

**Diseño y simulación de un concentrador
solar para suministrar calor de proceso a una
laminadora de módulos fotovoltaicos**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA
(ORIENTACIÓN EN ENERGÍA SOLAR)

P R E S E N T A :

Ricardo Flores Ledo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

INTEGRACIÓN DEL JURADO:

Presidente: Dr. Eduardo Armando Rincón Mejía, UACM.
Secretario: Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera, UACM.
Vocal: Dr. Carlos Chávez Baeza, UACM.
1er. Suplente: Dr. Edgar Vicente Torres González, UACM.
2do. Suplente: Dr. Manuel Antonio Corona Sánchez, UACM.

Lugar donde se realizó el posgrado:

PLANTEL DEL VALLE, UACM.

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera
UACM

AGRADECIMIENTOS:

Dedicado a Dios absoluto que me ha guiado en la responsabilidad de ser una mejor persona.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de Maestría.

A mi madre Luz del Carmen Ledo Ramírez y mi padre Isidro Flores Rodriguez que han sido proveedores y que les dedico parte de esta gran herencia que me dejan agradeciendo su confianza, amor y paciencia. De la misma forma a mi hermana Cristina Flores Ledo que es un ejemplo para mi. A mis sobrinos Max y Gael.

A las personas que han sido un impulso moral aunque ya no se encuentren en este plano, mis abuelos Isauro, Emilio e Irene, y a mi tío Miguel.

A mis profesores de la UACM que a lo largo de esta carrera me han enseñado tantos conceptos y han compartido su sabiduría para que esta tesis sea posible de decantar.

Al Dr. Álvaro Lentz Herrera por haber confiado en mis conocimientos para trabajar en esta tesis de energía solar térmica y compartir conceptos que demuestran su expertis en el tema .

Al Dr. Eduardo Rincón Mejía por ampliar mi panorama en la concentración solar que es tema central de este trabajo.

Al Dr. Carlos Chávez Baeza por los cursos impartidos en la ingeniería y en la maestría que me permiten tener un mayor espectro de conocimiento aplicado a dicho escrito.

Al Dr. Edgar Vicente Torres Gonzalez por el curso que me impartió en la maestría y por su asesoría para el presente trabajo.

Al Ing. Francisco J. Camacho que me apoyó en la parte de diseño del colector concentrador para el presente trabajo.

Contenido

Resumen.....	xi
Introducción.....	xii
Capítulo I. Marco contextual.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.2.1 Ubicación y características del proyecto.....	3
1.3 Justificación.....	4
1.3.1 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
Capítulo II. Marco teórico.....	8
2.1 Conceptos Generales.....	8
2.1.1 El sol.....	8
2.1.2 Algunos conceptos térmicos.....	15
2.1.3 Energías renovables.....	17
2.1.4 Energía solar fotovoltaica.....	18
2.1.5 Energía solar térmica.....	19
2.1.5.1 Historia de la concentración solar.....	21
2.1.6 Sistemas híbridos.....	30
2.1.7 Tecnologías de concentración solar.....	33
2.1.8 Concentradores solares en la industria.....	42
2.1.9 Configuraciones térmicas.....	45

2.1.10 Concentrador parabólico compuesto.....	47
2.1.11 Calor industrial.....	52
2.1.12 Fluidos caloportadores.....	55
2.1.13 Intercambiadores de calor.....	61
2.1.14 Fabricación de módulos fotovoltaicos.....	62
2.1.15 Variables para el curado del EVA.....	72
Capitulo III. Metodología.....	73
3.1 Metodología de cálculo.....	75
3.1.1 Ecuaciones y conceptos para el cálculo del CPC.....	75
3.1.2 Cálculos para el intercambiador de calor.....	80
3.1.3 Calor necesario para la placa de cobre.....	84
3.2 Metodología de diseño y simulación.....	87
Capitulo IV Diseño y simulación.....	91
4.1 Diseño del colector concentrador.....	91
4.2 Diseño del intercambiador.....	95
4.3 Diseño de laminador.....	96
4.4 Diseño final de colector concentrador, intercambiador y laminador.....	100
4.5 Simulación de colectores solares y placa radiadora.....	101
Capitulo V. Análisis y resultados.....	103
5.1 Análisis y resultados del colector concentrador.....	103
5.2 Análisis y resultados de la placa radiante.....	108
5.3 Análisis y resultados del intercambiador y colector concentrador.....	111
5.4 Cálculo de calor requerido para la placa de cobre.....	112
5.5 Cantidad de colectores requeridos.....	112
5.6 Calor suministrado por los colectores concentradores.....	113
5.7 Balance medioambiental.....	114

5.8 Balance económico.....	115
Conclusiones.....	119
Recomendaciones.....	120
Bibliografía.....	121
Anexos.....	124

Índice de Figuras

Figura 1. Localización del lugar a implementar el sistema de concentración solar.....	3
Figura 2. Irradiación diaria promedio anual en México.....	5
Figura 3. Reacción de fusión nuclear en el sol.....	9
Figura 4. Estructura solar.....	9
Figura 5. Espectro solar en el tope de la atmósfera y al nivel del mar.....	10
Figura 6. Órbita de la tierra alrededor del sol a lo largo del año.....	11
Figura 7. Variación de la dirección de los rayos solares sobre la superficie de la tierra a lo largo del año.....	12
Figura 8. Factores que influyen en la atenuación de la radiación solar incidente.....	12
Figura 9. Tipos de radiaciones.....	14
Figura 10. Mecanismos de transferencia de calor.....	16
Figura 11. Diferencia entre irradiancia e irradiación en la ciudad de Málaga.....	17
Figura 12. Energías renovables existentes.....	18
Figura 13. Elementos de un sistema fotovoltaico interconectado.....	19
Figura 14. Diferentes dispositivos y tipos de sistemas solares.....	20
Figura 15. Arquímedes de Siracusa quemando barcos con luz solar.....	21
Figura 16. Horno solar de Lavoisier.....	23
Figura 17. Saussure hot box.....	23
Figura 18. Sección transversal de la caja de Langley.....	24
Figura 19. Horno solar de Adams.....	25
Figura 20. La máquina solar de Monchot's.....	26
Figura 21. La imprenta impulsada por el sol.....	26
Figura 22. La máquina solar stirling de John Ericsson.....	27
Figura 23. Colector solar comercial.....	28
Figura 24. Trabajadores inspeccionando la primera planta solar térmica comercial.....	29
Figura 25. Planta solar torre central Ivanpah Dry Lake.....	30
Figura 26. La energía autosuficiente de SAMSO.....	32
Figura 27. Distintos concentradores con receptores.....	36
Figura 28. Concentradores cilindro-parabólicos.....	36

Figura 29. Concentradores tipo Fresnel.....	37
Figura 30. Funcionamiento general de torre central.....	38
Figura 31. Horno Tolokatzin con concentrador 3D.....	39
Figura 32. Evolución de concentradores Tolokatzin. A) modelo de 1995 con 8 espejos truncados de curvatura simple para concentración solar 3D; B) Tolokatzin V, con 10 espejos truncados de curvatura simple; C) Tolokatzin 2020 con 10 espejos.....	40
Figura 33. Diseño conceptual del Tolokatzin 2020. A) Vista lateral, B) Cavidad del absorbedor, C) Vista isométrica.....	41
Figura 34. Usos indirectos, precalentamiento.....	46
Figura 35. Sistema solar que suministra calor directamente a un proceso industrial....	46
Figura 36. Sistema solar que suministra calor directamente a un proceso industrial....	47
Figura 37. Concentrador parabólico compuesto con absorbedor plano.....	47
Figura 38. Diferentes receptores de CPCs.....	48
Figura 39. Diagrama Esquemático de un concentrador.....	49
Figura 40. Geometría del CPC con receptor circular.....	50
Figura 41. Energía renovable en el consumo final total de energía por sector final.....	53
Figura 42. Consumo de energía en México.....	54
Figura 43. Evolución del consumo de energía para generación de calor en México 2010-2017 por sector.....	54
Figura 44. Esquema planta termosolar.....	55
Figura 45. Rangos de temperatura de distintos fluidos.....	57
Figura 46. Regímenes de fluido en conductos.....	59
Figura 47. Número de Reynolds de distintos fluidos caloportadores en función de la temperatura de trabajo.....	59
Figura 48. Intercambiador tubular.....	62
Figura 49. Fabricación de módulos fotovoltaicos.....	62
Figura 50. Elementos del panel solar.....	65
Figura 51. Procesos de ensamblado de paneles solares.....	65
Figura 52. Soldadora semiautomática.....	66
Figura 53. Mesa de prelamado.....	66
Figura 54. Laminadora solar.....	67
Figura 55. Operaciones de laminado.....	67

Figura 56. Sistemas que interactúan en el laminado.....	68
Figura 57. Especificaciones de control de laminado.....	69
Figura 58. Enmarcado de postes de aluminio.....	70
Figura 59. Diagrama de prueba de electroluminiscencia.....	71
Figura 60. Simulador solar.....	72
Figura 61. Ficha de datos del MFV.....	72
Figura 62. Metodología empleada.....	74
Figura 63. Circunferencia unitaria.....	75
Figura 64. Curvas involutas y acusticas del CPC.....	77
Figura 65. Expresión del factor de visión para plano infinito y fila de cilindros.....	81
Figura 66. Isométrico de intercambiador de calor.....	81
Figura 67. Vista del sistema intercambiador seccionado.....	82
Figura 68. Solidworks y diseño mecánico del laminador.....	87
Figura 69. Prediseño de intercambiador.....	88
Figura 70. Diseño de intercambiador de calor.....	89
Figura 71. Colector solar de aire.....	92
Figura 72. Prototipo de CPC para tratamiento de agua.....	92
Figura 73. Concentrador solar Tolokatzin.....	92
Figura 74. Micro concentrador y sus elementos.....	93
Figura 75. Diferentes vistas del colector concentrador.....	94
Figura 76. Colector con micro concentradores y características principales.....	94
Figura 77. Configuración de colectores concentradores.....	95
Figura 78. Diseño de intercambiador de calor.....	96
Figura 79. Algunos prototipos de laminadores fotovoltaicos.....	97
Figura 80. Laminador con 6 resistencias calefactoras.....	98
Figura 81. Elementos del laminador solar-eléctrico.....	99
Figura 82. Diseño del laminador con intercambiador de calor y resistencias eléctricas.....	99
Figura 83. Placa calefactora integrada a laminador.....	100
Figura 84. Esquema del sistema híbrido térmico eléctrico.....	100
Figura 85. Sistema de laminación híbrido.....	101
Figura 86. Simulación de placa de cobre con serpentín.....	102
Figura 87. Temperatura de la placa de cobre.....	103

