incluso por encima del punto de ebullición del agua, llegando a temperaturas alrededor de 300 °C (Universidad Católica de Chile). En la figura 7 se muestra un colector cilíndrico parabólico.

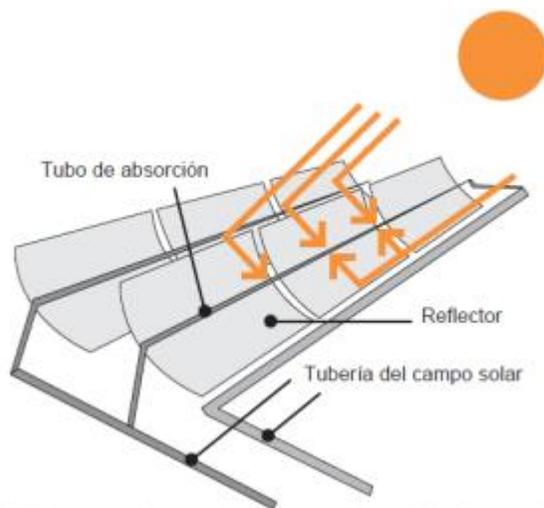


Fig. 7 Colector cilíndrico parabólico. Fuente: Brakmann et al, 2020

2.2.3. Colectores de alta temperatura

Estos colectores tienen un alto índice de concentración de la radiación solar, consiguiendo temperaturas de trabajo por encima de 400°C. En la actualidad se utilizan, principalmente, en instalaciones aplicadas a la generación eléctrica, aunque también es posible usarlos para otras aplicaciones, como el ensayo de materiales industriales, la desalinización de agua marina por evaporación, etc (Zabalza & Aranda, 2009).

2.2.3.1. Helióstatos

Los heliostatos son un conjunto de espejos grandes de tracción individual para concentrar la luz solar en un receptor central montado en lo alto de una torre. Un fluido ubicado en este receptor central, absorbe la radiación altamente concentrada reflejada por los heliostatos. La cantidad de energía térmica que absorbe este fluido, le permite transferirla a fin de que sea utilizada, incluso para la generación de vapor sobrecalentado que permita el funcionamiento de una turbina. Los fluidos usados hasta ahora incluyen agua/vapor, sales fundidas, sodio líquido y aire (Aringhoff, Brakmann, & Aubrey, 2020). En la ilustración 8, se muestran estos tipos de concentradores.

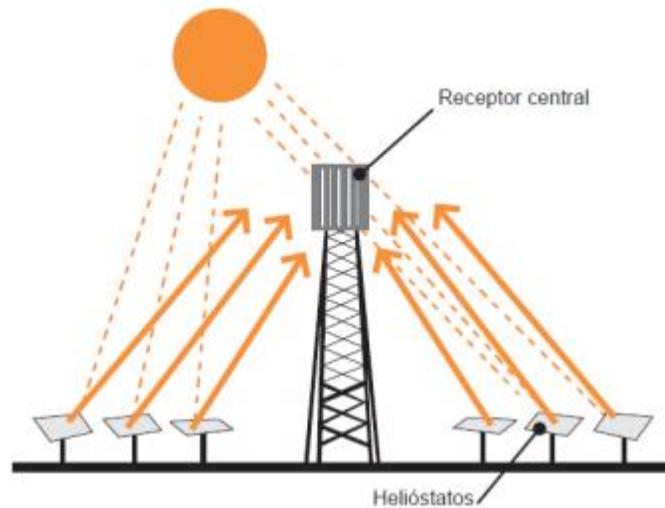


Fig. 8 Helióstatos. Fuente: Brakmann et al, 2020

2.2.3.2. Discos parabólicos

Este tipo de tecnología está compuesto de un disco parabólico único que refleja la radiación solar a su punto focal. Donde esta energía térmica puede ser empleada para distintos fines tales como hornos para distintos usos y por ejemplo, para la conversión en energía mecánica empleando un motor Stirling que se ubica en dicho punto focal. Este motor Stirling, opera por expansión y compresión de un gas para generar energía mecánica y posteriormente, energía eléctrica, si se le asocia un generador. Este tipo de sistema requiere de seguimiento en 2 ejes de la posición del Sol, y su principal ventaja radica en sus altos factores de concentración que resultan en altas temperaturas (Universidad Católica de Chile). Estos sistemas no requieren de un bloque de generación de potencial debido a que el motor Stirling permite la producción directa de energía eléctrica.

Las principales características de los discos parabólicos son su alta eficiencia, modularidad, operación autónoma y potencial para trabajar con sistemas híbridos. Sin embargo, su tecnología se encuentra aún en fase de desarrollo, y hasta el momento no han sido una tecnología apropiada para aplicaciones en gran escala. En la figura 9, se muestra un concentrador de disco parabólico.

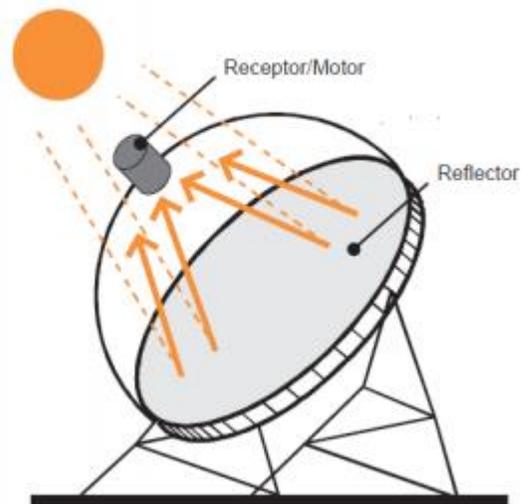


Fig. 9 Concentrador disco parabólico. Fuente: Brakmann et al, 2020

2.2.4. Elementos de óptica

Dada la doble naturaleza de luz en términos de su comportamiento como onda electromagnética y corpúsculo, se presentan un conjunto de fenómenos relevantes cuando la luz incide sobre una superficie de un cuerpo, entre los que destacan:

2.2.4.1. Absorción

La absorción corresponde a la capacidad de transformar en calor la energía o la luz que recibe una determinada superficie (Salinas Salas, 2014). El parámetro que representa a la fracción de la luz absorbida respecto de la recibida se le denomina absortancia (α).

2.2.4.2. Reflexión

La reflexión corresponde al fenómeno de rebote de la luz en la superficie de un cuerpo, esto es que una fracción de la energía es devuelta al medio sin que el cuerpo la absorba ni la transmita. Esta reflexión puede darse de manera especular o directa o de manera difusa, donde el rayo luminoso se separa en múltiples rayos que se dirigen distintas direcciones (Salinas Salas, 2014). El parámetro que representa a la fracción de luz reflejada respecto de la incidente, se le denomina reflectancia (τ).

2.2.4.3. Transmisión

La transmisión esta ocurre cuando la luz atraviesa una superficie u objeto, presentándose en tres formas, las que son: directa, difusa o selectiva. La directa ocurre cuando la luz atraviesa un medio continuo, la difusa se genera cuando una cierta cantidad de luz que incide sobre la superficie y es dispersada o difundida por las irregularidades de esta. Y la selectiva se produce cuando la luz atraviesa un medio o un cuerpo que posee un color determinado (Salinas Salas, 2014). A este parámetro se le denomina transmitancia (ρ).

La figura 10 muestra el comportamiento de los rayos luminosos en la superficie de un cuerpo gris.

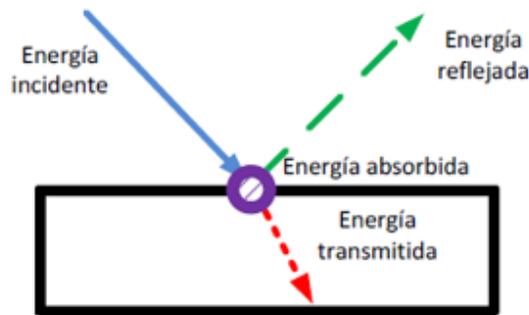


Fig. 10 Comportamiento de los rayos luminosos en la superficie de un cuerpo gris. Fuente: Salinas, 2014

Los sistemas termo solares de concentración se caracterizan por direccionar la radiación solar incidente sobre una determinada superficie, superficie receptora, y concentrarla sobre una superficie de menor tamaño, absorbedor (Salinas Salas, 2014). En la ilustración 11, se encuentra una representación del comportamiento de los rayos luminosos al reflejarse en una superficie de reflexión directa.

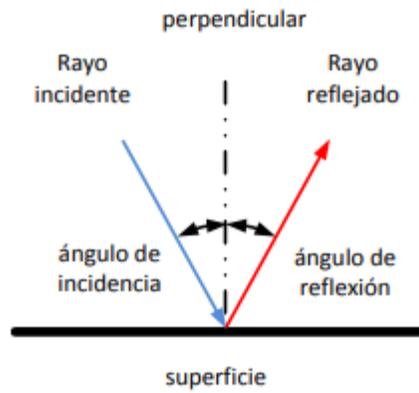


Fig. 11 Representación del comportamiento de los rayos luminosos al reflejarse en una superficie de reflexión directa. Fuente: Salinas, 2014

2.3. MEDIOS DE TRANSPORTE DE CALOR

En esta sección se muestran los resultados de una búsqueda bibliográfica realizada sobre los medios de transporte de energía solar desde el colector al punto de consumo, en particular mediante fluidos.

Al momento de decidir cuál es la mejor opción del tipo de fluido de transferencia de calor, se deben tener en cuenta diversos factores relevantes, tales como: parámetros de diseño, la eficiencia de transferencia de calor del fluido, los costos económicos que estos conllevan, seguridad y factores asociados al medio ambiente.

A continuación, se describen algunos fluidos de transferencia de calor:

2.3.1. Agua

El agua es uno de los mejores medios de transporte de calor en aplicaciones a baja temperatura. Su rango de temperatura de funcionamiento se encuentra entre 8 a 90°C. Las ventajas que este posee son: su elevado calor específico, la no toxicidad y la gran disponibilidad, mientras que sus desventajas son: la alta presión de vapor y la corrosividad (Murali & Mayilsami, 2016). El agua se utiliza para la calefacción y refrigeración de espacios interiores, y como servicio de agua caliente sanitaria.

El tamaño del tanque de almacenamiento es un problema importante. Hay muchos factores que afectan el tamaño económico y operativo del tanque de almacenamiento para un determinado sistema solar. Estos factores incluyen: el propósito del sistema de energía solar (carga), el área del colector, las condiciones meteorológicas en la ubicación y las características operativas del sistema (Kousksou, Bruel, & Jamil, 2013). Los tanques de almacenamiento de agua están hechos de una amplia variedad de materiales como acero, aluminio, hormigón armado y fibra de vidrio, están aislados con lana de vidrio, lana mineral o poliuretano.

2.3.2. Aceite mineral

El aceite mineral se utiliza como fluido de transferencia de calor en plantas de captación de energía solar térmica, también puede utilizarse para almacenar energía térmica en tanques de almacenamiento altamente aislados y disponer de energía durante las noches. Cuando el fluido de transferencia de calor también se convierte en material de almacenamiento de energía, se les

denomina a las instalaciones de sistema directo, puesto que elimina la necesidad de intercambiador de calor, reduciendo el costo. El aceite mineral tiene una presión de vapor más baja que el agua y es capaz de funcionar a altas temperaturas en forma líquida hasta 400°C. Por otro lado, a diferencia de las sales fundidas, el aceite mineral no se congela durante la noche en las tuberías, lo cual excluye la necesidad de un sistema anticongelante (Lizana, Chacartegui, Barrios, & Valverde, 2017).

Sin embargo, el aceite mineral es costoso en comparación con las sales fundidas y recientemente se han descubierto mezclas de sales fundidas con bajo punto de fusión, reemplazando el aceite mineral como material de almacenamiento de energía. La tendencia reciente en plantas de captación de energía solar térmica es utilizar sistemas indirectos donde el aceite mineral actúa como fluido de transferencia de calor y las mezclas salinas fundidas actúan como material de acumulación térmica.

2.3.3. Sales fundidas

Las sales fundidas son actualmente los materiales de almacenamiento de energía térmica más utilizados en las plantas de captación de energía solar térmica. Son baratas, especialmente los nitratos y su densidad es alta en comparación con otros medios fluidos de almacenamiento, lo que les da alta densidad de almacenamiento de energía.

Las sales fundidas tienen una presión de vapor inferior a la del agua y son capaces de funcionar a altas temperaturas en forma líquida hasta los 400 °C, lo anterior permite el funcionamiento de plantas a altas temperaturas, por lo que mejora la eficiencia del ciclo termodinámico Rankine. Es necesario tener un punto de fusión inferior para las sales fundidas y cerca de la temperatura ambiente para que permanezcan líquidos durante el funcionamiento, también que el anticongelante sea mínimo durante la noche cuando no se dispone de energía solar. Pero las sales fundidas puras suelen tener puntos de fusión por encima de 200 °C, lo cual es una desventaja. Sin embargo, hoy en día la práctica se utilizan compuestos de sal (más mezclas de sal) que hacen bajar el punto de fusión por debajo de 100 °C y aun así tener una temperatura máxima superior a 500 °C (Saman & Bruno, 2012).

También pueden actuar como fluido de transferencia de calor, pero es más seguro tener un sistema anticongelante para hacer frente a cualquier riesgo de congelación; de lo contrario, se debe utilizar aceite mineral como fluido de transferencia de calor. Uno de los inconvenientes de las sales fundidas es que son agentes oxidantes y muy corrosivos, por lo que contenerlos a altas temperaturas es complejo. También su conductividad térmica es baja y tiene un cambio de volumen alrededor del 6% durante el proceso de fusión.

2.3.4. Metales y aleaciones líquidas

Los metales y aleaciones puras que tienen puntos de fusión bajos, pero por encima de 300 °C, también tienen potencial como fluido de transferencia de calor, tienen una alta conductividad térmica y alta temperatura máxima de funcionamiento. Su presión de vapor es mínima, pero cuentan con la desventaja de poseer un alto costo (Chan & Li, 2015).

2.4. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En esta sección se realizará una búsqueda bibliográfica de la fundamentación científica de los distintos mecanismos de transferencia de calor, obteniendo una modelación matemática de estos, para el desarrollo de esta memoria.

La transferencia de energía como calor, siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura (Cengel & Ghajar, 2011). El calor se puede transferir de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. A continuación, se presentan estos mecanismos de transferencia de calor y la modelación matemática de estos a través de las llamadas leyes de transferencia de calor.

2.4.1. Conducción de calor

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de sus interacciones. La conducción puede ocurrir en sólidos, líquidos o gases; en estos últimos dos la conducción se debe a las colisiones de las moléculas durante su movimiento aleatorio, mientras que en los sólidos se debe a la combinación de la vibración de las moléculas en una red y el transporte de energía mediante electrones libres (Cengel & Boles, 2012). Su modelo matemático se le denomina Ley de Fourier.

La conducción de calor puede calcularse mediante la Ley de Fourier, la cual se muestra en la ecuación 3.

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Donde:

q : Flujo de calor

k : Conductividad térmica del material

A : Área normal a la dirección de la transferencia de calor

dT : Diferencia de temperatura en una capa de espesor constante

dx : Capa de espesor constante

2.4.2. Radiación

La radiación es la energía que emite la materia en la forma de ondas electromagnéticas como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio. De hecho, este tipo de transferencia es la más rápida (se lleva a cabo a la velocidad de la luz) y no experimenta ninguna atenuación en el vacío.