Figura 88. Temperatura en el colector.....	103
Figura 89. Curvas involutas y acusticas.....	106
Figura 90. Radiación y calor suministrado para 1 colector.....	113
Figura 91. Radiación y calor suministrado para 25 colectores.....	114
Figura 92. Retorno de inversión sin beneficio fiscal.....	117
Figura 93. Retorno de inversión con beneficio fiscal.....	117

Índice de Tablas

Tabla 1. Irradiación solar con cielo despejado.....	4
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los concentradores solares.....	38
Tabla 3. Clasificación de los CSMT empleados comúnmente en calor de procesos industriales.....	42
Tabla 4. Demanda de calor por nivel de temperatura y sector industrial.....	43
Tabla 5. Prototipos de colectores de mediana temperatura.....	44
Tabla 6. Grado de curado del EVA para policarbonato de 2mm.....	73
Tabla 7. Grado de curado del EVA para policarbonato de 4mm.....	73
Tabla 8. Elementos del colector solar.....	89
Tabla 9. Elementos del laminador.....	90
Tabla 10. Características de colector con absorbedor plano.....	91
Tabla 11. Características del Tolokatzin.....	92
Tabla 12. Características generales del prototipo A.....	97
Tabla 13. Características generales del prototipo B.....	97
Tabla 14. Puntos de curvas de CPC.....	105
Tabla 15. Evaluación económica.....	115

Acrónimos y Abreviaturas

CPC	Concentrador parabólico compuesto
MFV	Módulos Fotovoltaicos
ROI	<i>Return On Investment</i> (Retorno de la inversión)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
CSMT	Concentradores Solares de Mediana Temperatura
BNE	Balance Nacional de Energía
SENER	Secretaría de Energía
CMC	Concentrador Multicompuesto
HTF	<i>Heat Transfer Fluid</i> (Fluido de transferencia de calor)
TES	<i>Thermal Energy Storage</i> (Almacenamiento de energía térmica)
SHI	Sistemas Híbridos Integrados
IEA	Agencia Internacional de Energía
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
AI	Inteligencia Artificial
GEI	Gases de Efecto Invernadero
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
GIZ	Cooperación Técnica Alemana

Resumen

En el presente trabajo se obtienen los resultados obtenidos del proceso de diseño de un colector de concentración solar y un intercambiador de calor que se le integra a una laminadora eléctrica de paneles solares para suministrarle calor de proceso.

El conocimiento de diversos tipos de concentradores solares, intercambiadores y laminadores eléctricos a pequeña escala nos permite saber cómo implementar este tipo de tecnologías buscando la manera de crear una sinergia entre la energía convencional y la energía renovable que actúen como sistemas híbridos buscando una viabilidad económica, ambiental y social.

El proceso de diseño de concentradores solares para suministrar calor de proceso está dado por ecuaciones paramétricas que nos describen curvas involutas y acusticas que propician que los fotones incidan en nuestro tubo absorbedor y mediante la integración de un intercambiador de calor tipo serpentín a una laminadora de paneles solares que trabaja con energía eléctrica le suministra el calor para prescindir lo mayormente posible de energía contaminante.

Esta hibridación en la máquina permite trabajar con energía solar térmica proveniente de un campo de colectores solares de concentración en las horas de mayor radiación solar para su aprovechamiento y cuando los rayos no sean tan incidentes se pueda trabajar con resistencias eléctricas con las que trabajan las máquinas convencionales en la actualidad.

La propuesta de integración de este tipo de prototipos híbridos ayuda a que diversifiquemos nuestra matriz energética de una manera paulatina y de manera inteligente a una sociedad que contribuya a la mitigación de impacto ambiental y de acercarnos a las cero emisiones netas.

Así mismo se contribuye a que los módulos fotovoltaicos fabricados sean lo más verdes posibles desde su ensamble.

Palabras Clave: Colector de concentración solar, laminadora de paneles solares, sistemas híbridos.

Introducción

Esta investigación realiza una sinergia entre la energía solar térmica de concentración y de energía convencional que a través de una laminadora eléctrica se le suministre calor solar y pueda fabricar un panel fotovoltaico más verde. Los cuales sirven como una tecnología para transformar comunidades más sustentables y sostenibles. Por lo cual se propone el diseño de un colector de concentración solar que por medio de un intercambiador pueda hibridar la máquina eléctrica ensambladora de paneles solares. Además de simular el concentrador solar y la placa calefactora para ver las temperaturas que se podrían alcanzar.

En ese sentido, la metodología que se eligió para trabajar en la propuesta de investigación es de corte cualitativo, cuantitativo y de aplicación. Esta se desarrolla en tres partes: metodología de cálculo, diseño y simulación. De tal forma, la investigación se divide en cinco capítulos, los cuales se presentan a continuación:

En el **Marco contextual (Capítulo I)**, se presentan los antecedentes de la energía solar térmica y se plantea la problemática existente además de la contribución a una posible solución para utilizar tanto energía eléctrica como energía de concentración solar.

En el **Capítulo II “Marco Teórico”** se describe brevemente la historia de los captadores solares, tipos de concentradores y sus aplicaciones, energía solar fotovoltaica, energía termosolar, sistemas híbridos, también cómo se encuentra la energía solar térmica en México y en el mundo, fluidos caloportadores, intercambiadores de calor, así como la descripción de la fabricación de paneles solares desde la extracción del silicio hasta el ensamble de los módulos fotovoltaicos a través del laminador de módulos fotovoltaicos.

En el **Capítulo III** se plantean la Metodología de Cálculo, Metodología de Diseño y Metodología de Simulación para el sistema térmico con concentración solar, intercambiador de calor y laminador solar.

En el **Capítulo IV** se presenta el diseño del concentrador solar, el intercambiador de calor y la laminadora, también se desarrolla la simulación del fluido a través del colector y de la placa.

Finalmente, en el **Capítulo V** se muestran los resultados más importantes de la investigación y su análisis.

Capítulo I. Marco contextual

1.1 Antecedentes

En este capítulo se recaba información sobre los concentradores de mediana temperatura y como pueden contribuir en la generación de calor industrial junto con la energía convencional.

El abastecimiento de energía térmica en lo industrial, parte principalmente de la combustión con combustibles fósiles, es por ello que:

La tecnología de los captadores solares de mediana temperatura (CSMT) puede facilitar en gran medida los requerimientos de calor de procesos de la industria química, papelera, textil, de alimentos, en procesos como los de secado, esterilizado, limpieza, evaporación, producción de vapor, así como el acondicionamiento (calefacción y refrigeración) de naves industriales y de laminado de módulos fotovoltaicos evitando el uso de fuentes convencionales de energía y por tanto disminuyendo el impacto ambiental adverso de las actividades antropogénicas. Son claramente inidentificables aquellos numerosos procesos que requieren energía térmica con un nivel de temperatura entre 80 y 250°C. En los últimos años las investigaciones con respecto a este tipo de sistemas se han dirigido al desarrollo de nuevas aplicaciones, metodologías de control, análisis termodinámico y técnico-económico, así como el desarrollo de componentes como estructuras de soporte, materiales reflectores, materiales para el receptor y superficies absorbedoras (IMP, 2018).

Más allá de las aplicaciones de baja temperatura, hay varios posibles campos de aplicación de la energía solar térmica a un nivel de temperatura media. El más importante de ellos es la producción de calor para procesos industriales, lo que representa una cantidad significativa de calor. “Por ejemplo, la demanda de calor industrial representa alrededor del 25% de la demanda global de las necesidades de energía final en los países del sur de Europa y países industrializados” (S, The potential of solar industrial process heat applications, Applied energy., 2003)

1.2 Planteamiento del problema

La demanda de energía requerida es suministrada casi en su totalidad a través del uso de combustibles fósiles por ejemplo el gas natural, petróleo y carbón que son los más utilizados, “en el contexto mundial, casi un tercio del consumo energético final es destinado a satisfacer la demanda del sector industrial” (Ortega, 2018). Contribuyendo al cambio climático de manera negativa provocando catástrofes ambientales en la actualidad por lo cual se busca una transición energética paulatina e inteligente que permita la mitigación de impacto ambiental implementando sistemas en los cuales interactúen energías convencionales y renovables siendo una muy importante la energía solar térmica por medio de concentración solar que se emplee con mayor frecuencia para diversificar la matriz energética “garantizando el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para un cambio justo y equitativo en el planeta como lo menciona el objetivo de desarrollo sostenible #7 energía asequible y no contaminante que es uno de los 17 ODS” (ONU, 2024).

“El sector industrial mexicano es el segundo mayor consumidor final de energía en el país, únicamente por debajo del sector transporte y que representa en consumo eléctrico aproximadamente 17% de las emisiones totales del país” (IMP, 2018). Además, es claro que la mayoría de los estados tienen el potencial para la aplicación significativa de los sistemas solares térmicos para la producción de calor de proceso, gracias a que el país se encuentra dentro del cinturón o franja solares formando parte de un grupo de 60 países que reciben mayor cantidad de radiación solar en el planeta.

En distintas plantas en México existen distintos tipos de manufactura entre ellas la de paneles fotovoltaicos que paradójicamente en su proceso consume energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles y contribuyen a la formación de gases de efecto invernadero GEI¹, por lo cual se pretende diseñar un prototipo con el objetivo de suministrar calor de proceso a una laminadora a través de energía solar térmica para el encapsulado de módulos fotovoltaicos siendo lo más amigables al ambiente posible.

¹ Las siglas GEI, hacen mención a los gases de efecto invernadero

Según la IEA², la capacidad de la energía solar fotovoltaica experimentó su mayor crecimiento en décadas en 2023, con un aumento de 349 GW en las adiciones y se prevé que en 2024 en un escenario alto haya un 18% más llegando a 2025 con un 17% de crecimiento.

Por todo lo anterior se plantea el diseño de un colector concentrador que con una serie de estos suministre el calor necesario al laminador para mitigar el uso de los combustibles fósiles. Dicho prototipo se describe en el apartado 4.1, 4.2 y 4.3 correspondientes al diseño del colector de concentración solar, intercambiador de calor y la laminadora ensambladora de paneles solares.

1.2.1 Ubicación y características del proyecto

El prototipo está pensado para que funcione en Col. del Valle Sur, delegación Benito Juárez. CDMX las características de radiación para esta localidad con coordenadas de latitud 19,37 y longitud -99,17.



Figura 1. Localización del lugar a implementar el sistema de concentración solar

Fuente: (NASA, 2024)

La Figura 1 nos indica las coordenadas a donde se utilizará el prototipo a través de la página de la NASA.

² Las siglas IEA, refieren a International Energy Agency

Cabe mencionar que los factores indispensables para utilizar la tecnología de concentración solar son: alta radiación solar y alta radiación solar directa. Esto quiere decir que es primordial la presencia de cielos despejados la mayor parte del año.

Tabla 1. Irradiación solar con cielo despejado

IRRADIACIÓN SOLAR CON CIELO DESPEJADO												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
IDIR	948	949	933	864	808	778	783	801	779	871	918	946
IDIF	127	142	159	197	226	246	244	233	242	165	133	119
PROMEDIO I. DIRECTA	865					PROMEDIO I. DIFUSA			186			

Fuente: (POWER DAVE, 2024)

En la tabla 1 se pueden ver datos proporcionados por la NASA³ para la irradiación solar en W/m² con cielo despejado al medio día, se obtienen los promedios mensuales tanto de la irradiación directa como de la difusa en la Ciudad de México, Delegación Benito Juárez, Colonia del Valle Sur con coordenadas 19.37 y longitud -99.17, obteniendo un valor para la primera de 865 W/m² y para la segunda de 186 W/m². Estos datos nos sirven ya que nuestro concentrador aprovecha estos dos tipos de irradiaciones sirviéndonos de base para realizar nuestros cálculos realizados en el apartado 5.1 “Análisis y Resultados del Colector Concentrador”.

1.3 Justificación

En el ensamble de los módulos fotovoltaicos MFV se requiere el uso de energía eléctrica, la cual es generada en México principalmente mediante combustibles fósiles, y sabiendo que toda industria debe tener una responsabilidad ambiental y esto se puede conseguir mediante la hibridación de sistemas de concentración solar térmica y sistemas que trabajan a base de derivados del petróleo con la finalidad de tener una sinergia entre estas dos clases de energía satisfaciendo la demanda energética para el funcionamiento óptimo de la laminadora de paneles solares, por eso hay que mencionar que “México es un país localizado entre los 14° y 33° de latitud septentrional que cuenta con un recurso solar abundante siendo uno de los 5 países del mundo con mayor irradiación, presentando condiciones favorables para el aprovechamiento de

³ Las siglas NASA, significan "National Aeronautics and Space Administration"

la energía solar en sus distintas modalidades de generación, ya que la irradiación global media diaria en el territorio nacional es de alrededor de 5.5 kWh/m², una de las mejores en el mundo” (SENER, Prospectiva de energías renovables 2020-2036, 2020) cómo se puede ver en la figura 2.

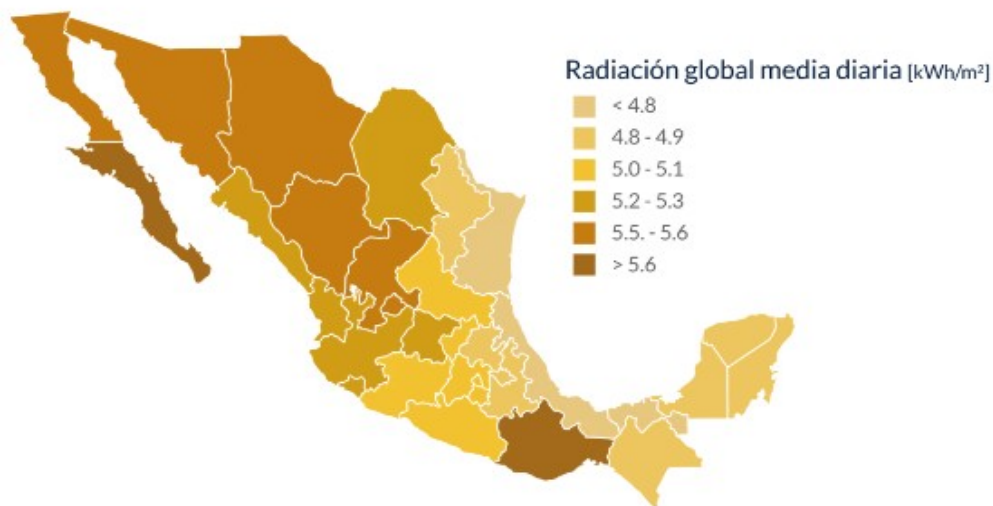


Figura 2. Irradiación diaria promedio anual en México

FUENTE: (SENER, Prospectiva de energías renovables 2020-2036, 2020)

Por lo tanto, “En los últimos años, el desarrollo tecnológico en materia de aprovechamiento de la energía solar térmica a nivel global se ha incrementado, debido principalmente a las políticas ambientales de protección del clima y al creciente aumento en el precio de los combustibles fósiles. Las aplicaciones solares térmicas para generación de calor en los procesos industriales cada vez toman auge en diferentes economías del mundo.” (Ortega, 2018). Así como en los próximos años habrá un aumento en las tarifas eléctricas en el sector industrial nos lleva a la necesidad de hibridar sistemas de energía renovable que nos ayude en el corto plazo a tener menos costos de producción en el ensamble de dicha tecnología solar de una manera sustentable y sostenible contribuyendo a mitigar emisiones de GEI, además de ser competitivos en el mercado solar fotovoltaico FV.

En cuestión de mitigación ambiental, según un informe de la IEA cada kWh⁴ de electricidad generada por energía solar tendría una huella de carbono equivalente a 6 gramos de CO₂ (gCO₂e/kWh). A modo de comparación, el carbón emitiría una media de 109 gCO₂e/kWh, el gas

⁴ La abreviatura kWh es una medida del consumo de energía

natural 78 gCO₂e/kWh y la energía hidráulica 97 gCO₂e/kWh. Entre las fuentes renovables, la bioenergía tendría una huella de 98 gCO₂e/kWh, mientras que la eólica y la nuclear 4 gCO₂e/kWh.

“Además de lo anterior se estima que la cantidad de energía requerida para fabricar un panel solar, medida en kWh, depende de varios factores, como el tipo de panel, el tamaño, la tecnología utilizada y el proceso de fabricación. Sin embargo, como estimación general, se requiere entre 200 y 400 kWh de energía para producirlo de tamaño estándar de 1 metro cuadrado por lo cual el módulo solar tarda solamente de 1 a 3 años en producir la cantidad de energía que utilizó para fabricarlo, y tomando en cuenta que la vida útil del mismo es de 25 a 30 años”. (AI, 2024).

1.3.1 Hipótesis

El diseño del colector solar con micro concentradores y la placa intercambiadora proporcionará calor al laminador solar eléctrico para reducir costos en el proceso de ensamble de módulos fotovoltaicos y contribuirá a utilizar menos energía proveniente del mix eléctrico mitigando las emisiones contaminantes y fabricando un panel solar amigable al ambiente.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar el diseño y simulación de un concentrador solar parabólico compuesto para proporcionar calor termosolar a un sistema de laminación eléctrico de módulos solares fotovoltaicos a través de un intercambiador de calor con una placa de cobre.

1.4.2 Objetivos específicos

- Seleccionar el concentrador solar adecuado para acercarnos a la temperatura de operación.
- Estudio del sistema de laminación de módulos fotovoltaicos.
- Cálculo y diseño del concentrador parabólico compuesto para absorbedor de 1”.
- Cálculo y diseño del colector con concentradores.
- Cálculo y diseño del intercambiador de calor con placa de cobre.
- Diseño integral de sistema de colectores con intercambiador y laminador de paneles.
- Simulación de colectores solares y de placa calefactora con fluido caloportador.

Capítulo II. Marco teórico

2.1 Conceptos Generales

En este capítulo, se presentan los conceptos que le darán soporte la investigación, de tal manera los conceptos que se desarrollan son: El sol, sistema sol-tierra, atmósfera, algunos conceptos térmicos, energía solar fotovoltaica y energía solar térmica, la finalidad de presentar el desarrollo de estas categorías es dar una explicación sobre sus cualidades y la importancia en su uso para desarrollar un concentrador solar.