En los estudios de transferencia de calor, el interés se halla en la radiación térmica, que es la forma de radiación que emiten los cuerpos debido a su temperatura, y difiere de las otras formas de radiación electromagnética como los rayos X, gamma, microondas, ondas de radio y televisión que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura superior al cero absoluto emiten radiación térmica (Cengel & Ghajar, 2011).

La radiación es un fenómeno volumétrico, y los sólidos, líquidos y gases, emiten, absorben o transmiten radiación de distintos grados. Sin embargo, la radiación es considerada en general como un fenómeno superficial para sólidos opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, puesto que la radiación emitida por las regiones interiores de estos materiales nunca alcanza la superficie, mientras que la radiación que incide en esos cuerpos se absorbe comúnmente dentro de unas micras desde la superficie (Cengel & Boles, 2012). El modelo matemático que representa este fenómeno se denomina Ley de Stefan-Boltzmann, la cual se representa en la ecuación 4.

$$q_{\text{emitida,max}} = \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad (4)$$

Donde:

- $q_{\text{emitida,max}}$: Máxima radiación de una superficie
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann
- A : Área superficial
- T_s^4 : Temperatura absoluta de una superficie

La constante de Stefan-Boltzmann (σ) tiene un valor igual a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

La radiación que emiten todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro, a la misma temperatura, se expresa a partir de la ecuación 5.

$$q_{\text{emitida}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad (5)$$

Donde:

- q_{emitida} : Radiación que emite una superficie real
- ε : Emisividad de la superficie

La emisividad (ε) es una propiedad cuyo valor se encuentra en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$, es una medida de que tan cerca se aproxima una superficie a un cuerpo negro. Otra propiedad importante de la radiación de una superficie es la absorbancia (α), que es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie absorbida por esta, al igual que la emisividad su valor se encuentra en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$.

2.4.3. Convección

La convección estrictamente es un fenómeno de mecánica de los fluidos donde se produce un fenómeno simultaneo de transferencia de calor de trabajo mecánico entre un fluido y una superficie sólida, donde los parámetros que definen el fenómeno se representan y modelan desde la perspectiva del fluido siendo representados en el parámetro denominado coeficiente pelicular convectivo medio, el cual se determina a partir de relaciones empíricas en el caso de flujo turbulento y analíticas para el caso laminar, lo que implica el uso de distintos números adimensionales y un tratamiento casuístico. El modelo matemático que representa a este fenómeno se denomina Ley de enfriamiento de Newton, expresada en la ecuación 6.

$$q = h_{\infty} \cdot A \cdot |T_{\infty} - T_w| \quad (6)$$

Donde:

- q : Flujo de calor
- h_{∞} : Coeficiente pelicular convectivo
- A : Superficie en la cual tiene lugar la transferencia de calor
- T_{∞} : Temperatura de la superficie
- T_w : Temperatura del fluido lejos de la superficie

El coeficiente de transferencia de calor por convección (h), no es una propiedad del fluido, es un parámetro determinado de forma experimental cuyo valor depende de la configuración geométrica de la superficie, de la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y la velocidad volumétrica del fluido (Cengel & Boles, 2012).

2.4.4. Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor permite representar en la forma un valor único, a un conjunto de mecanismos de transferencia de calor que se presentan simultáneamente y en una determinada situación física, permitiendo así evaluar el flujo de calor (Salinas, 2013). Analíticamente, el coeficiente global de transferencia de calor se define a partir de la ecuación 7.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (7)$$

Donde:

- q : Flujo de calor
- U : Coeficiente global de transferencia de calor
- A : Superficie en la cual tiene lugar la transferencia de calor
- ΔT : Diferencia de temperatura en la superficie

CAPITULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

3.1. REQUERIMIENTOS TÉRMICOS DEL HORNO

En esta sección se determinarán los requerimientos térmicos del horno, primero se determinará la potencia térmica requerida por el horno en base a hornos ya existentes en el mercado, luego se determinará la disponibilidad de energía solar presente en la provincia de Curicó a través de una herramienta web. También, se calculará el requerimiento de la energía necesaria para la operación del horno y finalmente, se realizará el cálculo del área del colector solar.

3.1.1. Determinación de la potencia consumida térmica requerida

La potencia térmica requerida para que el horno pueda operar estará basada en hornos comerciales, ya que como todo proceso de diseño estos están fabricados en función a normas y etapas de diseño, como lo es la realización de pruebas mediante prototipos antes de su comercialización.

Entonces, a partir de la búsqueda de hornos ya existentes en el mercado se asumirá una potencia de 2,7 kW.

3.1.2. Disponibilidad de energía solar en la provincia de Curicó

El anteproyecto a desarrollar tendrá ubicación dentro de la provincia de Curicó, por lo que se requiere obtener los datos de disponibilidad de energía solar de este lugar. Estos datos se obtendrán a través del explorador solar, una herramienta pública, completa y detallada sobre el recurso solar en Chile otorgada por el Ministerio de Energía.

El explorador solar ofrece datos promedios anuales y diarios para distintos parámetros, como: la radiación solar, las sombras topográficas y nubosidad, entre otros. En la figura 12 se muestra la búsqueda realizada en la plataforma digital.

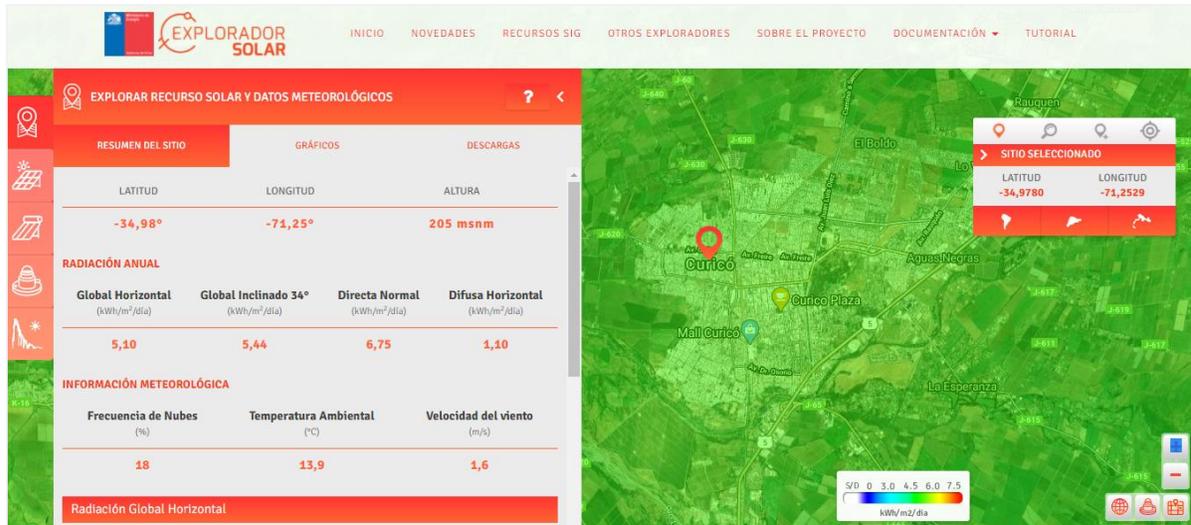


Fig. 12 Datos geofísicos de la provincia de Curicó en la plataforma digital. Fuente: Ministerio de energía, 2021

La radiación global horizontal corresponde a la radiación directa, medida de forma horizontal, a la cual se le suma la radiación difusa. A continuación, el gráfico 1 muestra un promedio de la radiación global horizontal.

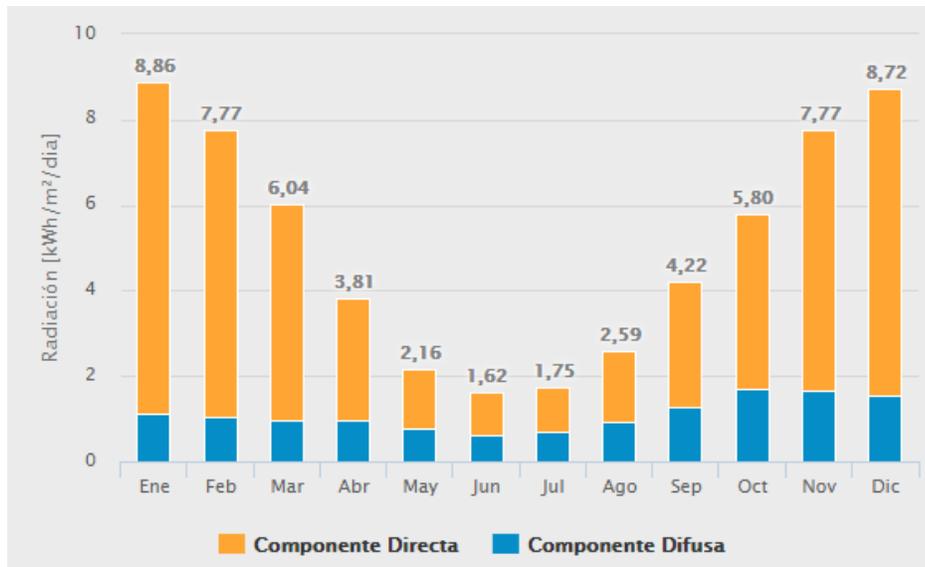


Gráfico 1 Radiación global horizontal. Fuente: Ministerio de energía, 2021

Como era de esperar, en los meses de verano es donde existe una mayor radiación, mientras que en los meses de invierno existe una menor radiación solar. Por lo que el anteproyecto, se

desarrollará en base a los datos de invierno, es decir, con una radiación promedio mensual de $1,62 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2/\text{día}$, valor correspondiente al mes de junio.

A continuación, el gráfico 2 muestra los promedios de la radiación global, directa y difusa sobre un plano horizontal y sobre un plano inclinado. Esta es información mensual para un año promedio.

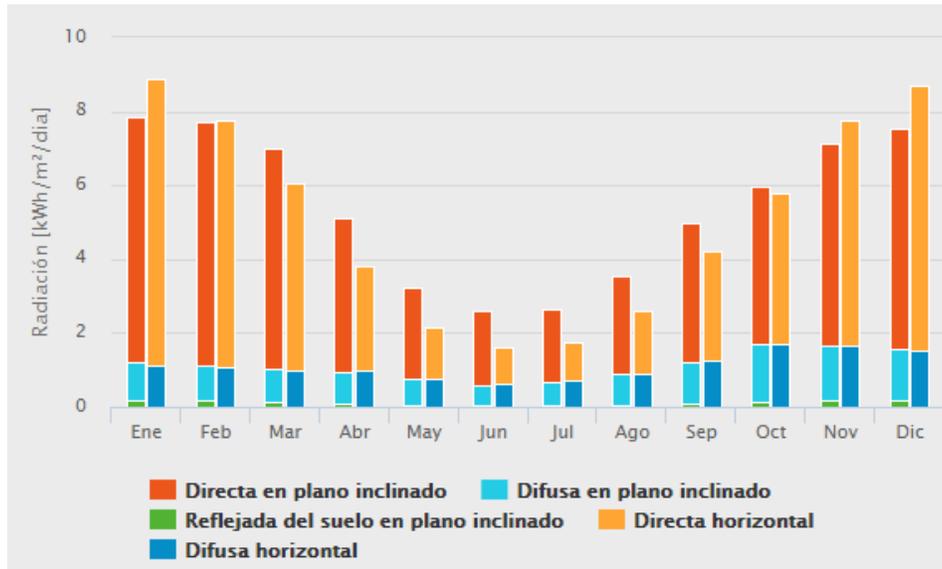


Gráfico 2 Variación anual de la radiación. Fuente: Ministerio de energía, 2021

Por otro lado, el gráfico 3 muestra los promedios de la radiación global, directa y difusa sobre un plano horizontal y sobre un plano inclinado. Esta es información por horas para un día promedio. Como se puede observar, el horario donde más radiación existe es entre las 12:00 y 14:00 horas, tiempo suficiente para la cocción de cualquier tipo de alimento.

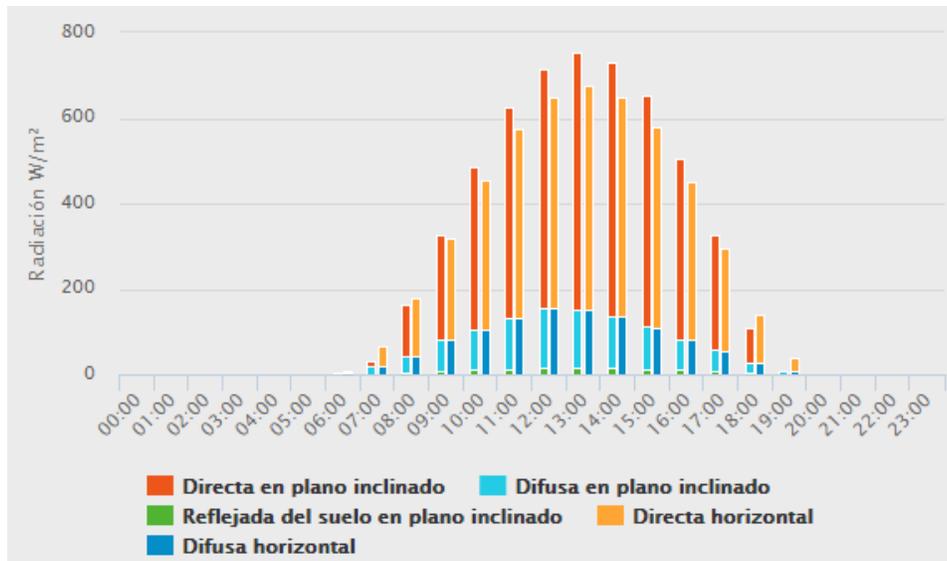


Gráfico 3 Ciclo diario de la radiación. Fuente: Ministerio de energía, 2021

Análogamente, en el gráfico 4 se muestra el ciclo diario de la frecuencia de sombras. Como se puede observar, durante el horario anterior definido para la operación del horno, la frecuencia de sombras es 0%, es decir, el funcionamiento de horno, no se verá afectado por este parámetro.

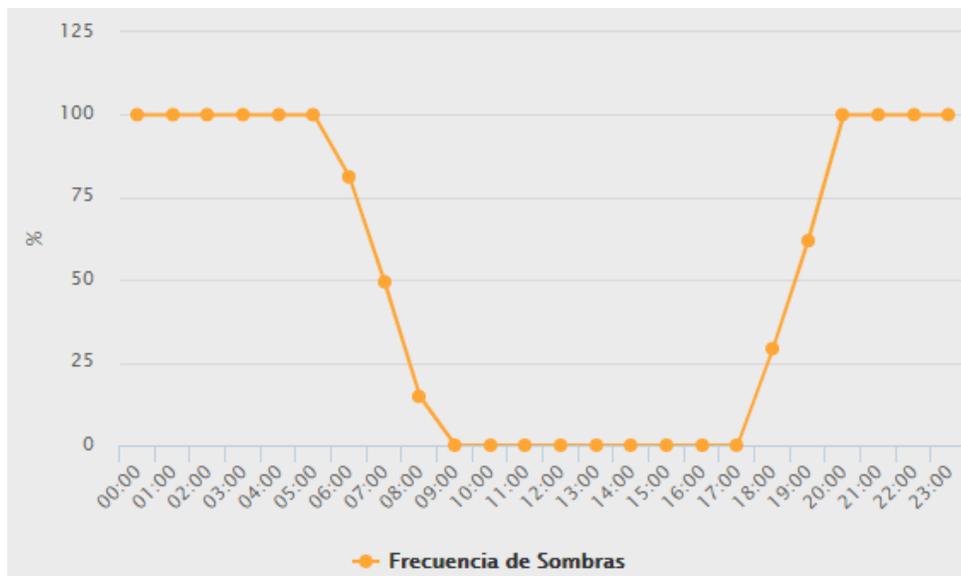


Gráfico 4 Ciclo diario de frecuencia de sombras. Fuente: Ministerio de energía, 2021

3.1.3. Requerimiento de energía para la operación horno

Para determinar la energía necesaria que requiere un horno para su operación, se considerarán 2 horas de uso diario, en base a los tiempos de cocción estimados para alimentos, comúnmente, preparados en las casas, considerando una familia promedio de 4 habitantes. A continuación, en la tabla 1 se muestran estos alimentos con sus respectivos tiempos de cocción.