2.1.1 El sol

El Sol es una fuente de energía de suma importancia para el planeta Tierra y los que vivimos en él. Esta estrella está formada por gases a muy alta temperatura, lo cual provoca que en su núcleo se presenten reacciones atómicas de fusión nuclear y libera una cantidad masiva de energía formando rayos solares que van al espacio exterior. Desde esta perspectiva, hay que saber que:

La radiación solar es la energía electromagnética que se recibe del Sol en forma natural y que ha permitido la existencia de la vida en la Tierra. Parte de esta energía es la responsable del clima en la Tierra y otra parte origina la mayoría de los procesos biológicos conocidos. Es tan abundante esta energía que puede aprovecharse para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad. El recurso solar se entiende como la energía que en forma de radiación térmica procedente del Sol llega a la superficie terrestre y se puede utilizar para algún proceso energético. A diferencia de otras energías renovables, la energía solar es en principio predecible ya que su disponibilidad primaria es función de un buen conocido sistema astronómico Sol-Tierra. Además del aspecto astronómico, la radiación solar disponible para una determinada región depende del comportamiento de la radiación electromagnética al incidir y penetrar la atmósfera terrestre; varios fenómenos se presentan a lo largo de la trayectoria de los rayos solares antes de llegar a la superficie de la Tierra. Conjuntamente la presencia de humedad (vapor de agua), aerosoles (humo, polvo, smog) y nubes son factores”. (Valladares, Figueroa, 2017).

Dicha estrella genera energía bajo un proceso nuclear de fusión, por medio del cual se convierte hidrógeno en helio, como se observa en la figura 3.

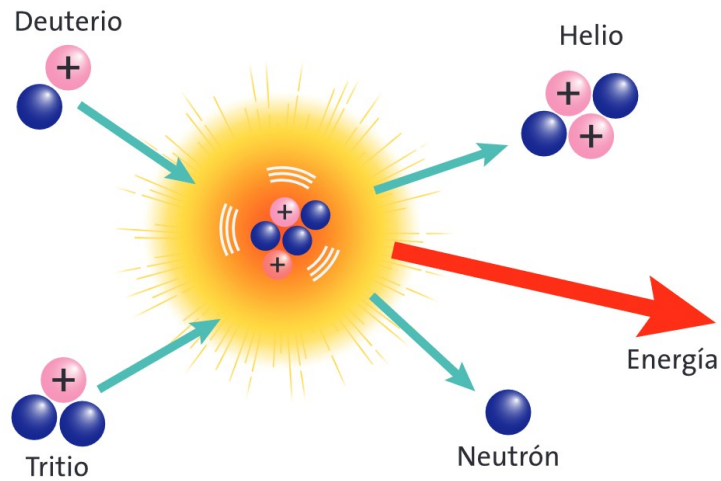


Figura 3. Reacción de fusión nuclear en el sol

Fuente: (Valladares & Figueroa, 2017)

La estructura general del Sol puede dividirse en núcleo, zona convectiva-radiativa y corona. En el núcleo es donde sucede la reacción de fusión, y en la zona convectiva-radiativa es donde ocurre la transferencia de energía a la corona, que es la superficie que observamos desde la Tierra como se ve en la figura 4. Las temperaturas del interior del núcleo sobrepasan los millones de kelvin, pero se estima que en la superficie del Sol la temperatura promedio es de casi 5,778 K.

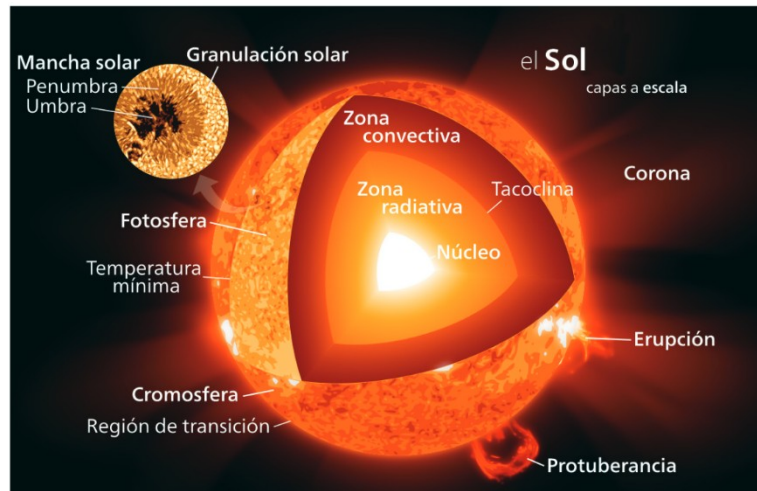


Figura 4. Estructura solar

Fuente: (Valladares & Figueroa, 2017)

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 que la órbita terrestre alrededor del Sol es elíptica, por lo que presenta acercamientos o alejamientos del astro, y también a causa de la actividad solar cuyo ciclo es de 11 años. El valor actualizado y más preciso es de $1,360.8 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$; este valor se conoce en la literatura ingenieril como la “constante solar”, pero se sabe que no es precisamente una constante universal en el sentido científico y que esas pequeñas variaciones pueden incidir en el clima terrestre pero son poco importantes en aplicaciones de energía solar" (Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017, p. 23)

La radiación emitida por la superficie del Sol tiene una distribución espectral que se asemeja a la de un cuerpo negro a 5,778 K, como se observa en la figura 5.

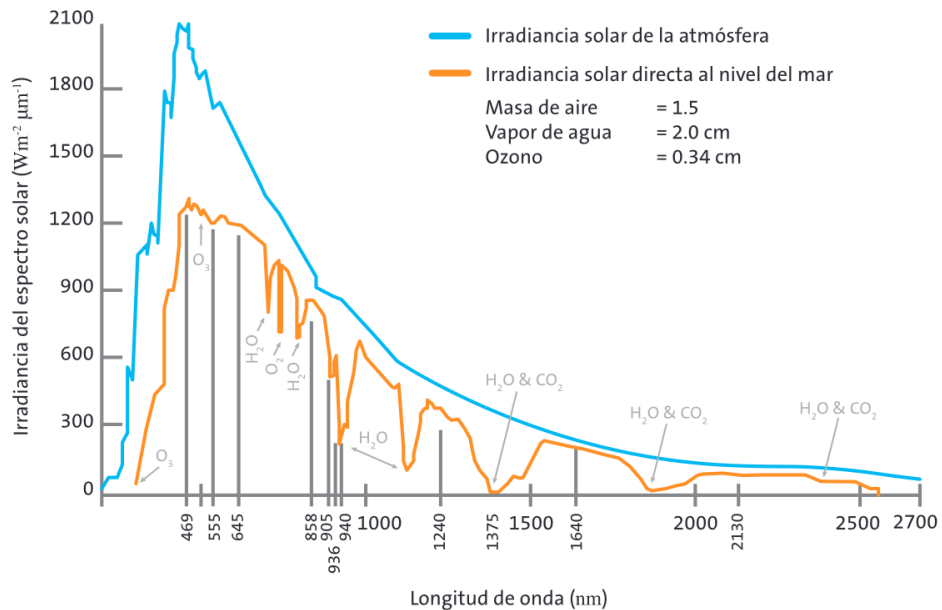


Figura 5. Espectro solar en el tope de la atmósfera y al nivel del mar

Fuente: (Valladares & Figueroa, 2017)

2.1.2 Sistema Sol-Tierra

La Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica, casi esférica, en la que éste está en uno de los focos. Un ciclo completa en 365 días y se denomina movimiento de traslación que se puede apreciar en la figura 6. 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 ($23^\circ 26' 13.7''$) con respecto al plano de la órbita. Este

plano recibe el nombre eclíptico. El movimiento de traslación en conjunción con la oblicuidad terrestre produce las estaciones del año; y el de rotación, el día y la noche. De estos dos movimientos depende cuánta energía solar 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 observándose en la figura 7. La distancia más grande entre el Sol y la Tierra durante el año sucede en el solsticio de verano, y la más corta en el solsticio de invierno. Esta es una de las razones de que la Antártida sea el continente más frío del planeta.

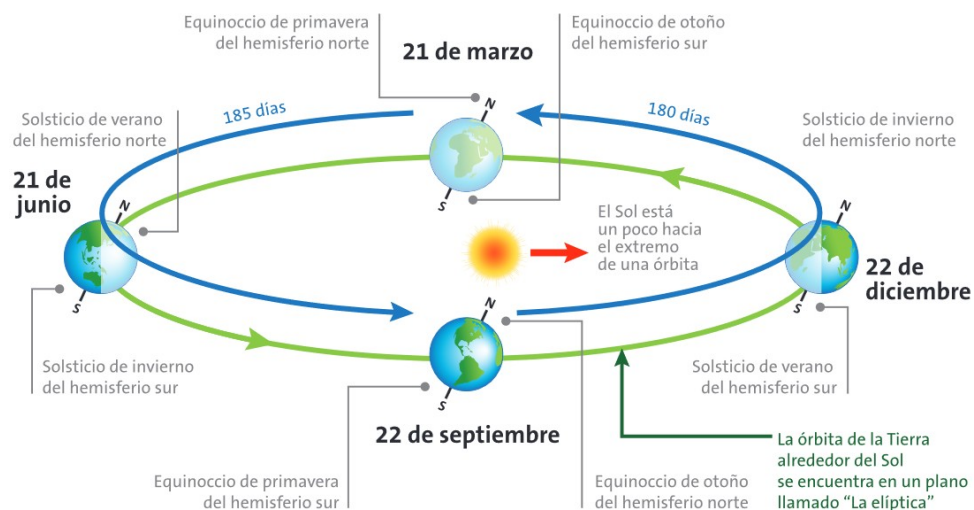


Figura 6. Órbita de la tierra alrededor del sol a lo largo del año

Fuente: (Valladares & Figueroa, 2017)