Tabla 1 Preparaciones de alimentos y respectivos tiempos de cocción. Fuente: Elaboración propia

Alimento	Tiempo de cocción
Carnes	60-90 minutos
Pescados	20-30 minutos
Verduras	45-60 minutos
Masas	50 minutos

El requerimiento de energía para la operación del horno se determinará a partir de la multiplicación entre la potencia térmica requerida por el horno y las horas de operación diarias de este. Este procedimiento se muestra en la ecuación 8.

$$P_{total} = P_{térmica} \cdot t = 2,7 \text{ kW} \cdot 2 \text{ h} = 5,4 \text{ kW} \quad (8)$$

Finalmente, la potencia total diaria que requerirá el horno a diseñar es 5,5 kWh.

3.1.4. Cálculo preliminar del área del colector solar

Para el cálculo del área requerida para el colector solar, se considerarán los parámetros extraídos, anteriormente, desde el explorador solar. La ecuación 9 muestra este procedimiento, en el cual se realizó la división entre la potencia térmica necesaria para la operación del horno, es decir, 2,7 kWh y la radiación promedio mensual, es decir, 1,62 kWh/m², valor correspondiente al mes de junio.

$$\text{Área colector solar} = \frac{2,7 \text{ kWh}}{1,62 \text{ kWh/m}^2} = 1,67 \text{ m}^2 \quad (9)$$

La ecuación anterior permitió determinar el área del colector solar necesario para el funcionamiento del horno, que es 1,67 m².

Una vez determinados los requerimientos térmicos del horno, es necesario añadir un factor de seguridad al área del colector solar, debido a posibles pérdidas de calor durante el

funcionamiento del horno. También, debido al clima, puede que se presente nubosidad y se produzca una reducción en la captación de la energía solar. La tabla 2 muestra un cuadro resumen de los parámetros determinados anteriormente, incluyendo un factor de un 20 %.

Tabla 2 Requerimientos térmicos del horno. Fuente: Elaboración propia

Parámetros	Valores
Potencia consumida térmica	2,7 kW·h
Disponibilidad de energía solar	1,62 kWh/m ²
Energía necesaria para la operación del horno	5,4 kW
Área del colector solar	2 m ²

3.2. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE CONFIGURACIONES DE DISEÑO

En esta sección se realizará un análisis de distintas configuraciones para la resolución del problema técnico. Para esto primero se describirán las funciones del sistema llegando a las soluciones físicas existentes. Luego, se identificarán los requerimientos de la memoria, para así ir descartando alternativas de configuraciones. Finalmente, se realizará la selección del diseño conceptual a través de una matriz de decisión.

3.2.1. Funciones del sistema

Para analizar las posibles configuraciones se definirán las funciones que se requieren para llevar a cabo el funcionamiento del horno, desde captar la energía solar hasta cocinar, con el objetivo de llevar estas funciones a mecanismos físicos, facilitando la búsqueda de posibles soluciones que satisfagan el objetivo general. A continuación, la figura 13, muestra un esquema con lo descrito.

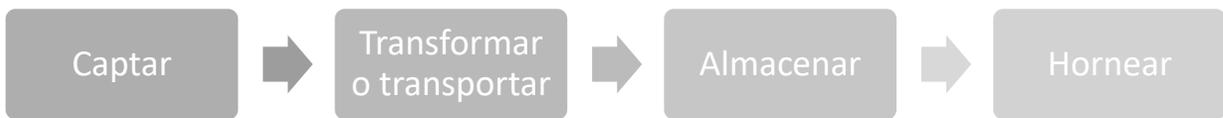


Fig. 13 Esquema con las principales funciones del sistema a diseñar. Fuente: Elaboración propia

3.2.1.1. Captar

Como se muestra en el esquema, el primer paso o función que se espera que realice el sistema es captar, es decir, captar la energía solar, un factor importante a decidir, ya que está, directamente, relacionado con el desempeño del horno solar y la eficiencia con la que se colecte la radiación solar, la cual depende en gran parte de la forma geométrica del concentrador y la dirección de este.

3.2.1.2. Transformar o transportar

La segunda función es transformar o transportar la energía solar antes captada, este paso se debe llevar a cabo ya sea transportando esta energía directamente a través de un fluido térmico o

transformando esta energía a electricidad, es importante que esta función se realice evitando en lo más posible las pérdidas de energía.

3.2.1.3. *Almacenar*

La tercera función, almacenar, se refiere al almacenamiento de energía captada y acumulación de esta para su uso durante el momento que se desee, tiene la ventaja de que se puede alcanzar un mayor potencial energético para la cocción de distintos alimentos.

3.2.1.4. *Hornear*

Finalmente, la última función la realizará el horno, donde el diseño y el mecanismo de cocción de los alimentos estará, directamente, relacionado con la selección de los elementos físicos que cumplen las funciones anteriores. Lo ideal es que la solución permita que la energía obtenida sea utilizada, eficientemente.

3.2.2. Alternativas de diseño

Para cada una de las cuatro funciones, anteriormente, definidas se asignarán los posibles mecanismos físicos existentes. A continuación, la ilustración 14 muestra un esquema con lo descrito.

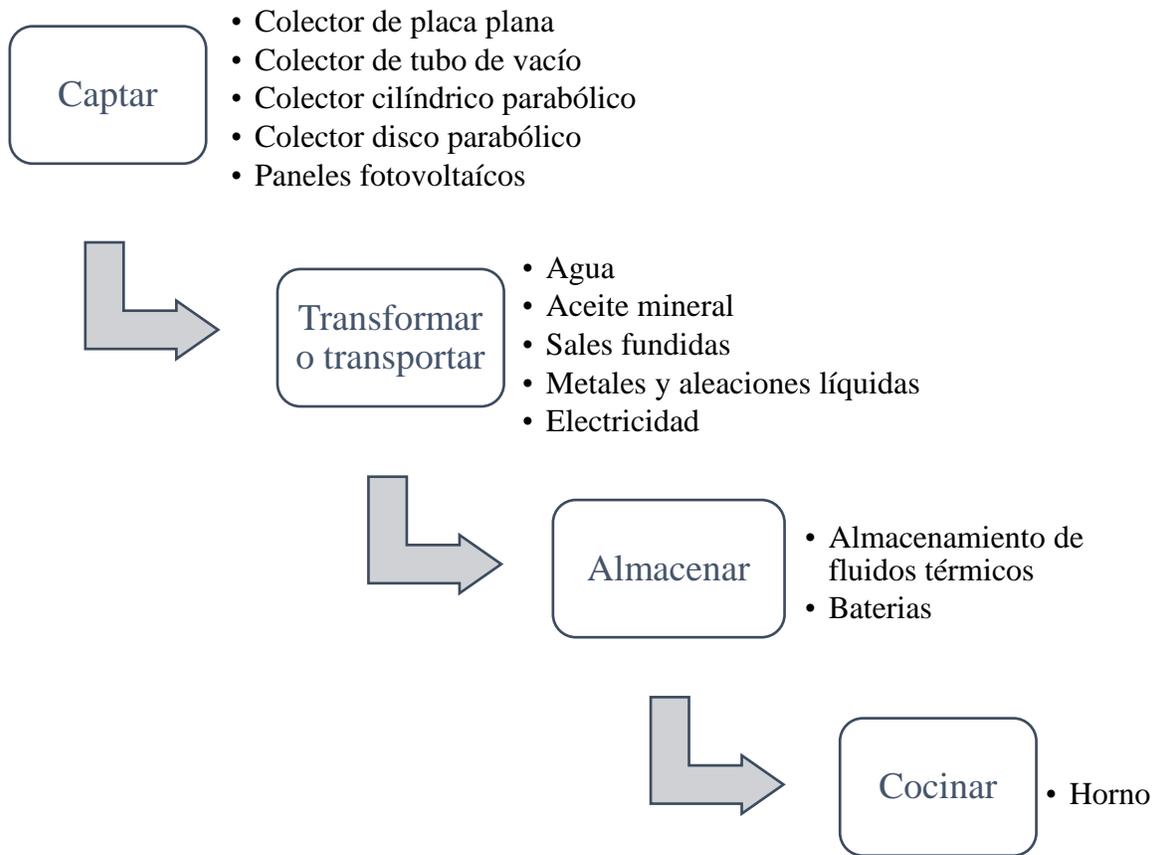


Fig. 14 Alternativas de mecanismos físicos para la solución a la problemática. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, las configuraciones están basadas en dos alternativas, la primera alternativa basada en conversión térmica directa consiste, básicamente, en la captación de energía solar mediante concentradores, esta energía es transportada hacia el horno mediante algún fluido térmico a través de tuberías. Mientras que la segunda alternativa basada en conversión de energía eléctrica consiste en la captación de energía solar mediante paneles fotovoltaicos, la cual es transformada en energía eléctrica, permitiendo así el funcionamiento del horno.

3.2.3. Requerimientos del sistema

Anteriormente, se mostraron las posibles soluciones físicas para la problemática, existiendo muchas configuraciones, por ello es importante reducir el número de éstas. Existen ciertos requerimientos para el desarrollo de este anteproyecto, los cuales harán que se descarten algunas de estas soluciones o configuraciones de diseño.

Cabe destacar que, en este caso en particular, si bien existen dos alternativas de solución se optará por la solución de carácter térmica, esto significa el transporte de calor y no de electricidad. La razón de esto es que, conceptualmente, la memoria persigue evidenciar las capacidades de diseño térmico. Si bien la solución eléctrica puede presentar ventajas, resulta atractivo y necesario el que se analice completamente la solución de carácter térmico, ya que la solución de carácter eléctrico, prácticamente, pasa a ser un diseño sobre la base de componentes estándares, ya que estructuralmente correspondería al panel de electro celdas, el banco de baterías, un horno eléctrico y el tendido eléctrico, por lo tanto no presenta una dificultad mayor, ni pone el evidencia los conocimientos ni las capacidades que se tienen para enfrentar un problema térmico.

Estas son las razones por las cuales se optó por desarrollar completamente el proyecto desde el punto de vista térmico y realizar un diseño básico y conceptual del diseño eléctrico sobre componentes estándares. Bajo ese criterio, los requerimientos serán los que se muestran a continuación, en la tabla 3.

Tabla 3 Requerimientos del sistema. Fuente: Elaboración propia

Temperatura de operación del horno	50 – 250 °C
Tiempo para alcanzar la temperatura mínima de cocción	Máximo 1,5 horas
Tipo de conversión de energía	Conversión térmica directa

3.2.4. Selección de la configuración de diseño

Una vez establecidos los requerimientos se irán descartando soluciones, dejando las más prometedoras.

Debido a la temperatura de operación del horno requerida (50 – 250 °C), se pueden descartar ciertos mecanismos para captar la energía solar. En el marco teórico se mostró que existen tres grupos de concentradores: los de baja temperatura los cuales operan a menos de 100 °C, los de

media temperatura los cuales operan entre los 100 y 400 °C y los de alta temperatura los cuales operan a temperaturas por sobre los 400 °C. Por lo que para este proyecto es necesario un concentrador de media temperatura, es decir, un concentrador cilíndrico parabólico.

Por otro lado, están las formas de transportar la energía solar captada por el colector hacia el horno, de los cuales el agua se descartaría ya que solo puede llegar a alcanzar una temperatura de 90°C. Mientras que los demás fluidos térmicos pueden alcanzar temperaturas superiores a los 200°C.

Finalmente, como se explicó, anteriormente, el principal requerimiento de esta memoria es que el sistema a diseñar sea de conversión térmica directa. Lo que descartaría la alternativa de utilizar paneles fotovoltaicos y con ello la electricidad. Sin embargo, esta alternativa se considerará en la evaluación económica para comparar y saber si la alternativa de carácter térmico es rentable.

A continuación, la tabla 4, muestra las configuraciones de diseño preseleccionadas.

Tabla 4 Preselección de configuraciones de diseño. Fuente: Elaboración propia

Solución 1	Concentrador cilíndrico parabólico – Aceite mineral – Almacenamiento – Horno
Solución 2	Concentrador cilíndrico parabólico – Sales fundidas – Almacenamiento – Horno
Solución 3	Concentrador cilíndrico parabólico – Metales y aleaciones líquidas – Almacenamiento – Horno

Como se puede observar, las alternativas de configuraciones de diseño se redujeron a tres dados los requerimientos de este anteproyecto. La diferencia entre estas tres soluciones se encuentra en la manera de transportar la energía solar captada hacia el horno, a través de un fluido térmico.

A través de la tabla 5 mostrada a continuación, se seleccionará uno de los tres fluidos térmicos, a partir de una matriz multicriterio. Este método consiste en que a partir de criterios de evaluación se toman decisiones.

Esta matriz en particular está basada en seis criterios de evaluación: el fluido a utilizar debe ser factible económicamente, ya que este tendrá que ser cambiado cada cierto tiempo, además debe haber disponibilidad de información, como las propiedades térmicas. El fluido debe tener una baja densidad de almacenamiento y debe ser un fluido poco corrosivo para evitar daños en las instalaciones. También, es importante que tenga una alta conductividad térmica y un nivel alto de uso en plantas térmicas.

Los tres fluidos térmicos serán evaluados con estos seis criterios otorgando a cada uno de estos criterios un puntaje del 1 al 5, donde el 1 significa que el criterio se cumple de forma “deficiente”, mientras que el 5 significa que el criterio se cumple de forma “muy bueno”, cabe destacar que estos puntajes serán otorgados por la autora de esta memoria. Finalmente, se sumarán los puntajes obtenidos de cada solución.

Tabla 5 Matriz multicriterio para selección del fluido térmico. Fuente: Elaboración propia

	Puntuación						Criterios de evaluación	
Solución	1: Deficiente 2: Regular 3: Aceptable 4: Bueno 5: Muy bueno						A: Factible económicamente B: Información suficiente C: Baja densidad de almacenamiento D: Fluido poco corrosivo E: Alta conductividad térmica F: Alto nivel de uso en plantas	Puntaje
	A	B	C	D	E	F	Detalles	
1	1	2	4	4	4	3	El aceite mineral tiene una alta conductividad térmica y es poco corrosivo, pero tiene un alto costo en comparación a las sales fundidas y no se encuentra mucha información disponible.	18
2	5	4	3	2	3	5	Las sales fundidas son las más utilizadas en las plantas térmicas, existe mucha información al respecto y es económica. Sin embargo, es muy corrosivo por lo que requiere de un anticongelante.	22
3	1	2	4	4	4	1	Los metales y aleaciones líquidas tienen una alta conductividad térmica y son poco corrosivos, pero existe muy poca información respecto a este fluido y tiene un alto costo.	16

Los resultados obtenidos a través de la matriz indican que la solución seleccionada es la 2, ya que tiene el puntaje máximo en comparación a las otras dos alternativas. Esta solución consiste en captar la energía solar a partir de un concentrador cilíndrico parabólico, luego esta energía será transportada a través de sales fundidas por tuberías, para llegar al horno permitiendo su funcionamiento.