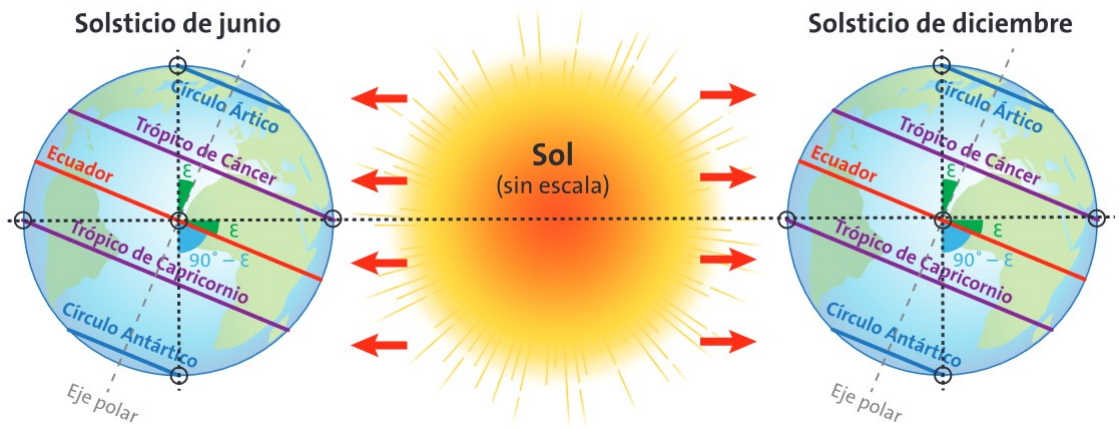


Figura 7. Variación de la dirección de los rayos solares sobre la superficie de la tierra a lo largo del año

Fuente: (Valladares & Figueroa, 2017)

2.1.3 Atmósfera

No sólo de la interacción del sistema astronómico Sol-Tierra depende la cantidad de radiación solar que recibe una determinada región sobre la superficie de la Tierra, sino también de las condiciones de la atmósfera. Varios fenómenos se presentan durante la trayectoria de la radiación electromagnética proveniente del Sol a través de la atmósfera: la dispersión, la reflexión y la absorción son los principales factores que atenúan la cantidad de radiación que viaja por las distintas capas atmosféricas.

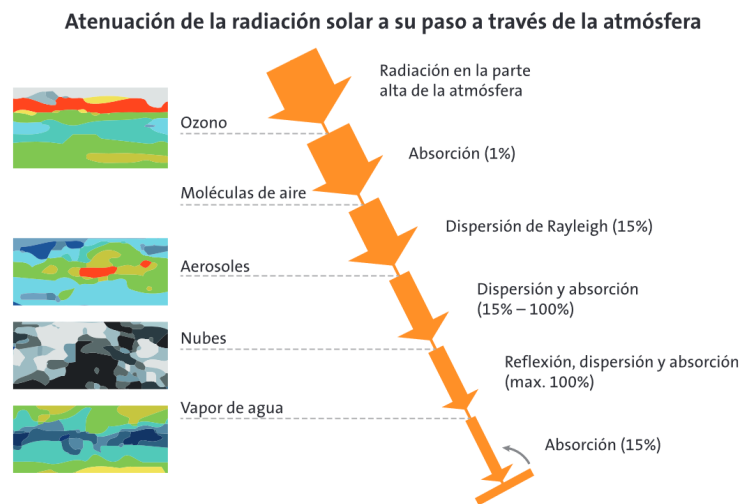


Figura 8. Factores que influyen en la atenuación de la radiación solar incidente

Fuente: (Valladares & Figueroa, 2017)

Bajo el contexto de la figura 8, los factores que intervienen en la irradiación solar cuando atraviesa la atmósfera, se puede observar el elemento de la dispersión. Esta se refiere al fenómeno que ocurre cuando la radiación electromagnética interacciona con partículas o moléculas de los gases presentes en la atmósfera y una parte de aquélla es redireccionada en forma aleatoria sin cambiar la longitud de onda (dispersión de Rayleigh), en tanto otra parte considerable de la radiación, es devuelta al espacio por este fenómeno. Entonces el tamaño de "las partículas y de las moléculas afectan de diferente manera a las distintas longitudes de onda; dadas las características de la atmósfera terrestre, las longitudes de ondas pequeñas (cercanas al azul) son más dispersadas (esto origina el color del cielo, de lo contrario sería transparente, como en la noche). (Valladares, Figueroa, 2017).

Por otra parte, y, siguiendo a Valladares, et al., (2007) la absorción se presenta cuando las moléculas de ozono (O₃), de vapor de agua (H₂O) o de dióxido de carbono (CO₂) junto con los aerosoles de partículas de polvo, hielo y otras sustancias, reciben radiación solar que aumenta su temperatura (y que se reemite por radiación térmica). Esta fracción de la energía total puede llegar a ser del 15 %, dependiendo de las condiciones atmosféricas. Por consiguiente, los autores (ibídem, 2007) mencionan que la reflexión de las nubes conformadas por aerosoles de agua y de hielo reflejan una gran cantidad de radiación incidente, por lo que bloquean el paso de la misma a la tierra y dependiendo del espesor de la capa de nube, el bloqueo puede llegar a ser total. Las nubes presentan al mismo tiempo un fenómeno llamado absorción. Por ello, en términos generales se calcula que alrededor del 23 % de la radiación solar extraterrestre incidente en la atmósfera será atenuada por estos fenómenos antes de llegar a la superficie de la tierra.

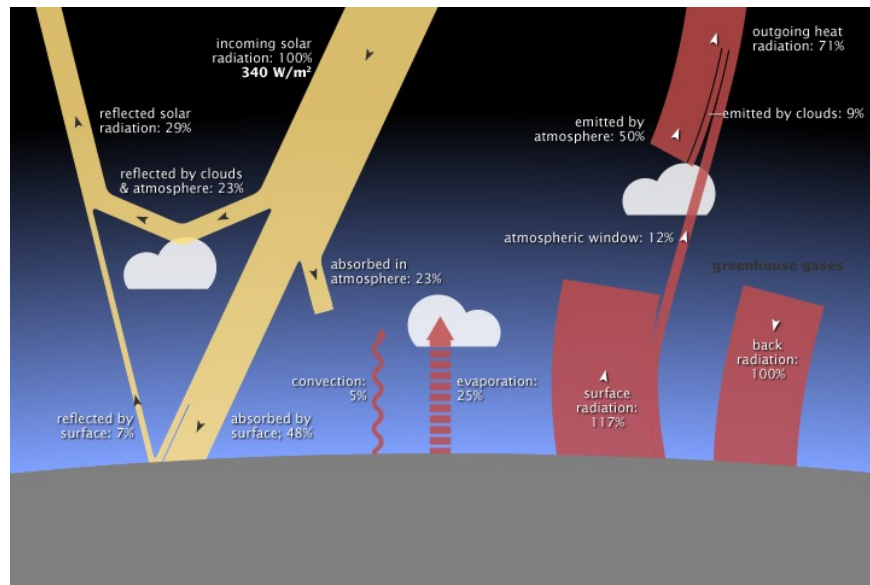


Figura 9. Tipos de radiaciones

Fuente: (Valladares & Figueroa, 2017)

La energía solar es la radiación térmica que emite la capa externa del Sol. En los límites inmediata de la atmósfera de la Tierra, esa radiación, denominada irradiancia solar, tiene una magnitud de 1.367 W/m², en promedio, respecto de una superficie perpendicular a los rayos solares. Al nivel del terreno (especificado por lo general como el nivel de una superficie marina situada directamente bajo el Sol), la irradiancia resulta atenuada por la atmósfera, quedando reducida a unos 1.000 W/m² con cielo despejado y en torno al mediodía (situación que se denomina ‘a pleno sol’). En el exterior de la atmósfera, la energía del Sol es transportada mediante ondas electromagnéticas con longitudes de onda de entre 0,25 μm y 3 μm . Parte de la irradiancia solar proviene de los rayos que llegan directamente del Sol sin dispersarse en la atmósfera. Esa irradiancia ‘de haz’, que puede ser concentrada utilizando espejos y lentes, está disponible sobre todo en la región de la cubierta de nubes bajas. La irradiancia restante se denomina ‘irradiancia difusa’. La suma de las irradiancias de haz y difusa se denomina ‘irradiación solar mundial’. Se ha estimado en $3,9 \times 10^6$ EJ/año el potencial teórico de la energía solar, magnitud que refleja la cantidad de irradiancia en la superficie de la Tierra (tierras y mares), teóricamente disponible para la obtención de energía. Esa cifra, indicada como es evidente con fines ilustrativos, implicaría la utilización de toda la superficie terrestre y marina disponible con una eficiencia de conversión del 100%. Una magnitud más útil es el potencial

técnico, basado en la proporción de tierra firme que puede ser utilizada por los dispositivos de conversión con unos valores de eficiencia más realistas.

2.1.2 Algunos conceptos térmicos

Emisividad. [ϵ] Es una propiedad que posee todo cuerpo y se define como la relación entre la radiación térmica emitida por una superficie u objeto y su temperatura, cuando se considera la dirección en la que la energía es emitida se llama emisividad direccional. En la mayoría de los casos, una emisividad alta va acompañada de una absorptividad alta.

Reflectividad. [ρ] Es otra característica que tienen los cuerpos y es la reflexión de la radiación, es decir, el flujo radiante se reenvía o redirecciona sin que varíe la longitud de onda que en caso contrario se denomina fluorescencia. La radiación especular es la radiación que es reflejada en el mismo ángulo en que incidió.

Transmisividad. [τ] La transmisividad óptica se refiere a la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda. Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo traslúcido, una parte de esa luz es absorbida por el mismo, otra se reflejará y otra fracción de ese haz de luz atravesará el cuerpo, según su transmisividad.

Absortividad. [α] Es la porción de la radiación que incide en un cuerpo que es absorbida por el mismo, es decir, lo opuesto de la emisividad. Para superficies con transmisividad igual a cero (cuerpos opacos), la suma de la absorptividad y la reflectividad es igual a 1. Mientras que, para medios transparentes como vidrio, la suma de la absorptividad, reflectividad y transmisividad es igual a 1.

Refracción. Es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, que puede regresar al medio original. Dependiendo del medio y la composición de éste, la refracción ocurre a diferentes valores.