3.3. DISEÑO TÉRMICO DEL HORNO

En esta sección se espera obtener a través de cálculos y gráficos, las dimensiones del horno, de tuberías y selección de materiales.

3.3.1. Esquema preliminar del horno

Para realizar los cálculos se deben primero definir las dimensiones principales del horno, esto se realizará en base a hornos disponibles en el mercado. A continuación, la figura 15, muestra un esquema básico de las dimensiones exteriores del horno.

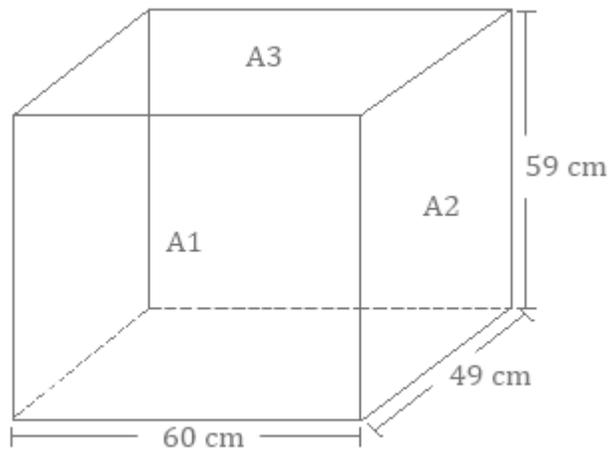


Fig. 15 Dimensiones exteriores del horno Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la imagen, el horno tendrá un ancho de 60 cm, un alto de 59 cm y una profundidad de 49 cm. Además, se representaron las tres distintas áreas de cada pared, lo que será útil para cálculos posteriores.

3.3.2. Elementos de transferencia de calor aplicados al horno

Al haber una diferencia de temperaturas en el interior como en el exterior de un horno, se producen dos mecanismos de transferencia de calor, primero convección natural desde el interior del horno a la pared, luego conducción debido a las láminas exteriores del horno y

convección natural desde la superficie de la pared hacia el exterior del horno. Esto se representará a partir de la figura 16.

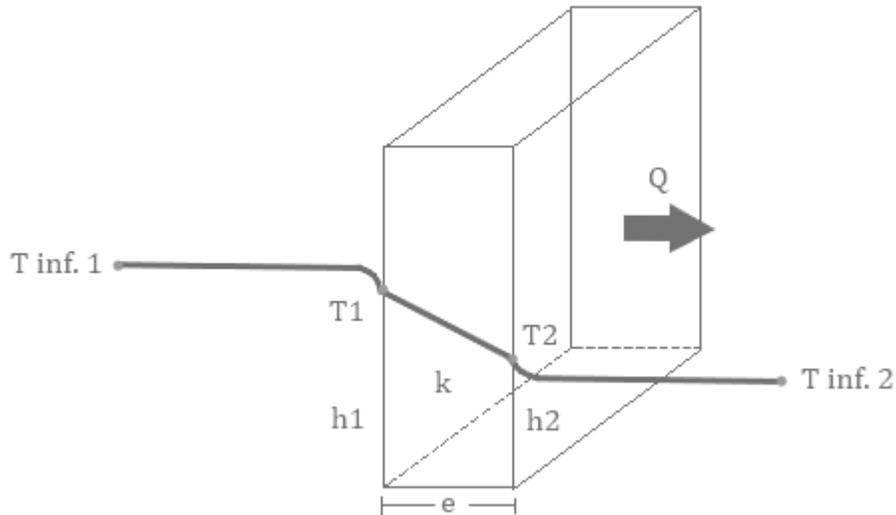


Fig. 16 Representación paredes del horno. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, se muestran los principales parámetros que se necesitan determinar, los coeficientes convectivos, los cuales se pueden calcular, el coeficiente de conducción, según sea el material seleccionado de las láminas exteriores del horno y el espesor de estas. Todos estos parámetros se unen en la ecuación del coeficiente global de transferencia de calor, definida en el marco teórico.

3.3.3. Selección material paredes del horno

El material de la estructura del horno debe ser compatible con los alimentos, ya que no pueden emplear materiales tóxicos o perjudiciales para la salud. Uno de los metales utilizados en la cocina, es el hierro, este difunde bien el calor, ya que, tiene una alta conductividad térmica, por lo que son adecuados para planchas o sartenes y no libera sustancias tóxicas. Por su lado, el titanio también se emplea en este tipo de aplicaciones, pero su elevado precio se vuelve una desventaja que limita considerablemente su uso.

Por otro lado, el acero inoxidable es el metal más, comúnmente, utilizado para las estructuras de hornos, ya que este tiene un menor costo en comparación al titanio y otros metales similares. Además, tiene una conductividad térmica menor al hierro, lo que evita que se pierda una menor

cantidad el calor por las paredes del horno facilitando sostener la temperatura en el interior de éste.

A continuación, el gráfico 5, muestra la conductividad térmica de los metales antes mencionados, este se realizó en base a datos obtenidos en la literatura técnica (Cengel & Ghajar, 2011) los datos se encuentran en los anexos.

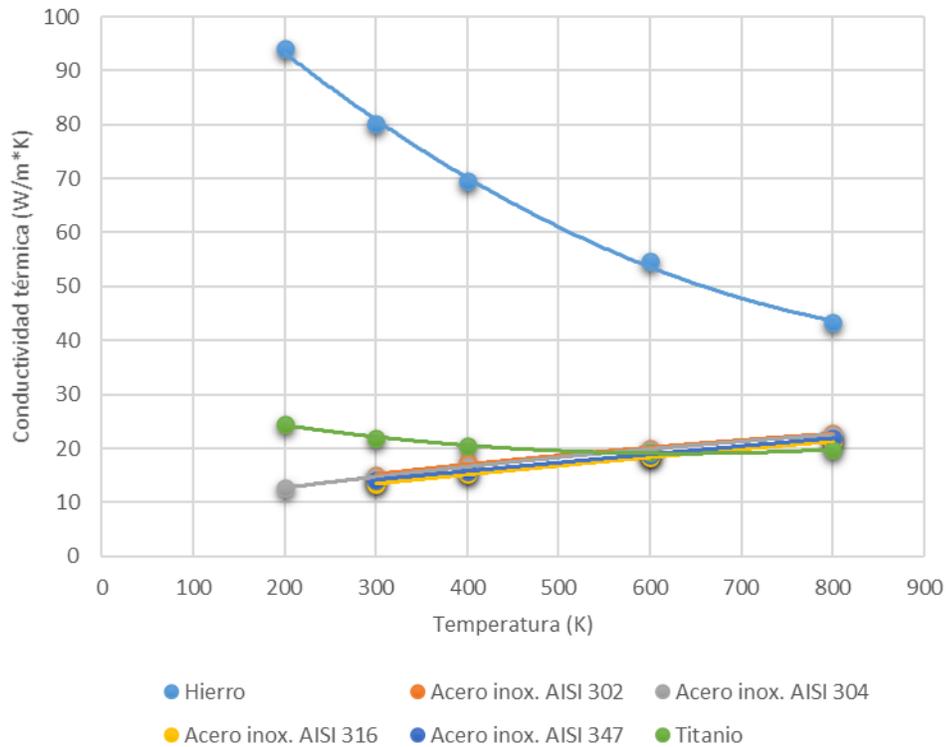


Gráfico 5 Conductividad térmica de metales a diferentes temperaturas. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar y como se mencionó, anteriormente, el acero inoxidable tiene una baja conductividad térmica y tiene un relativamente bajo costo. Es por esto, que es altamente utilizado para la fabricación de hornos. Por esta razón se seleccionará este metal.

Específicamente, se seleccionará el acero inoxidable AISI 304, ya que este a diferencia del acero inoxidable AISI 302, tiene un bajo contenido en carbono, lo que le otorga una mejor resistencia a la corrosión. Además, es el más utilizado para fabricación de estructura de electrodomésticos.

3.3.4. Resultados de parámetros para estructura del horno

En este ítem se muestran los resultados de las pérdidas de calor a partir de la ecuación del coeficiente global de transferencia de calor, ya que, la estructura del horno presentará convección y conducción a la vez.

Para los cálculos de los coeficientes convectivos, se consideró una temperatura interior del horno igual a 250 °C, una temperatura de la superficie interior del horno igual a 260°C, una temperatura de la superficie exterior del horno igual a 65 °C y una temperatura exterior de 20°C. Con estos datos se procedió a calcular los números de Rayleigh y Nusselt y posteriores coeficientes convectivos, esto se realizó para cada superficie del horno.

Finalmente, se obtuvieron los valores de pérdidas de calor a través de las paredes del horno para distintos valores de espesor de estas. Todo este procedimiento se muestra en los anexos. La tabla 6, muestra los valores.

Tabla 6 Pérdidas de calor a través de las paredes del horno con distintos espesores. Fuente: Elaboración propia

Espesor pared (mm)	Pérdidas de calor (W)
1	686,561
5	686,328
10	686,037
15	685,747
20	685,456
25	685,166
30	684,877
35	684,587

El gráfico 6, muestra los resultados anteriores.

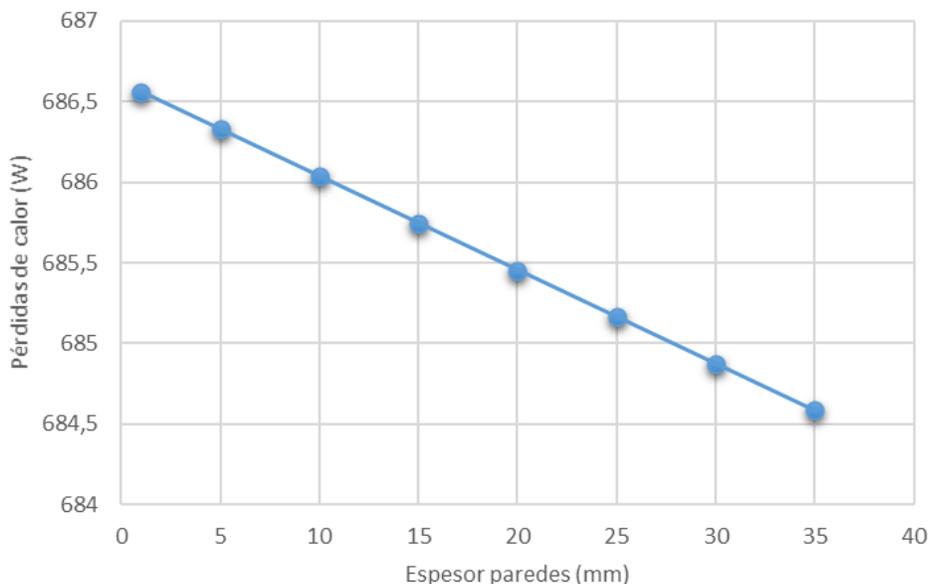


Gráfico 6 Pérdidas de calor en función de diferentes espesores. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, a medida que se aumenta el espesor de las paredes, disminuyen las pérdidas de calor. Sin embargo, las diferencias son leves, debido a las altas las diferencias de temperaturas que existen en el interior como en el exterior del horno. Al no influir el espesor de las paredes del horno en las pérdidas de calor de este, se seleccionará un espesor de 1 mm, debido a que mientras mayor sea el espesor, mayor será el costo de la estructura.

Sin embargo, con 1 mm de espesor de las paredes del horno, se produce una pérdida de calor cercano a un 25%, lo cual no está dentro de los requerimientos definidos. Se espera que se produzca una pérdida de calor igual a un 15% a través de las paredes del horno. Por esta razón, no bastaría solo el acero inoxidable como parte de la estructura, el horno debe tener algún tipo de aislante térmico.

En el mercado existen muchos tipos de aislantes térmicos, para este caso en particular es necesario un aislante que soporte altas temperaturas y que no sea tóxico para los alimentos. Uno de estos aislantes es la lana mineral, esta tiene diferentes aplicaciones. Además, de resistir altas temperaturas, no sufre variaciones dimensionales, tiene una alta densidad, es inerte e incombustible. Por esta razón, se realizaron los cálculos, nuevamente, con aislante térmico. A continuación, la tabla 7 muestra los resultados de pérdidas de calor con diferentes espesores de aislante y con paredes de acero inoxidable tanto en el interior como en el exterior del horno de 1 mm de espesor.

Tabla 7 Pérdidas de calor a través de las paredes del horno con distintos espesores de aislante térmico. Fuente: Elaboración propia

Espesor aislante (mm)	Pérdidas de calor con aislante térmico (W)
1	660,519
5	573,774
10	492,997
15	410,561
20	362,169
25	324,005
30	293,131

El gráfico 7, muestra el comportamiento de los resultados anteriores del horno con aislante térmico, incluyendo también a modo de comparación los resultados del horno sin aislante.

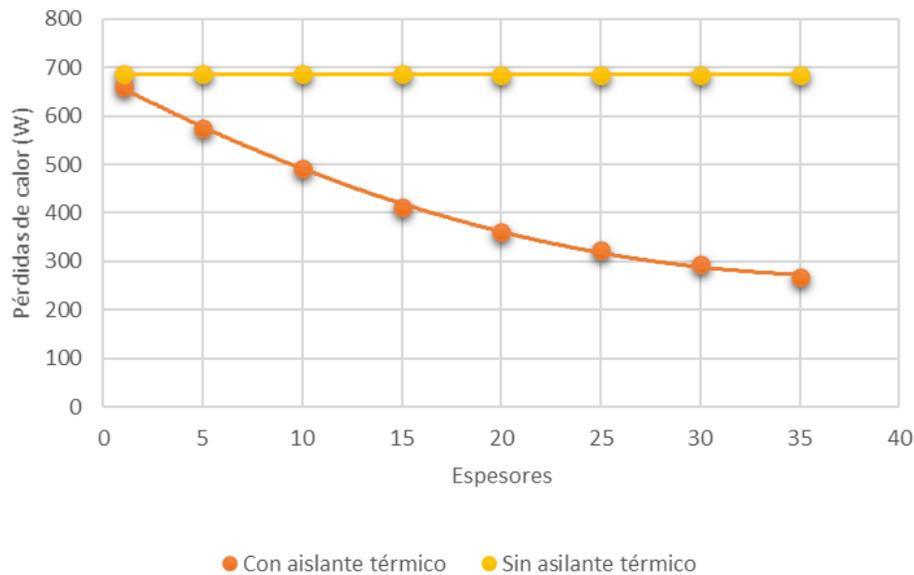


Gráfico 7 Comportamiento de las pérdidas de calor respecto de los espesores de los materiales que conforman su pared. Fuente: Elaboración propia

Los resultados y el gráfico muestran que, al incluir un aislante a la estructura del horno, disminuyen, considerablemente, las pérdidas de calor. Y que mientras más espesor tenga la capa de aislante, mucho menor será la transferencia de calor hacia el exterior.

Para seleccionar el espesor del aislante, se considerará una pérdida del 15% como se mencionó, anteriormente. A continuación, la tabla 8 muestra las pérdidas de calor expresadas en porcentajes.