Reflexión. Es el fenómeno que ocurre cuando un rayo de luz o una onda “rebota” al chocar con una superficie, esta reflexión puede ocurrir en diferentes direcciones. La superficie debe de tener un recubrimiento especial o ser de algún material especular y la reflexión puede ocurrir al mismo tiempo que la refracción.

Calor. Es la energía en estado transitorio y se da cuando un cuerpo y/o sistema transfiere energía a otro. Esta transferencia se da sólo cuando existe una diferencia de temperaturas y la transferencia ocurre en dirección de mayor a menor. Si los sistemas o cuerpos están en equilibrio

termodinámico no es posible que exista una transferencia de calor, en caso contrario, la energía puede ser adquirida por el cuerpo o sistema y ser parte de su energía interna.

Convección. Es una de las 3 formas que existen para la transferencia de calor y ocurre siempre que exista un fluido, ya sea en estado gaseoso o líquido. El calor se transfiere por el movimiento de uno o más fluidos, de manera natural o forzada y también puede ocurrir una transferencia de calor entre un sólido y el fluido.

Conducción. Es otro mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas basado en el contacto directo de sus partículas, que tienden a igualar su temperatura o estado de excitación térmica.

Radiación. Esta forma de transferencia de calor existe en todo cuerpo o sistema que tenga una temperatura mayor al cero absoluto y puede transmitirse en un medio material o en el vacío. La energía es propagada en forma de ondas electromagnéticas y ocurre al mismo tiempo que la conducción y convección.



Figura 10. Mecanismos de transferencia de calor

Fuente: (Lavati, 2018)

Irradiancia. Es la potencia efectiva proveniente del sol por unidad de superficie. Sus unidades son W/m^2 .

Irradiación. Es la magnitud que mide la energía por unidad de área de radiación solar incidente en una superficie colocada en un lugar y rango de tiempo bien especificados. Sus unidades son Wh/m^2 .

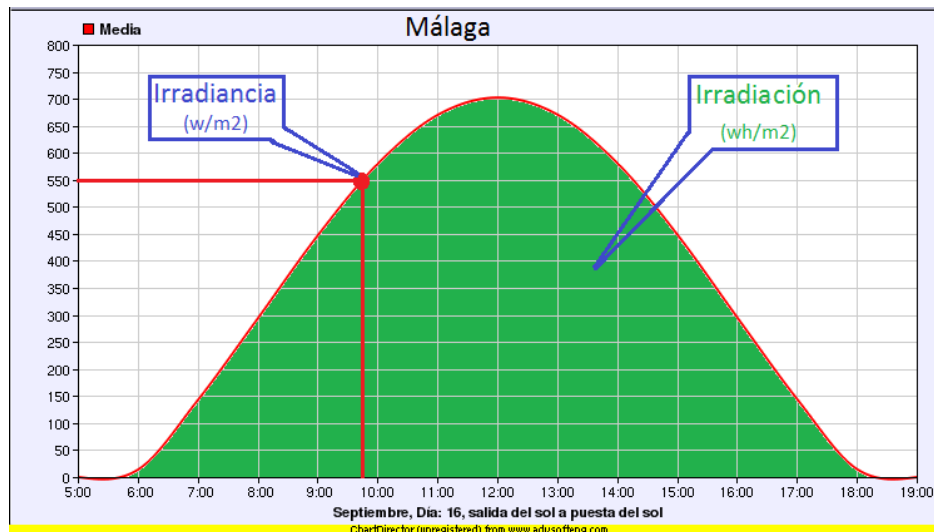


Figura 11. Diferencia entre irradiancia e irradiación en la ciudad de Málaga

Fuente: (Heliosfera, 2021)

Ley de Stefan-Boltzmann. Es una ley que establece el límite de energía que puede transmitir un cuerpo real y un cuerpo negro, dependiendo de la temperatura a la que se encuentren. La potencia emisiva de una superficie o cuerpo real siempre será menor que la de un cuerpo o superficie negra a la misma temperatura.

2.1.3 Energías renovables

Las energías renovables se pueden atender a la naturaleza de sus recursos. Dentro de los recursos energéticos que se consideran renovables podemos distinguir un gran grupo que procede de la energía solar directa o indirectamente. Es decir que además del aprovechamiento directo de la radiación solar, la energía que la tierra recibe del sol es la causa de que exista el ciclo hidrológico, los vientos, las olas del mar y el desarrollo de la biomasa, por lo tanto, en la figura 12 se puede observar las energías renovables existentes.

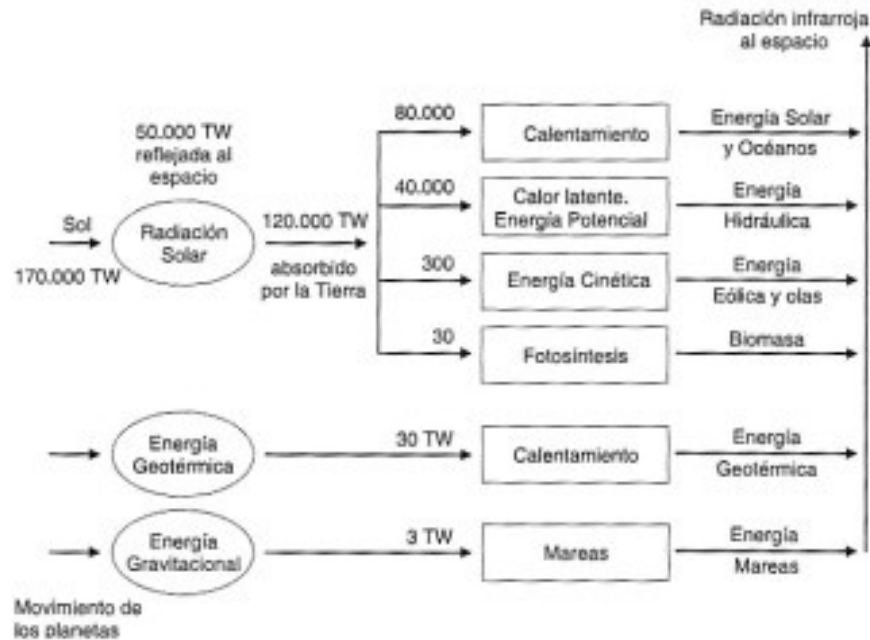


Figura 12. Energías renovables existentes

Fuente: (TECPA, 2019)

2.1.4 Energía solar fotovoltaica

La energía fotovoltaica es la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación se produce en unos dispositivos denominados paneles fotovoltaicos. En los paneles fotovoltaicos, la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor generando una pequeña diferencia de potencial. La conexión en serie de estos dispositivos permite obtener diferencias de potencial mayores.

Aunque el efecto fotovoltaico era conocido desde el siglo XIX, fue en la década de los 50, en plena carrera espacial, cuando los paneles fotovoltaicos comenzaron a experimentar un importante desarrollo. Inicialmente utilizados para suministrar electricidad a satélites geoestacionarios de comunicaciones, hoy en día constituyen una tecnología de generación eléctrica renovable.

Existen 3 tipos de “sistemas fotovoltaicos interconectados, aislados e híbridos, el más común es el conectado a la red en la figura 13 se observa un sistema de ese tipo.” (APPA Renovables, 2022)

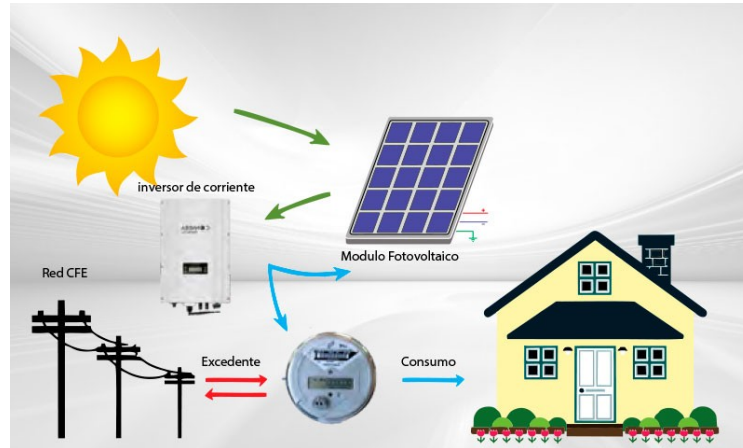


Figura 13. Elementos de un sistema fotovoltaico interconectado

Fuente: (APPA Renovables, 2022)

2.1.5 Energía solar térmica

La energía solar es la fuente de energía más abundante sobre la tierra, con “alrededor de 885 millones de TWh que caen sobre la superficie del planeta cada año, esto representa alrededor de 6,200 veces la energía primaria comercial consumida por el hombre en el 2018.” (IMP, 2018)

El proceso para capturar el calor recibido del sol es relativamente sencillo, y puede completarse con varios dispositivos estacionarios o con seguimiento al sol, y con concentración o sin ella.

La radiación solar calienta un receptor y la energía térmica se transfiere a un fluido que lo transporta a la aplicación, ya sea para calentar directamente algún proceso productivo o indirectamente para enfriar un espacio o fluido de trabajo.

Actualmente, los sistemas fototérmicos se utilizan principalmente para calentamiento de agua y acondicionamiento de espacios en el “sector residencial, pero también pueden emplearse para

proporcionar calor en procesos industriales. El calor de proceso puede subdividirse en dos grandes ramas: secadores y colectores solares”. (Proméxico, GIZ, & IER, 2017).