Tabla 8 Pérdidas de calor a través de las paredes del horno expresadas en porcentajes. Fuente: Elaboración propia

Espesor del aislante (mm)	Pérdidas de calor (%)
1	24,5
5	21,3
10	18,3
15	15,2
20	13,4
25	12,0
30	10,0
35	9,9

Como se muestra en la tabla, el valor más cercano es un espesor de 15 mm. Sin embargo, se considerará un espesor de 30 mm debido a que este es el espesor mínimo que ofrece el mercado. Por lo que finalmente, las pérdidas a través de las paredes serán de un 10 %.

3.3.5. Sistema de intercambio de calor

Una vez que se definió la estructura del horno, se desarrollará el sistema de intercambio de calor dentro del horno.

Existen variados métodos de transferir el calor, de los cuales para esta memoria destacan: los serpentines con aletas planas, los cuales están diseñados para diferentes aplicaciones como evaporadores o condensadores de refrigeración, calentadores, para cámaras de secado, etc. También éstos pueden ser fabricados a medida, según sea la aplicación. Por otro lado, existen los tubos con aletas, los cuales se les ha aumentado el área de transferencia con aletas radiales o longitudinales con el propósito de mejorar, sustancialmente, la capacidad de transferir calor, su aplicación es la misma que los serpentines con aletas planas.

Ambas opciones mencionadas cumplen la misma función, por lo que a partir de criterios de evaluación se seleccionará la solución óptima para este anteproyecto.

A continuación, la tabla 9 muestra la matriz multicriterio utilizada para la selección del mecanismo de intercambio de calor al interior del horno, donde la solución 1 será el serpentín con aletas planas y la opción 2 será los tubos con aletas. Estas estarán evaluadas a partir de cinco criterios de evaluación: factibilidad económica, variedad de fabricantes, amplia gama de materiales, amplio rango de medidas de fabricación y una alta conductividad térmica. A los cuales se les asignará un puntaje, donde 1 será deficiente y 5 muy bueno.

Tabla 9 Matriz multicriterio para selección de mecanismo de intercambio de calor al interior del horno. Fuente: Elaboración propia

Solución	Puntuación					Criterios de evaluación	Puntaje
	A	B	C	D	E	Detalles	
	1: Deficiente 2: Regular 3: Aceptable 4: Bueno 5: Muy bueno					A: Factible económicamente B: Variados fabricantes C: Amplia gama de materiales D: Amplio rango de medidas de fabricación E: Soporta altas temperaturas	
1	3	5	5	4	3	Los serpentines con aletas planas tienen cuenta con una amplia gama de fabricantes, materiales y medidas de fabricación. Sin embargo, para esta aplicación en específica se necesita que soporte una alta temperatura debido al fluido térmico que se debe transportar.	17
2	5	5	5	5	5	Las tuberías con aletas son fabricadas por diversas empresas, con el material y las dimensiones que uno desee. Y están diseñadas para transferir el calor hasta en 9 veces más que las tuberías lisas.	22

La matriz muestra que la solución 2, las tuberías con aletas, es la solución más apropiada para esta memoria. Estas estarán dispuestas en la superficie inferior y la superficie superior del horno, configuración que, actualmente, es la más eficiente. La disposición en la superficie inferior permite que el calor se desplace hacia arriba, horneando con mayor facilidad los alimentos. Mientras que la disposición en la superficie superior permite que los alimentos se doren y/o gratinen.

3.3.6. Área del colector solar

Anteriormente, en la ecuación 9, se estimó un área preliminar del colector solar igual a $1,67 \text{ m}^2$. Sin embargo, esta área está basada en una superficie plana y en el desarrollo del diseño conceptual del horno se decidió optar por un concentrador de tipo cilindro parabólico debido a los requerimientos del sistema.

La eficiencia de estos colectores varía entre un 60% a 70%, esto es debido a pérdidas originadas por las características geométricas, ópticas y térmicas del colector. Además, se debe considerar que existirán pérdidas a través de las tuberías en el transporte de la energía solar captada, lo cual implica que se debe considerar un factor de sobredimensionamiento. En este caso, se considerará un 10%, a partir de lo sugerido por las normas ASHRAE. Al aplicar estas consideraciones, el área del colector solar se incrementará a $2,4 \text{ m}^2$.

3.3.7. Pérdidas de calor a través de tuberías

Normalmente, para el transporte de fluidos térmicos a altas temperaturas y corrosivos como lo son las sales fundidas, se utilizan tuberías de acero. Particularmente, “el acero negro”, contiene una capa de óxido negro, la cual se forma cuando la tubería es forjada y sellada con un aceite protector para evitar la corrosión, estas no presentan daños externos como cortaduras o rasguños, tampoco se encogen, ni pierden su forma. Estas tuberías tienen una gran resistencia a la tensión, adecuándose a aplicaciones exigentes. Además, en la instalación de estas tuberías se puede utilizar soldadura, lo cual permite a los diseñadores realizar los ajustes necesarios. Por lo que, para este anteproyecto, se utilizarán tuberías de este material. También se considera una aislación térmica, espuma elastomérica, la que es utilizada, comúnmente, en procesos industriales que transportan gases o fluidos a altas temperaturas, este aislante tiene una alta resistencia a la corrosión y una alta vida útil.

Por otro lado, para estimar las pérdidas de calor, las cuales como se mencionó, anteriormente, no deben superar un 10%, se debe dimensionar la estructura desde la captación de energía solar, hasta el horno. La figura 17 muestra un esquema general de la disposición de las tuberías, con la finalidad estimar una longitud y posteriormente las pérdidas de calor.

En un primer instante se consideró que el colector solar estaría ubicado en el techo de la vivienda. Sin embargo, esto se reconsideró y se decidió que la ubicación sería a nivel del suelo debido a diversos factores: primero a que no se tendrá seguridad de la resistencia de la estructura del techo, también un clima muy adverso podría producir un volcamiento del colector. Por otro lado, la ubicación en el suelo facilita el mantenimiento del colector.

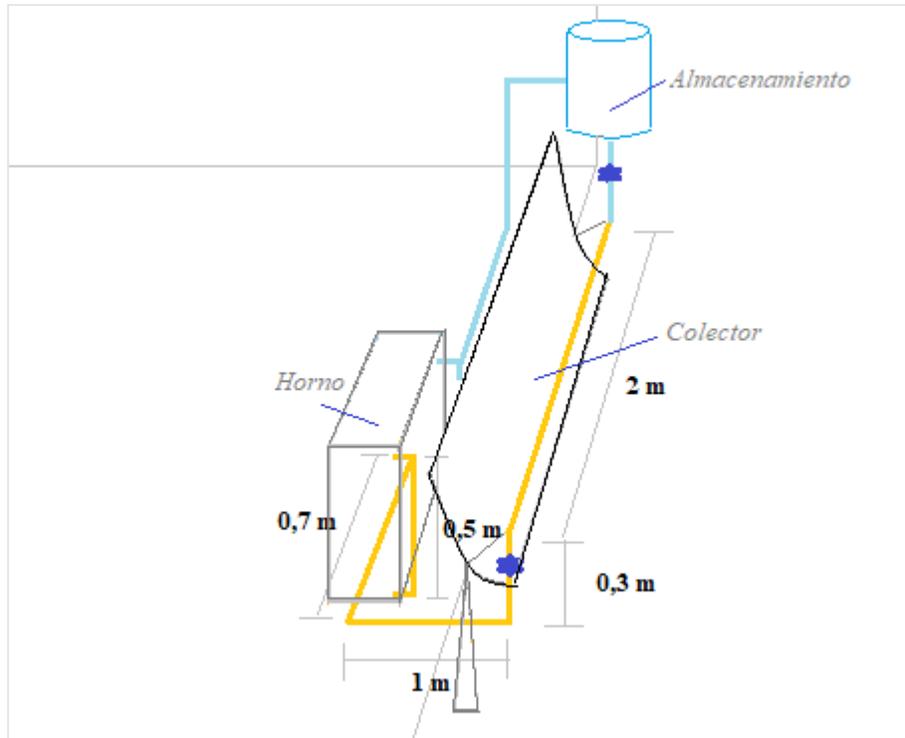


Fig. 17 Disposición de tuberías y longitudes. Fuente: Elaboración propia

Para el esquema se consideró que los hornos empotrados se pueden ubicar desde los 10 cm desde el suelo, según el tipo de puerta que tenga, si esta es extraíble, tipo cajón no puede superar los 70 cm de altura, en cambio si esta es tipo abatible puede superar los 70 cm. Para esta memoria se consideró una puerta del tipo abatible, donde el horno se ubicó a una altura de 10 cm, con el fin de disminuir las pérdidas de calor a través de las tuberías. Además, la altura de la estructura que sostiene el colector será de 0,5 m. Teniendo en cuenta estas consideraciones, la longitud estimada de tuberías es igual a 5,5 m, pero las pérdidas de calor se estimarán desde la salida del colector hasta la entrada del horno, es decir, una longitud de 2,5 m.

Las tuberías transfieren calor por conducción a través de las paredes y convección y radiación hacia el exterior. La convección en el interior de las tuberías se despreciará ya que se considerará una temperatura de las sales igual a la temperatura interior de las paredes de las tuberías. Teniendo en cuenta esto, se estimó que las pérdidas de calor por de las tuberías es 141,76 W, esto corresponde a un 5,25 % de la potencia del horno, lo cual está dentro de los requerimientos propuestos, los cálculos y ecuaciones utilizadas se muestran en el anexo 5.

3.4. DISEÑO MECÁNICO DEL HORNO

En esta sección se dimensionarán los elementos del colector solar con el fin de realizar un análisis de fuerzas. Por otro lado, se definirán los elementos de unión de todo el sistema. Finalmente, se realizará un dibujo 3D para representar el anteproyecto.

3.4.1. Dimensionamiento del colector solar

En esta parte se espera obtener el peso del colector solar para estimar la fuerza que debe soportar la estructura que lo sostendrá. Para esto es necesario conocer los parámetros del colector, del tubo absorbedor y de la estructura.

A continuación, la figura 18 muestra los parámetros del receptor solar.

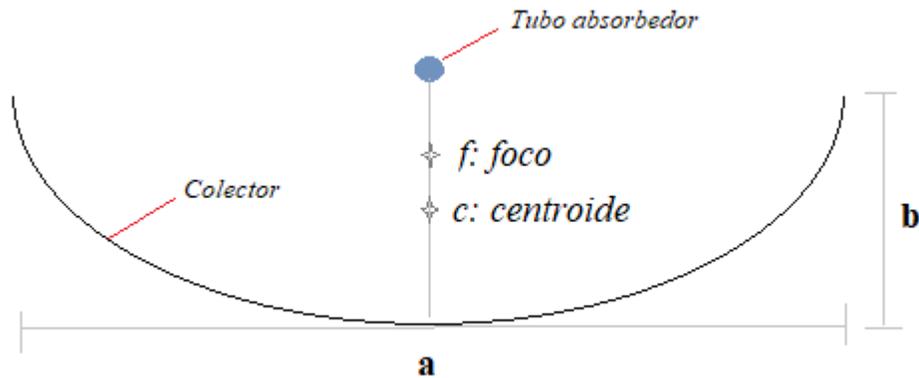


Fig. 18 Parámetros del receptor solar. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la estructura que sostendrá el colector solar será de acero SAE 1020 y tendrá una disposición en los laterales de forma triangular para ahorrar en materiales. Además, estará conformada de vigas cuadradas de 20 mm en la parte inferior y una viga circular de 40 mm en la parte superior. Se consideró una viga circular de 40 mm en la parte superior, ya que al realizar la comparación con una viga rectangular de 20 x 40 mm, se produce una menor deflexión por el peso del colector. Esto se puede comprobar a partir de la ecuación 10 de deflexión que ofrece (Hibbeler, 2011), la cual se muestra a continuación:

$$v_{m\acute{a}x} = \frac{-5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (10)$$

Donde $v_{\text{máx}}$ es la deflexión máxima en la viga, w es la fuerza que producirá el colector a lo largo de la viga debido a su peso, L es el largo de viga, E es el módulo de elasticidad del material, I es la inercia debido a la geometría de la viga. Si se realiza un cálculo solo de la inercia de las geometrías se puede comprobar que la de la viga circular es mayor a la de la viga rectangular, lo que produce que la deflexión sea menor con una viga circular, esto explica la selección de ésta. La figura 19, muestra la disposición y las dimensiones de las vigas de la estructura.

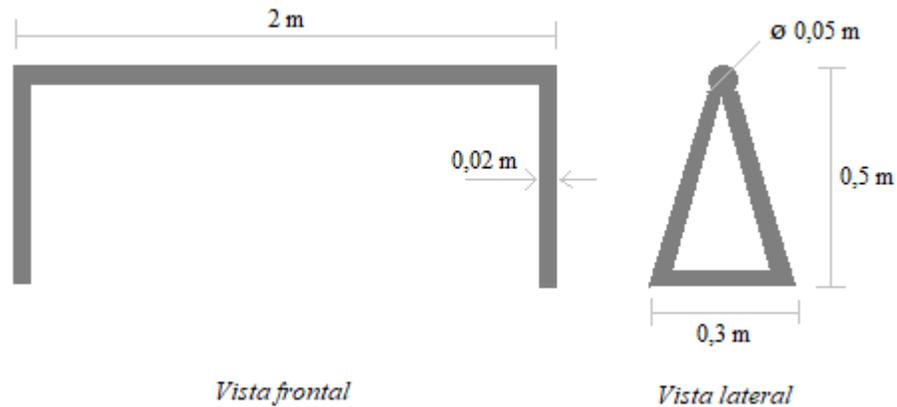


Fig. 19 Estructura del colector del horno. Fuente: Elaboración propia

Los cálculos de los centroides y pesos de los elementos del colector solar se encuentran en el anexo 6, estos se realizaron en base al área que se requería del colector a través de la ecuación de la parábola, considerando un ancho de 1 m. Además, el receptor será de acero inoxidable y el tubo receptor de acero galvanizado. En la tabla 10 se muestran los resultados de estos parámetros.

Tabla 10 Valores de parámetros del colector solar. Fuente: Elaboración propia

Parámetros	Resultado
Largo (l)	2 m
Foco (f)	0,35 m
Centroide receptor (c)	0,21 m
Peso receptor (P)	187,8 N
Peso tubo receptor (P ₂)	22,6 N
Peso estructura (P _E)	227,6 N

Con los resultados de estos parámetros se puede realizar un diagrama de fuerzas, lo cual se muestra en la figura 20.

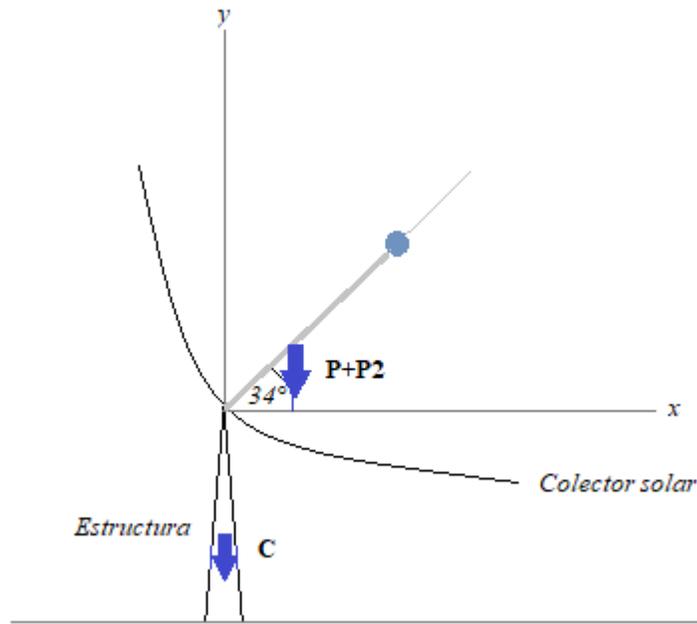


Fig. 20 Fuerzas involucradas en el colector solar. Fuente: Elaboración propia

Donde $P+P_2$ corresponde al peso del receptor solar y C corresponde al contrapeso que debe ejercer la estructura para soportar el colector solar.