En la figura 14 podemos ver la clasificación general de dispositivos y sistemas solares que existen:

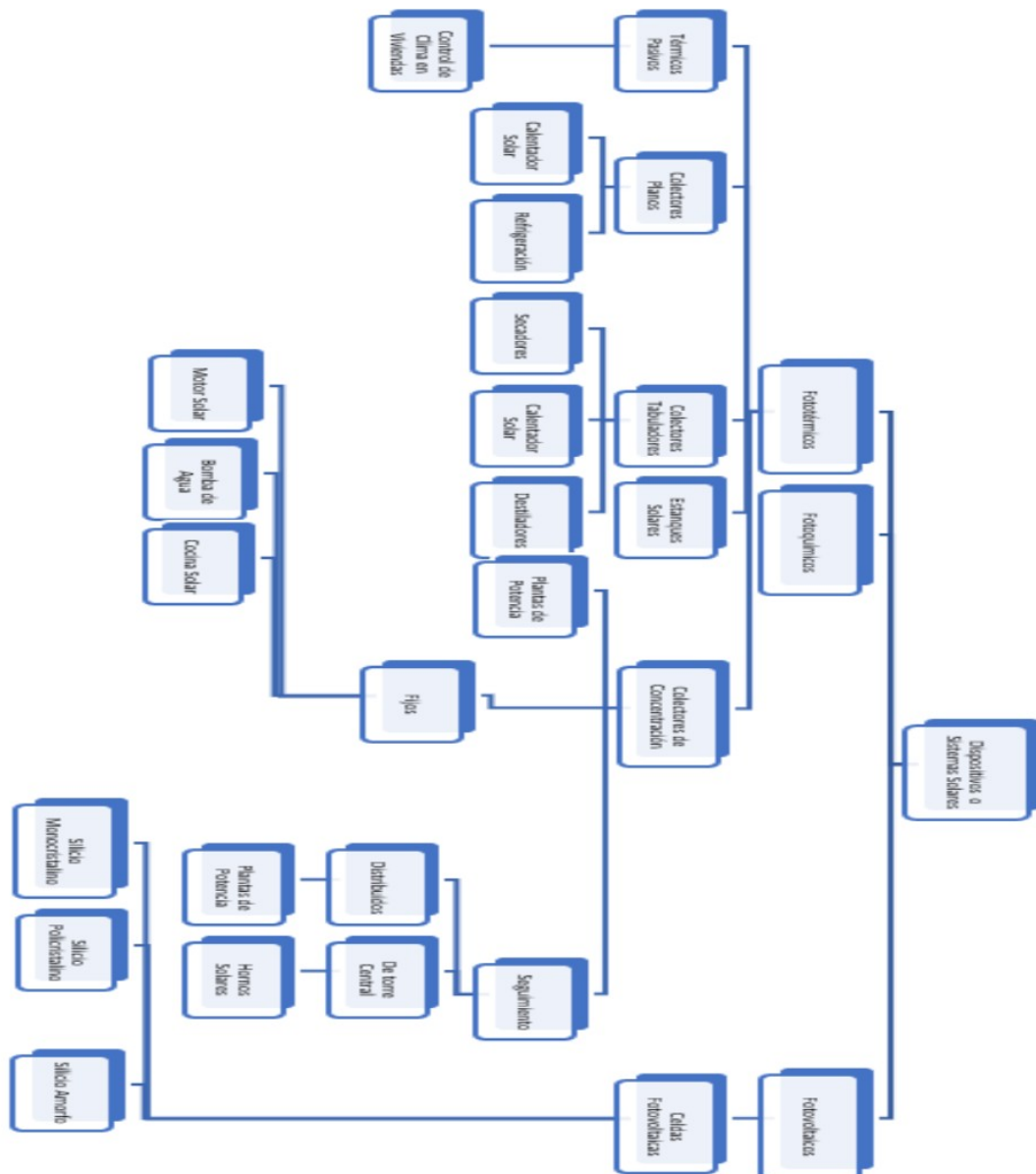


Figura 14. Diferentes dispositivos y tipos de sistemas solares

Fuente: Elaboración propia

2.1.5.1 Historia de la concentración solar

Arquímedes

Hablando de la historia naval en Siracusa, según narran algunos antiguos historiadores en el año 212 a.C., a petición del rey Herón, Arquímedes quemó las naves romanas que sitiaban la ciudad con la ayuda de 300 soldados apuntando a un solo punto llamado rayo de calor o rayo de la muerte. Para llevar a cabo tal hazaña, Arquímedes utilizó varios espejos planos o tal vez escudos reflejantes que en conjunto formaban un gran espejo cóncavo, pues en esa época ya se utilizaban espejos pulidos de plata y cobre para concentrar la luz del Sol como se ve en la figura 15.



Figura 15. Arquímedes de Siracusa quemando barcos con luz solar

Fuente: (Spencer, 2023)

Priestley, Scheele, Lavoisier y las lentes ardientes

Algunos químicos utilizaron lentes ardientes en el siglo XVIII como medio para alcanzar altas temperaturas uno de ellos fue el químico inglés Joseph Priestley (1733-1804). Era un inventor de gases que descubrió entre otros el aire desflogisticado (el oxígeno actual) calentando óxido de mercurio rojo mediante una lente ardiente de 12 pulgadas de diámetro y 20 de distancia focal óxido de mercurio rojo esto ocurrió el primero de agosto de 1774. (Priestley, 1776).

Petición de Scheele a Lavoisier

El 30 de septiembre de 1774 el químico sueco Carl Wilhem Scheele (1742-1786) escribió una carta al químico francés Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) en Uppsala en la

cual le pedía realizar ciertos experimentos con lentes ardientes a la cual no respondió. En este mismo año Lavoisier continúa con sus experimentos uno de ellos de óxido de plomo con una gran lente fabricada por Tschirnhaus perteneciente al conde Teóphile Malo con aproximadamente 33 pulgadas de diámetro, junto con otra lente y la academia de ciencias de París del 14 de agosto al 17 de octubre de 1772. En este mismo año “se realizaron 192 experimentos en los que calentaron muchas sustancias, se realizaron varios experimentos de fusión que incluyeron diamantes, hierro, platino, oro estaño, zinc y cobalto. La segunda serie de 28 experimentos se lleva a cabo el 14 de marzo al 14 de agosto de 1773, en este periodo se llevaron experimentos de calentamiento con polvo de diamante, mercurio, manganeso y carbono. Un ejemplo es el de sulfuro de mercurio puesto en un plato de porcelana dura que se evaporaba en su totalidad sin dejar ningún residuo.” (Lavoisier, 1865).

El gran vidrio del Sr. Trudaine

En 1774 continuaron los experimentos con una nueva lente presentada a la Academia de Ciencias de París por Jean Charles Philibert Trudaine de Montigny (1733-1777) esta lente llamado el “gran vidrio ardiente consistía en dos segmentos de una esfera de vidrio de 8 pies de radio sellados entre sí para dejar un espacio de 4 pies de diámetro y 17 cm de espesor lleno de alcohol con una lente auxiliar de vidrio sólido de 8 pulgadas, llevaba los rayos del sol a un foco de menos de una pulgada de diámetro que fundía en medio minuto un centavo de cobre y monedas de plata francesas.” (Montigny, 1774).

Platino y lentes ardientes. El nuevo método de Lavoisier para fundir platino utilizando oxígeno

Entre los metales con los que experimentaron Lavoisier, Macquer, Cadet, Brisson y Trudaine de Montigny en 1772-1774 el platino era extremadamente resistente a las pruebas de fusión con lentes quemadas.

En una carta a Priestley del 7 de junio de 1782, Benjamin Franklin (1706-1790) le informo de la fusión del platino por parte de Lavoisier. Leslie B. Hunt en su artículo, “The Real Melting of Platinum”, describió brevemente el experimento de fusión de platino en la que Lavoisier dirige la corriente de oxígeno hacia un trozo de carbón ahuecado en el que había colocado una pequeña cantidad de metal”. (Cazar, 1982) esta gran lente se puede observar en la figura 16.

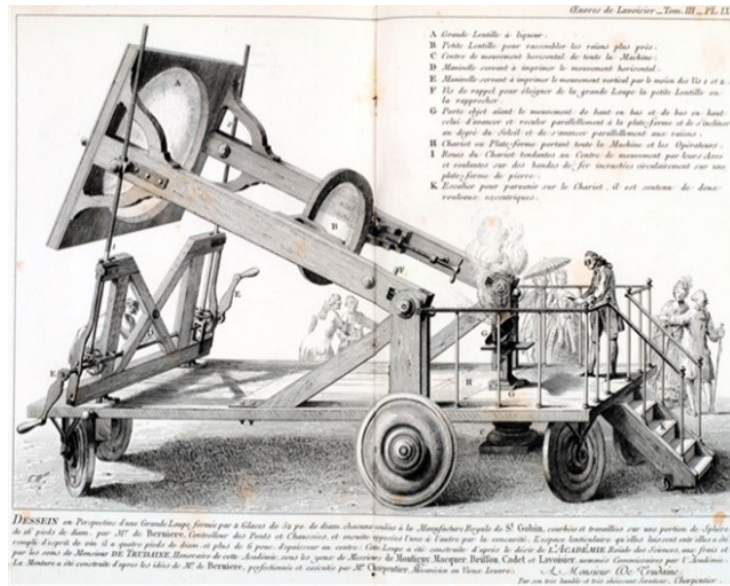


Figura 16. Horno solar de Lavoisier

Fuente: (Lavoisier, 1865)

Horace Bénédict de Saussure

En 1767 el científico suizo inventó lo que se considera el predecesor de los colectores actuales, buscando bloquear la pérdida de calor aún más eficazmente, De Saussure hizo una pequeña caja rectangular de pino de media pulgada y la forró con corcho negro, tres láminas de vidrio separadas cubrían la parte superior de la caja. cuando se expuso al sol, el fondo de la caja alcanzó una temperatura de 118°C, por encima del punto de ebullición del agua, este dispositivo se denominó caja caliente debido a la gran cantidad de calor solar que podía retener.