Para que haya un equilibrio estático entre el colector y la estructura, la sumatoria de los momentos respecto al eje de giro debe ser igual a 0.

$$\sum M_o = (P + P_2) \cdot R_{1,x} \cdot \cos 34^\circ + (P + P_2) \cdot R_{1,y} \cdot \text{sen } 34^\circ - C \cdot R_2 = 0 \quad (11)$$

Donde R_1 es la distancia desde el punto (0,0) hasta el centroide del receptor y R_2 es la distancia desde el punto (0,0) hasta el centroide de la estructura.

Despejando C , se obtiene lo siguiente:

$$C = \frac{(P + P_2) \cdot R_{1,x} \cdot \cos 34^\circ + (P + P_2) \cdot R_{1,y} \cdot \text{sen } 34^\circ}{R_2}$$

$$C = 190,13 \text{ N}$$

Este resultado comparado con el peso de la estructura es menor, es decir, el colector solar no tenderá a voltearse, pero podrían existir fuerzas externas como el viento, las lluvias o un contacto producido por personas que produzcan un volcamiento del colector. Estas fuerzas se compensarán con los elementos de unión sobre la superficie del suelo.

3.4.2. Elementos de unión del sistema

La estructura del horno estará unida mediante soldadura, el electrodo más común es el 308L, este ha sido diseñado especialmente para aceros inoxidable, están recomendados para aplicaciones resistentes a la corrosión. La puerta del horno estará unida a la estructura del horno mediante bisagras que tienen un resorte, especialmente, diseñadas para estos electrodomésticos.

Por otro lado, la estructura del colector solar estará unida mediante soldadura, el electrodo más común para un acero SAE 1020 es el punto azul. Esta estructura, estará unida al suelo mediante sobrecimientos, a través de pernos.

3.4.3. Dibujos 3D

En esta sección, se mostrarán dibujos en 3D realizados en el software Inventor. Además, de croquis de los componentes de la estructura del horno. Estos se muestran a continuación, en las figuras 20 - 24.

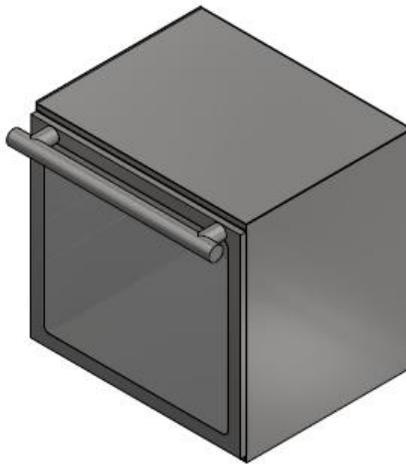


Fig. 21 Representación 3D del horno. Fuente: Elaboración propia

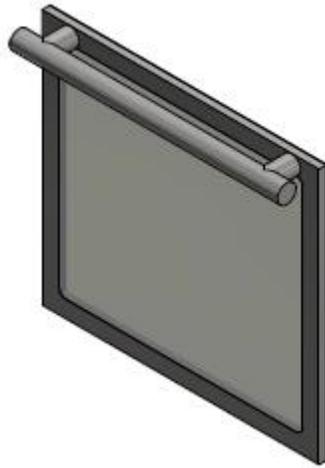


Fig. 22 Representación 3D de la puerta del horno. Fuente: Elaboración propia

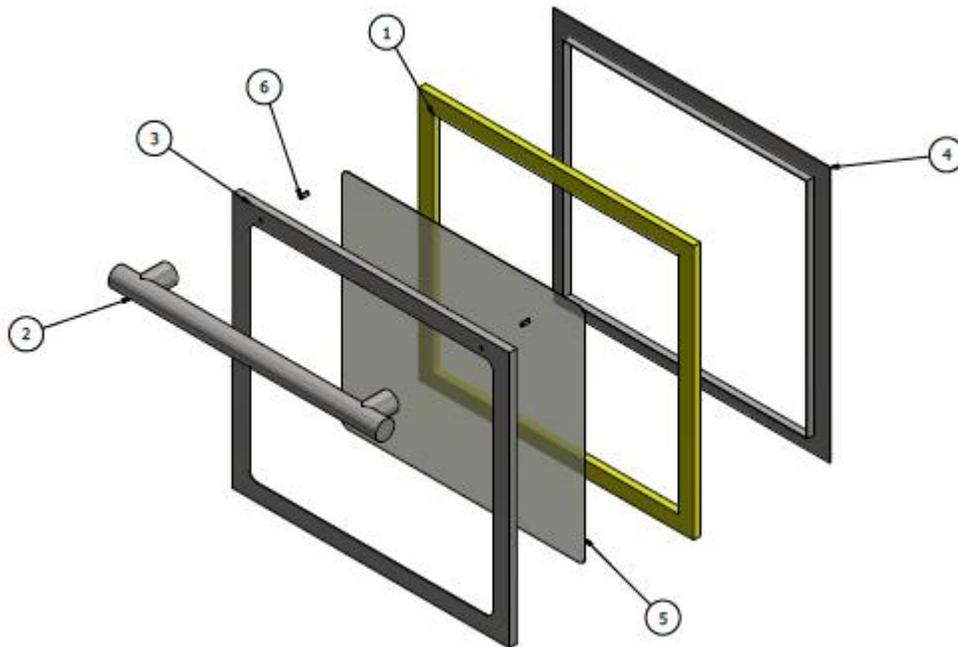


Fig. 23 Despiece de la puerta del horno. Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Piezas puerta del horno

N°	Nombre pieza	Descripción
1	Aislante térmico	
2	Tirador puerta del horno	Acero inoxidable
3	Tapa exterior	Acero inoxidable
4	Tapa interior	Acero inoxidable
5	Cristal	
6	Pernos sujeción tirador	M6x16

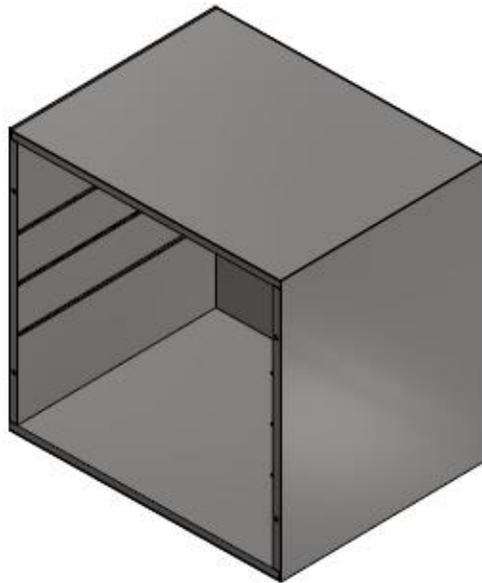


Fig. 24 Representación 3D estructura del horno. Fuente: Elaboración propia

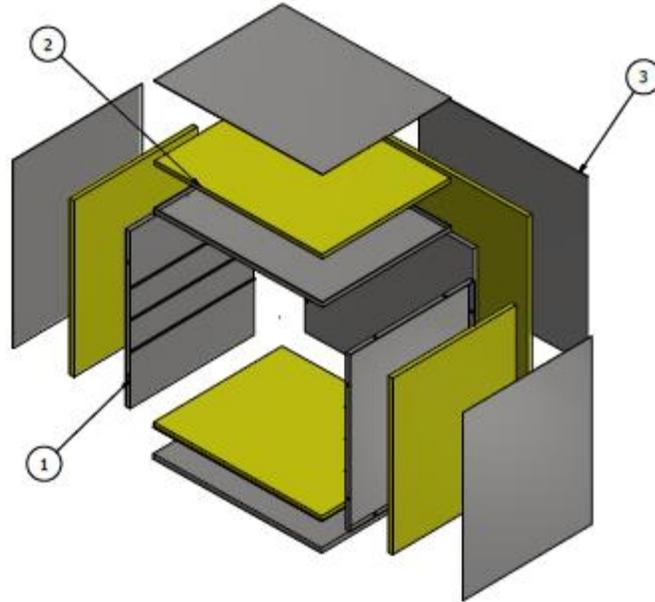


Fig. 25 Despiece de la estructura del horno. Fuente: Elaboración propia

N°	Nombre pieza	Descripción
1	Tapas interiores	Acero inoxidable, espesor 1 mm
2	Aislante térmico	Espesor 15 mm
3	Tapas exteriores	Acero inoxidable, espesor 1 mm

A modo de poder visualizar de mejor manera como se distribuye la red de tuberías, se realizaron croquis en 3D donde se incluyen todos los componentes que permiten el funcionamiento del horno, estos son: el colector solar, el almacenamiento térmico y el horno. Esto se muestra en las figuras 25-27.

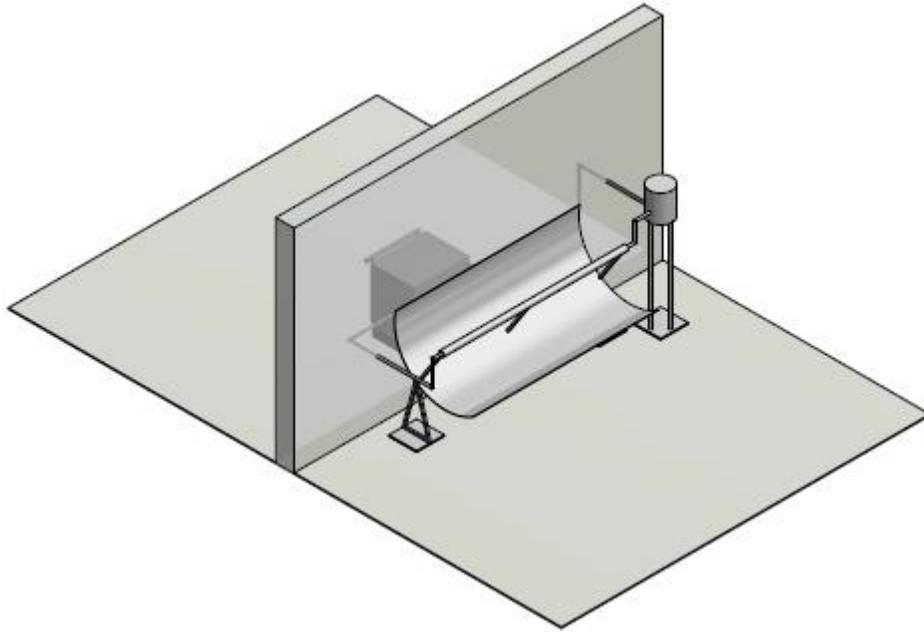


Fig. 26 Primera vista isométrica. Fuente: Elaboración propia

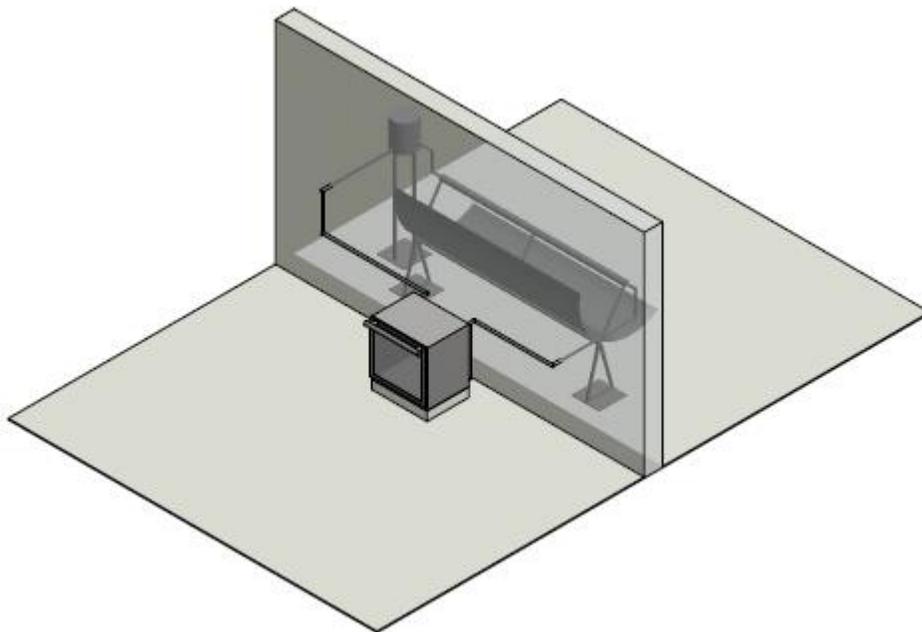


Fig. 27 Segunda vista isométrica. Fuente: Elaboración propia

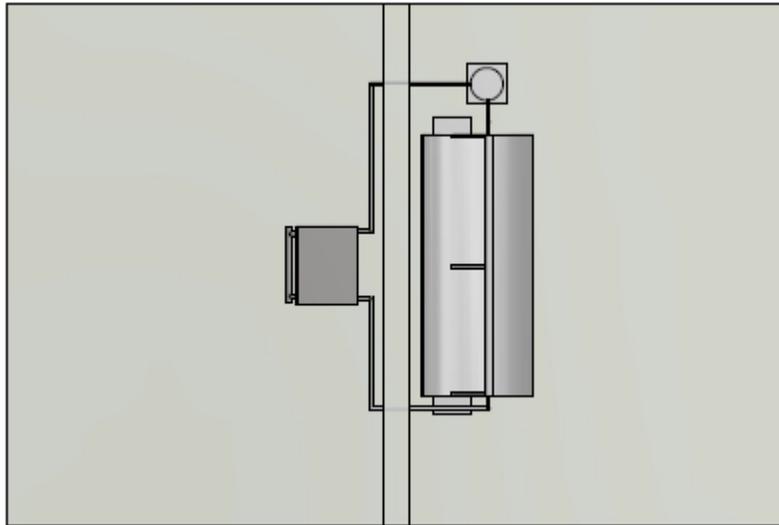


Fig. 28 Vista superior red de tuberías. Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Este cuarto capítulo consistirá en realizar un análisis de costos del anteproyecto y de un proyecto alternativo a fin de realizar una comparación entre ambos y determinar la rentabilidad del trabajo realizado. Posteriormente, se realizará un análisis de estos resultados.

4.1. ANÁLISIS DE COSTOS DEL ANTEPROYECTO

La tabla 12 muestra la inversión detallada de los materiales para la fabricación del anteproyecto.

Tabla 12 Inversión del anteproyecto. Fuente: Elaboración propia a partir de catálogos web

Material	Unidad de medida	Cantidad	Costo unitario	Lugar de cotización	Costo total	
Estructura del horno						
Plancha de acero inoxidable 1 mm de espesor	m ²	Tapas laterales	1,096	\$66.266 (1 x 3) m	Dimaco	\$66.266
		Tapas sup. e inf.	1,188			
		Tapa trasera	0,693			
		Puerta horno	0,110			
			3,087			
Lana mineral 30 mm de espesor	m ²	Laterales	0,500	\$34.600 (9 m ²)	Ayrsa	\$34.600
		Sup. e inf.	0,560			
		Trasera	0,330			
		Puerta horno	0,073			
			1,463			
Cristal templado 4 mm de espesor	m x m	0,483 x 0,528	\$12.990 (0,5 x 0,9) m	Winko	\$12.990	
Manillon puerta horno	-	1	\$17.690 (0,4 m)	Mercado libre	\$17.690	
Bisagras puerta horno	-	2	\$7.340	Mercado libre	\$7.340	
Colector solar						
Plancha de acero inoxidable 1 mm de espesor	m ²	2,4	\$66.266 (1 x 3) m	Dimaco	\$66.266	
Viga cuadrada de acero SAE 1020	m x m	0,2 x 2,4	\$26.990 (0,2 x 6) m	Prodalam	\$8.750	

Viga circular acero	m x m	0,4 x 2	\$22.630 (0,4 x 2 m)	Prodalam	\$22.630
Tubería acero galvanizado 1”	m	2	\$11.980 (1” x 3 m)	Tool Manía	\$11.980
Tuberías					
Tuberías acero “negro” 1”	m	5,5	\$8.190 (1” x 6 m)	Sodimac	\$8.190
Espuma elastomérica 20 mm espesor	m	2,5	\$5.945 (1 m)	Isoplast	\$17.835
Tuberías con aletas 1”	m	5,88	\$5.766 (1 m)	Aircofin	\$34.596
Almacenamiento térmico					
Perfil de acero SAE 1020	m		\$21.190 (6 m)	Sodimac	\$21.190
Tanque almacenamiento	-	-	-	-	-

El tanque no se consideró, debido a que éste será fabricado de acero inoxidable, a partir de la superficie sobrante que se empleó en el receptor solar. Teniendo en cuenta esto, el costo de los materiales tiene un valor igual a \$330.323. A lo cual se le sumarán los costos por mano de obra, los cuales se muestran en la tabla 13.

Tabla 13 Costos de mano de obra. Fuente: Elaboración propia

Oficio	Horas de trabajo	Costo diario	Costo total
Mano de obra			
Soldador	24 horas (3 días)	\$43.000	\$129.000
Ayudante	24 horas (3 días)	\$15.000	\$45.000

El costo total de mano de obra es de \$174.000. Lo cual sumado al costo de materiales da un total igual a \$504.323.

Como se describió en la problemática, se estima que un 65,5% utiliza hornos con un consumo promedio de energía anual de una vivienda de 306 kW·h. Considerando que 1 kW·h tiene un valor aproximado de \$290 (Sasipa, 2020), una vivienda gasta, anualmente, \$88.740 en uso de hornos.

Una vez obtenido el costo de inversión del proyecto, se estimarán: el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (PRI). Considerando una tasa de descuento (TREMA) mínima de un 1% y costos asociados a mantenimiento cada tres años de \$15.000. La tabla 14, muestra el flujo de caja realizado para el cálculo de estos datos en un período de 15 años, cantidad que corresponde a la vida útil del sistema.

Tabla 14 Flujo de caja del anteproyecto. Fuente: Elaboración propia

Periodo	0	1	2	3	14	15
Ingresos		\$88.740	\$88.740	\$88.740	\$88.740	\$88.740
Costos de mantenimiento				-\$15.000		
Utilidad		\$88.740	\$88.740	\$73.740	\$88.740	\$88.740
Inversión	-\$504.323					
Flujo de caja	-\$504.323	\$88.740	\$88.740	\$73.740	\$88.740	\$88.740
Valor actual	-\$504.323	\$87.861	\$86.991	\$71.571	\$77.201	\$63.516
Valor actual acumulado	-\$504.323	-\$416.462	-\$329.470	-\$257.899	\$593.909	\$657.425

La tabla 15, muestra los resultados de los indicadores financieros del anteproyecto.

Tabla 15 Indicadores financieros del anteproyecto. Fuente: Elaboración propia

Indicadores	Resultados
VAN	\$ 657.425
TIR	15 %
PRI	5,79 años

4.2. ANÁLISIS DE COSTOS PROYECTO ALTERNATIVO

En esta sección se realizará un análisis de costos enfocado en una alternativa basada en componentes comerciales. La figura, muestra un esquema de estos componentes de acuerdo con las funciones definidas en el capítulo 3, en diseño conceptual del horno.

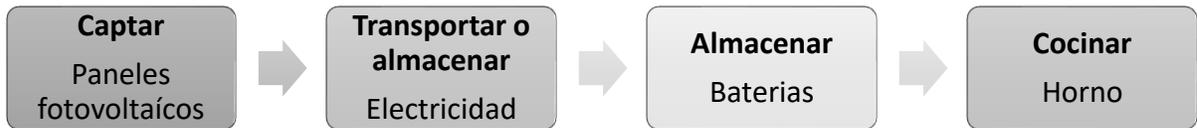


Fig. 29 Componentes del proyecto alternativo. Fuente: Elaboración propia

La tabla 16 muestra la inversión de los componentes del proyecto alternativo.

Tabla 16 Inversión del proyecto alternativo. Fuente: Elaboración propia a partir de catálogos web

Componentes	Detalles	Lugar de cotización	Costo
Kit solar fotovoltaico	Incluye 3 paneles solares policristalinos de 275 W, 1 inversor cargador híbrido de 3 kW, 4 baterías, set de conectores MC4	Solar Store	\$1.290.000
Horno	Temperatura: 50 – 250 °C Potencia: 3220 W Medidas: 595 x 595 x 530 mm	Kitchen center	\$289.990

La figura 30 muestra el funcionamiento del kit solar fotovoltaico cotizado.

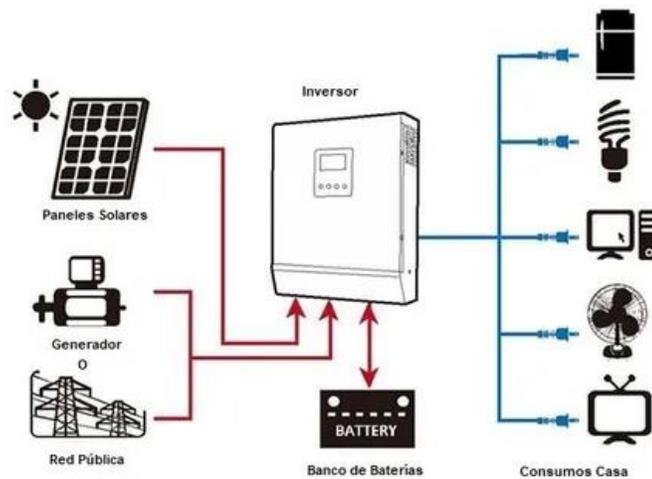


Fig. 30 Funcionamiento proyecto alternativo. Fuente: Solarstore, 2021

El costo total de los componentes del proyecto alternativo es igual a \$1.749.990, al cual se le agregará un costo de instalación de \$1.200.000 (Solarstore, 2021). Lo que significa una inversión total igual a \$2.949.990.

Por otro lado, según un artículo de revista web (Electricidad, 2019) el consumo de electricidad anual promedio de una vivienda es 2077,3 kW. Del cual el proyecto alternativo cubriría, anualmente, 1171 kW (Solarstore, 2021), lo cual significaría un ahorro de \$339.590.

Al igual que para el anteproyecto, se estimarán los indicadores financieros a partir de un flujo de caja, pero en un periodo de 25 años, ya que esta es la garantía que ofrece la empresa en donde se cotizaron los materiales y la instalación.

Tabla 17 Flujo de caja del proyecto alternativo. Fuente: Elaboración propia

Periodo	0	1	2	15	24	25
Ingresos		\$339.590	\$339.590	\$339.590	\$339.590	\$339.590
Utilidad		\$339.590	\$339.590	\$339.590	\$339.590	\$339.590
Inversión	-\$2.949.990					
Flujo de caja	-\$2.949.990	\$339.590	\$339.590	\$339.590	\$339.590	\$339.590
Valor actual	-\$2.949.990	\$336.229	\$332.901	\$295.443	\$267.468	\$264.821
Valor actual acum.	-\$2.949.990	-\$2.613.761	-\$2.280.861	\$1.758.552	\$4.264.307	\$4.529.128

La tabla 18, muestra los resultados de los indicadores financieros del proyecto alternativo.

Tabla 18 Indicadores financieros del anteproyecto. Fuente: Elaboración propia

Indicadores	Resultados
VAN	\$ 4.529.128
TIR	11 %
PRI	8,85

4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS ECONÓMICOS

El valor actual neto (VAN) es un criterio de evaluación que da a conocer el monto de ganancia o pérdida que se obtiene de la inversión inicial. En este caso, la ganancia corresponde al ahorro energético de electricidad en una vivienda. Para el caso del anteproyecto desarrollado, transcurrido un periodo de 15 años se estima un ahorro de \$657.425, mientras que para el proyecto alternativo transcurrido el mismo periodo se espera un ahorro igual a \$1.758.557. Al ser valores positivos, indica que ambos proyectos son rentables. Sin embargo, al comparar ambos proyectos en un periodo de 25 años, para el anteproyecto se estima un ahorro de \$914.753, lo cual equivale a un aumento de un 39 % respecto al año 15, esto considerando que transcurridos los primeros 15 años debe ser reemplazado, por lo que se requiere una nueva inversión, lo cual disminuye, considerablemente, la utilidad obtenida. Mientras que para el proyecto alternativo se estima un ahorro de \$4.529.128, lo cual equivale a un aumento de un 157 % respecto al año 15. Esto se traduce en que, en un periodo a largo plazo, el proyecto alternativo es mucho más rentable que el anteproyecto.

Por otro lado, el periodo de recuperación de la inversión (PRI) es un indicador que mide la cantidad de tiempo en que se recuperará el total de la inversión inicial a valor presente. En el caso del anteproyecto el PRI es de 6 años, lo cual equivale a un 40 % del tiempo de la vida útil del proyecto, mientras que el PRI del proyecto alternativo es igual a 9 años, lo cual equivale a un 36 % del tiempo de la vida útil del proyecto. Fue necesario analizarlo en términos porcentuales respecto a la vida útil del proyecto, ya que sus vidas útiles y por ende periodos de recuperación de inversión y utilidades son distintos, por lo que de esta manera quedan en una escala de tiempo similar y así pueden ser comparables. Según este indicador, el proyecto alternativo es más ventajoso que el anteproyecto, lo cual coincide con el resultado del VAN.

Finalmente, la TIR es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión. El criterio de selección de proyectos basado en este indicador consiste en que la TIR debe ser mayor a la tasa de descuentos utilizada (TREMA). Para las dos alternativas, este criterio se cumple, por lo que ambos proyectos pueden ser aceptados. Por otro lado, la TIR no debería ser utilizado cuando se quiere comparar entre distintos proyectos mutuamente excluyentes, en otras palabras, no se puede concluir que el proyecto con la mayor TIR es el que debería llevarse a cabo.

Además, cabe considerar que la potencia eléctrica generada por el proyecto alternativo puede ser utilizada para otros fines, lo que da lugar a otro beneficio, en cambio, el sistema térmico es dedicado o sea solo sirve para el horno.

CONCLUSIONES

A lo largo de la presente tesis se logró desarrollar un anteproyecto de horno, el cual funciona a partir de energía solar térmica y opera al interior de una casa estándar ubicada en la provincia de Curicó.

Para llevar a cabo este proceso, primero, mediante una revisión bibliográfica se obtuvo el estado del arte acerca de la tecnología solar existente. Se obtuvieron datos relevantes acerca de la energía solar como la constante solar o los recorridos aparentes del Sol en base a ángulos. Además, se recopiló información acerca de las distintas tecnologías de captación de energía solar, las cuales se dividen en función a las temperaturas a la que son capaces de calentar un fluido. También, se conocieron algunos fluidos de transferencia de calor, obteniendo las principales ventajas y desventajas de éstos. Por último, se obtuvo una modelación matemática sobre los mecanismos de transferencia de calor. Información que ayudó a la posterior toma de decisiones para el desarrollo del diseño del horno.

Mediante una búsqueda de hornos comerciales y a través del uso del explorador solar fue posible determinar los requerimientos térmicos del horno. Se estableció una potencia térmica requerida por el horno igual a 2700 W y se consideró la disponibilidad de energía solar asociada a la provincia de Curicó de $1,62 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, este valor corresponde al más bajo alcanzado a lo largo de un año, en el mes de junio. Con estos datos se estimó el área preliminar del colector solar, lo cual resultó de $1,67 \text{ m}^2$.

Luego, se analizaron las formas de satisfacer dichos requerimientos térmicos del horno empleando la energía solar. En base a las funciones que debía cumplir el sistema a diseñar: captar, transportar, almacenar y hornear, se obtuvieron las posibles configuraciones del diseño físico del horno, en donde destacaron dos alternativas: la primera basada en energía solar térmica y la segunda basada en energía solar fotovoltaica, donde se optó por la primera alternativa, ya que la memoria perseguía evidenciar las capacidades propias de diseño térmico. Con esto y en base a un análisis técnico, se realizó una preselección de las mejores configuraciones de diseño.

Una vez obtenidas las configuraciones de diseño más prometedoras, se realizó una matriz de decisión en donde se seleccionó la mejor de éstas en base a criterios de evaluación, obteniéndose así el diseño conceptual del horno, el cual consiste en: la captación de energía solar mediante un colector cilíndrico parabólico, el transporte de esta energía mediante sales fundidas, un almacenamiento térmico y el horno.

Luego, se realizó el diseño térmico en base a un horno de $60 \times 49 \times 50 \text{ cm}$, donde mediante cálculos de transferencia de calor se seleccionaron los materiales y espesores de la estructura

del horno: tapas interiores y exteriores de acero inoxidable de 1 mm y entre ambas, lana mineral de 30 mm. Por otro lado, mediante una matriz multicriterio se seleccionó el sistema de intercambio de calor: tuberías con aletas. Además, se determinó que el área del colector solar debía ser de 2,4 m², considerando una eficiencia de un 65 % y un factor de sobredimensionamiento de 10 % debido a pérdidas a través de tuberías. Para estas tuberías se seleccionó acero negro y un aislante térmico de 20 mm de espesor, lo cual corresponde a un 5,25 % de pérdidas de calor.

Por último, se realizó el diseño mecánico del horno, donde se dimensionó el colector solar, donde el receptor de este, fabricado en acero inoxidable, resultó con un peso igual a 210,4 N y la estructura fabricada en acero SAE 1020 resultó tener un peso de 227,6 N, lo cual asegura que el colector no se volteará debido a las fuerzas del peso. Además, se estableció que el horno estará unido mediante soldadura, mientras que el colector solar estará unido al suelo mediante sobrecimientos, a través de pernos, esto evitará la caída de la estructura debido a otros factores como el clima o interacciones humanas.

Finalmente, se realizó un análisis económico del anteproyecto y de un proyecto alternativo a fin de realizar una comparación entre ambos y saber si el trabajo realizado es rentable. Los indicadores señalan que ambos proyectos pueden ser aceptados. La diferencia se encuentra en que, en un periodo a largo plazo, el proyecto alternativo es mucho más rentable que el anteproyecto. Sin embargo, esto se da en el actual contexto, ya que en un futuro el valor del kW puede aumentar significativamente, lo cual significaría que el análisis económico cambiaría totalmente, viéndose favorecido el anteproyecto desarrollado.

Como se verificó en esta memoria, la energía solar térmica no sería tan rentable a pequeña escala a altas temperaturas, por lo que, en cuanto a lo que se espera abordar en un futuro siguiendo la misma línea son trabajos basados en energía solar térmica a mayor escala, ya que sus costos de inversión relativos no son elevados y sus retornos económicos podrían ser significativos, como es el caso de las centrales termoeléctricas solares. Además, poseen una eficiencia mayor y menores impactos ambientales en comparación a la energía solar fotovoltaica.

A modo personal, diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad o para resolver un problema. Es un proceso innovador y de toma de decisiones que en ocasiones deben tomarse con muy poca información o con exceso de información. Lo esencial es que el diseñador, en este caso, el Ingeniero debe sentirse, personalmente, cómodo cuando ejerce la función de toma de decisiones y de resolución de problemas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ministerio de energía. (2018). *Informe final de usos de la energía de los hogares*.
- Ministerio de energía. (2021). *Explorador solar*. Obtenido de <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/termico>
- Aringhoff, R., Brakmann, G., & Aubrey, C. (2020). *Energía solar termoeléctrica: pasos firmes contra el cambio climático*.
- Axaopoulos, P. (2011). Principios de la geometría solar . En *Solar thermal conversion*.
- Azqueta, P. (2006). *Algunos conceptos, definiciones y ecuaciones usadas en geometría solar*.
- Cengel , Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*.
- Chan, C., & Li, P. (2015). *Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments*.
- Demillón Pascual, R., & Aguirre Reyes, J. (2012). *Diseño y aplicación de colectores solares tipo parabólico*.
- Díaz, M. (1998). *El libro de las energías renovables*.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of thermal Processes*.
- Electricidad. (2019). Consumo energético residencial superó los 50.000 GWh en 2018.
- García Valladares, O., & Pilatowsky Figueroa, I. (2017). *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial*. Ciudad de México.
- Hermosillo, J. (1995). Notas sobre el curso de energía solar .
- Hibbeler, R. (2011). *Mecánica de materiales*.
- Kousksou, T., Bruel, P., & Jamil, A. (2013). *Energy storage: Applications and challenges*.

Bibliografía

- Lizana, F., Chacartegui, R., Barrios, Á., & Valverde, J. (2017). *Advances in Thermal Energy Storage Materials and Their Applications Towards Zero Energy Buildings: a Critical Review*. Sevilla.
- Meinel, A., & Meinel, M. (1982). *Aplicaciones de la energía solar*.
- Ministerio de energía. (26 de Enero de 2018). *Energía gob*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/pnud-y-ministerio-de-energia-presentan-estudio-sobre-el-acceso-y-la-pobreza-energetica-en-chile>
- Murali, G., & Mayilsami, K. (2016). *Effect of Latent Thermal Energy Storage and Inlet Locations on Enhancement of Stratification in a Solar Water Heater Under Discharging Mode*.
- Muthusivagami, R. (2010). *Cocinas solares con y sin almacenamiento térmico: una revisión*.
- Nasa. (2010).
- Palma, R. (2005). *Anteproyecto de un sistema de aire acondicionado para el edificio del laboratorio tecnológico, del campus curicó, de la universidad de Talca, utilizando energía solar*.
- Planas, O. (2019). *Energía solar*. Obtenido de <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/colector-solar-termico/colectores-tubos-vacio>
- Rodríguez, R. (2013). *Aprovechamiento de la energía solar*.
- Salinas Salas, G. (2014). *Física aplicada*.
- Salinas, G. (2013). *Apuntes de transferencia de calor*. Curicó.
- Saman, W., & Bruno, F. (2012). *Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems*.
- Sepúlveda Hirzer, M. (2005). *Anteproyecto de una cámara de refrigeración usando energía solar, para uva de exportación*.
- Síliter. (2020). *Síliter*. Obtenido de <https://www.siliter.com/producto/colectores-solares-tubos-de-vacio-energia-solar-termica>

Bibliografía

Solarstore. (2021). *Solarstore*. Obtenido de <https://www.solarstore.cl/producto/kit-solar-fotovoltaico-3000w-hibrido-medio/>

Sopelia. (2020). *Sopelia*. Obtenido de <http://www.energiasolar.lat/colector-solar-plano/>

Universidad Católica de Chile. (s.f.). *Estado del arte y perspectivas de la tecnología CSP*.

Urkiola, D. M. (2014). *Cocinar con el sol*.

Valdez, B. (2006). *Tecnología en la UABC*.

Zabalza , I., & Aranda, A. (2009). *Energía solar térmica*. Zaragoza.

ANEXOS

Anexo 1: Cálculo de las áreas transversales al flujo de calor

$$A_1 = 60 \text{ cm} \cdot 59 \text{ cm} = 0,354 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 49 \text{ cm} \cdot 59 \text{ cm} = 0,389 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 49 \text{ cm} \cdot 60 \text{ cm} = 0,294 \text{ m}^2$$

Anexo 2: Determinación del coeficiente de conductividad térmica

Coefficientes de conductividad térmica de metales. Fuente: Cengel & Boles, 2012

Composición	Conductividad (W/m·K) térmica a diferentes temperaturas (K)				
	200	300	400	600	800
Hierro	94	80,2	69,5	54,7	43,3
Acero inoxidable AISI 302	-	15,1	17,3	20	22,8
Acero inoxidable AISI 304	12,6	14,9	16,6	19,8	22,6
Acero inoxidable AISI 316	-	13,4	15,2	18,3	21,3
Acero inoxidable AISI 347	-	14,2	15,8	18,9	21,9
Titanio	24,5	21,9	20,4	19,4	19,7

Determinación del coeficiente de conductividad térmica (k) a 250°C del acero inoxidable AISI 304, a través de interpolación:

$$250 \text{ }^\circ\text{C} = 523 \text{ K}$$

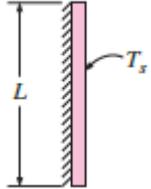
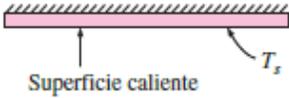
$$\frac{19,8 - 16,6}{600 - 400} = \frac{19,8 - k}{600 - 523}$$

$$k = 18,56 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Anexo 3: Números de Nusselt para diferentes geometrías

Ecuaciones para el cálculo del número de Nusselt para diferentes configuraciones geométricas.

Fuente: Cengel & Boles, 2012

Configuración geométrica	Longitud característica	Intervalo de RaL	Nu
	L	Todo el intervalo	$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/27}} \right\}^2$
 Superficie caliente (área superficial A_s y perímetro p)	A_s/p	$10^4 - 10^7$ $10^7 - 10^{11}$ $10^5 - 10^{11}$	$Nu = 0.54Ra_L^{1/4}$ $Nu = 0.15Ra_L^{1/3}$ $Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$

Anexo 4: Determinación h_1 (coeficiente convectivo interior del horno en placas verticales):

Temperaturas interior del horno. Fuente: Elaboración propia

Datos	Valores
Temperatura superficie interior ($T_{s,i}$)	260 °C
Temperatura en el horno (T_h)	250 °C
Longitud característica (L)	0,59 cm

Temperatura de película:

$$T_f = \frac{T_{s,i} + T_h}{2} = 255 \text{ °C}$$

Con esta temperatura se extrajeron las propiedades del aire:

Propiedades del aire en el interior del horno. Fuente: Cengel & Boles, 2012

Datos	Valores
k	0,04140 W/m·K
Pr	0.6946
v	$4,091 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

β	$1/T_f$
---------	---------

Número de Rayleigh:

$$Ra_{aL} = \frac{(g \cdot \beta \cdot T_{s,e} - T_{inf} \cdot L^3)}{\nu^2} \cdot Pr = 1,583 \cdot 10^7$$

Número de Nusselt:

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_{aL}^{1/6}}{(1 + (0,492/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right)^2 = 35,49$$

Coefficiente de convección:

$$h_2 = \frac{k}{L} \cdot Nu = 2,49 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Determinación h_2 (coeficiente convectivo exterior del horno en placas verticales):

Temperaturas exteriores del horno. Fuente: Elaboración propia

Datos	Valores
Temperatura superficie exterior ($T_{s,e}$)	65 °C
Temperatura en la habitación (T_{inf})	20 °C
Longitud característica (L)	0,59 cm

Temperatura de película:

$$T_f = \frac{T_{s,e} + T_{inf}}{2} = 42,5 \text{ °C}$$

Con esta temperatura se extrajeron las propiedades del aire:

Propiedades del aire en el exterior del horno. Fuente: Cengel & Boles, 2012

Datos	Valores
k	0,02680 W/m·K
Pr	0.7248

ν	$1.726 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
β	$1/T_f$

Número de Rayleigh:

$$Ra_L = \frac{(g \cdot \beta \cdot T_{s,e} - T_{inf} \cdot L^3)}{\nu^2} \cdot Pr = 6,988 \cdot 10^8$$

Número de Nusselt:

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{(1 + (0,492/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right)^2 = 110,337$$

Coefficiente de convección:

$$h_2 = \frac{k}{L} \cdot Nu = 5,012 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Determinación h_1 (coeficiente convectivo interior del horno placas horizontales):

Longitud característica:

$$L = \frac{A_3}{p} = 0,135 \text{ m}$$

Número de Rayleigh:

$$Ra_L = \frac{(g \cdot \beta \cdot T_{s,e} - T_{inf} \cdot L^3)}{\nu^2} \cdot Pr = 1,583 \cdot 10^7$$

Número de Nusselt:

$$Nu = 0,54 \cdot Ra_L^{1/4} = 35,49$$

Coefficiente de convección:

$$h_2 = \frac{k}{L} \cdot Nu = 2,49 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Determinación h_2 (coeficiente convectivo exterior del horno placas horizontales):

Longitud característica:

$$L = \frac{A_3}{p} = 0,135 \text{ m}$$

Número de Rayleigh:

$$R_{aL} = \frac{(g \cdot \beta \cdot T_{s,e} - T_{inf} \cdot L^3)}{v^2} \cdot Pr = 8,346 \cdot 10^6$$

Número de Nusselt:

$$Nu = 0,54 \cdot R_{aL}^{\frac{1}{4}} = 29,025$$

Coefficiente de convección:

$$h_2 = \frac{k}{L} \cdot Nu = 5,768 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Anexo 5: Cálculos de pérdidas térmicas a través de las tuberías

Conducción a través de las paredes de una tubería se definen como:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot l \cdot (T_1 - T_s)}{2,3 \cdot \log(D_2/D_1)}$$

Convección y radiación a través de la tubería:

$$q = h \cdot \pi \cdot D_2 \cdot l \cdot (T_s - T_2)$$

Pérdidas por conducción, convección y radiación considerando tuberías de acero de 2 mm y un aislante de 20 mm de espesores.

Datos para calcular las pérdidas de calor en tuberías

Datos	Valores
Conductividad térmica del acero (k_a)	50,2 W/m·K
Conductividad térmica del aislante (k_e)	0,041 W/m·K
Longitud tubería (l)	2,5 m
Temperatura interior tubería (T_1)	523 K

Anexo 6: Dimensionamiento del colector

Dimensionamiento de receptor solar:

La ecuación de una parábola se define como:

$$x^2 = 4 \cdot f \cdot c$$

Para esta memoria se considerará una ecuación de la parábola como la siguiente:

$$x^2 = 140 \cdot y$$

Lo cual implica que el valor del foco es igual a 35 cm.

El perímetro de una parábola se define como:

$$p = 0,5\sqrt{a^2 + 16f^2} + \frac{a^2}{8f} \ln\left(\frac{4f\sqrt{a^2 + 16f^2}}{a}\right) = 1,17 \text{ m}$$

La longitud del receptor solar se define como:

$$l = \frac{A_p}{p} = 2 \text{ m}$$

El espesor de la plancha de acero inoxidable será de 1 mm. Lo cual implica que el volumen del receptor es:

$$V = A_p \cdot e = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

La densidad del acero inoxidable es 7980 kg/m³. Por lo que el peso específico del acero es igual:

$$\gamma = \rho \cdot g = 78283,8 \text{ N/m}^3$$

El peso del receptor se define como:

$$P = \gamma \cdot V = 187,8 \text{ N}$$

Finalmente, el centroide de una parábola se define como:

$$c = \frac{3}{5} \cdot b = 0,21 \text{ m}$$

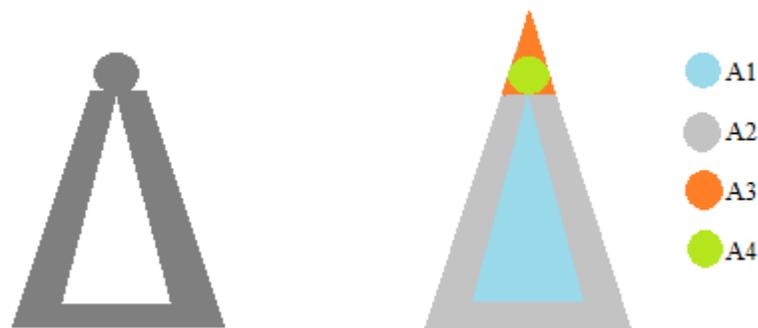
Cálculo del peso de la tubería de acero galvanizado, considerando que la densidad del acero galvanizado es 7850 kg/m^3 .

$$P_2 = \rho \cdot g \cdot \pi \cdot (r_e^2 - r_i^2) \cdot l = 22,6 \text{ N}$$

Cálculo del centroide de la estructura y peso: Estos cálculos se estimaron a partir de las dimensiones mostradas en la figura 19 utilizando el método de Steiner, el cual se define en la siguiente ecuación:

$$\bar{y} = \frac{\sum \bar{y} \cdot A}{\sum A}$$

En la figura mostrada a continuación, se muestran las áreas con las cuales se trabajó para realizar los cálculos:



Cálculo de las áreas y centroides de cada una de estas:

$$A_1 = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{0,26 \cdot 0,43}{2} = 0,056 \text{ m}^2$$

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{3} \cdot h + 0,02 = 0,163 \text{ m}$$

$$A_2 = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{0,3 \cdot 0,5}{2} = 0,075 \text{ m}^2$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{3} \cdot h + 0,5 = 0,167 \text{ m}$$

$$A_3 = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{0,04 \cdot 0,05}{2} = 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\bar{y}_3 = \frac{1}{3} \cdot h + 0,45 = 0,46 \text{ m}$$

$$A_4 = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,025^2 = 1,963 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad \bar{y}_4 = r + 0,45 = 0,475 \text{ m}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum \bar{y} \cdot A}{\sum A} = \frac{A_1 \cdot \bar{y}_1 + A_2 \cdot \bar{y}_2 + A_3 \cdot \bar{y}_3 + A_4 \cdot \bar{y}_4}{A_T} = 0,178 \text{ m}$$

Por otro lado, el peso de la estructura se estimó a partir de catálogos de vigas, estos indican la masa de cada viga por metro.

$$l_{viga,cuadradas} = 2,4 \text{ m} \rightarrow 5,2 \text{ kg}$$

$$l_{viga,circular} = 2 \text{ m} \rightarrow 18 \text{ kg}$$

$$P_E = m \cdot g = 23,2 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 227,6 \text{ N}$$