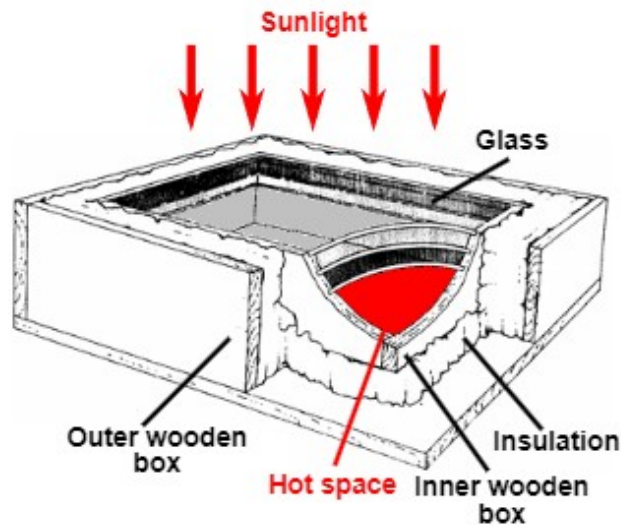


Figura 17. Saussure hot box

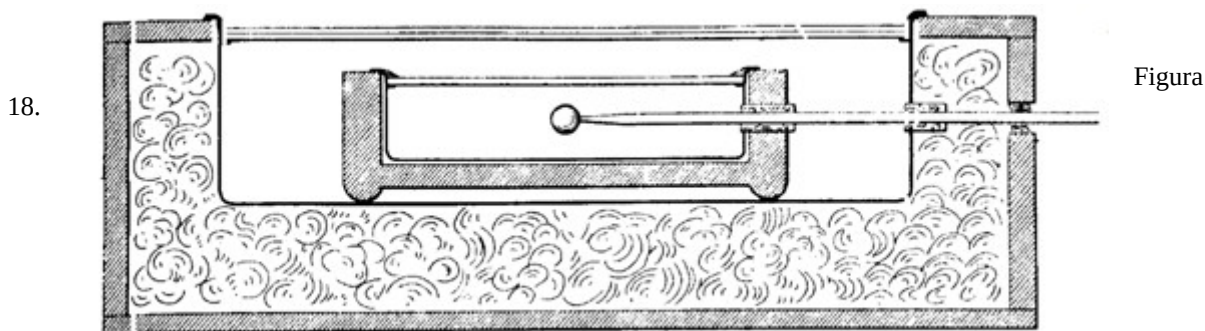
Fuente: (The history of using solar energy, 2017)

Dicha caja seguía cediendo calor al exterior por lo que Saussure decidió entonces colocarla dentro de un “contenedor abierto por arriba y rellenarlo con lana, dicho reforzamiento aislante se puede apreciar en la figura 17 con el cual hubo una menor pérdida de calor, con lo que la temperatura en el interior de la caja caliente ascendió a 120°C, aun cuando el tiempo no era tan favorable.” (Solar cookers international, s.f.).

Sir John y Samuel Pierpont

Varios científicos del siglo XIX realizaron experimentos con cajas calientes y obtuvieron resultados comparables. Sir John Herschel, el destacado astrónomo, hizo una caja caliente durante una expedición en la década de 1830 al Cabo de Buena Esperanza en Sudáfrica. era un pequeño recipiente de caoba ennegrecido por dentro y cubierto de vidrio, encajado en un marco de madera protegido por otra hoja de vidrio y por arena amontonada a los lados. el resultado de los experimentos de herschel con esta caja caliente no sólo fue científicamente interesante sino también agradable al paladar.

La historia de las comidas al aire libre solares de Sir John intrigó a Samuel Pierpont Langley, el astrofísico estadounidense que más tarde se convirtió en director del Instituto Smithsonian. Langley había estado fascinado por el calor solar desde que era niño, cuando se preguntó por qué el vidrio mantenía caliente el interior de un invernadero. En 1881, Langley hizo un viaje al monte. Whitney para estudiar los efectos de la energía solar. allí experimentó con una caja caliente.



Sección transversal de la caja de Langley

Fuente: (Solar cookers international, s.f.)

De Saussure, Herschel y Langley demostraron que en una caja cubierta de vidrio se podían producir temperaturas superiores al punto de ebullición del agua como se observa en la figura 18.

W. Adams

El colector solar de W Adams era el más eficiente que todas las variantes construidas hasta ahora. El horno contaba con 8 espejos de vidrio plateado colocados simétricamente formando un reflector ortogonal como se muestra en la figura 19. Los espejos concentraban la luz del sol en una caja de madera cubierta de vidrio en la que se colocaba la olla de comida a hervir.

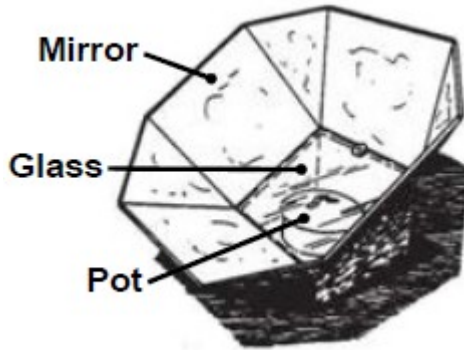


Figura 19. Horno solar de Adams

Fuente: (Solar cookers international, s.f.)

Este fue el primer horno solar producido en masa, la temperatura de su caja podía superar los 200°C, muy popular tanto en la india como en los estados unidos de América.

Durante el siglo XIX, la tecnología evolucionó hasta un nivel en el que fue posible convertir directamente la energía solar en otras formas, principalmente en vapor a baja presión, necesario en las extensas máquinas de vapor.

August Monchot

El profesor e inventor de matemáticas (1825-1911) fue pionero en este campo al desarrollar diversos dispositivos a base de rayos solares, como hornos, alambiques, bombas y, en última instancia, las primeras máquinas de vapor solares. “El motor más grande de este tipo se muestra en la figura 20, estaba hecho de una placa de metal cubierta de plata de 5.4 m de diámetro y con un área total de recolección de 18.6 m y sus partes móviles eran de 1400 kg”. (B. Sorensen, 2009).

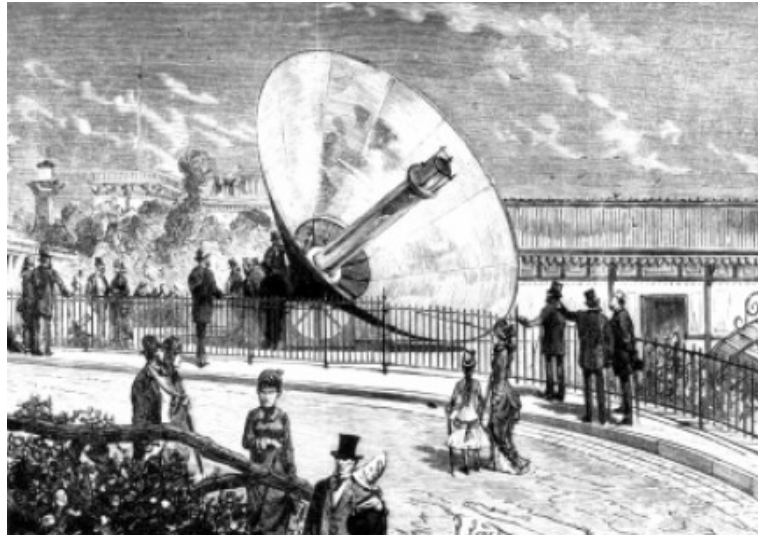


Figura 20. La máquina solar de Monchot's

Fuente: (Perlín, 2017)

Abel Pifre

Los desarrollos de Monchot los continuó su asistente Abel (1852-1928). Sus Colectores solares eran reflectores parabólicos hechos de espejos muy pequeños. Su forma era ligeramente similar a la de los conos truncados de Monchot mostrados en la figura 20. Su máquina de vapor solar más conocida se construyó en 1882. Utilizó un espejo cóncavo de 3.5 m de diámetro que tenía en su foco una caldera de vapor cilíndrica. El vapor generado accionaba un pequeño motor vertical de unos 300 W que impulsaba una imprenta esta se puede observar en la figura 21.

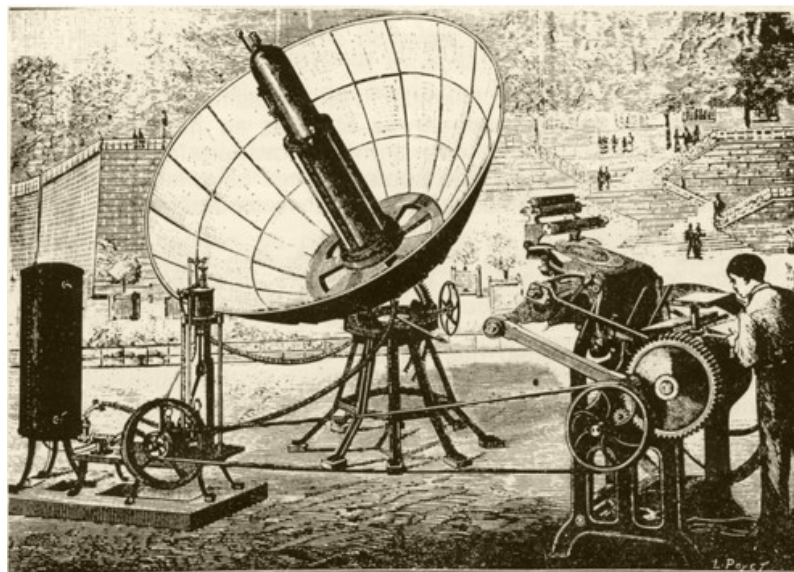


Figura 21. La imprenta impulsada por el sol

Fuente: (Land art generator, 2012)

John Ericsson

El inventor sueco estadounidense (1803-1889) que se dedicó al desarrollo de energía útil a partir de energía solar. En 1873 inventó un motor de tipo desplazador llamado Stirling mostrado en la figura 22 que funcionaba con rayos solares recogidos por un reflector parabólico. Con este motor demostró que se puede producir energía únicamente con energía solar sin la intervención de vapor.

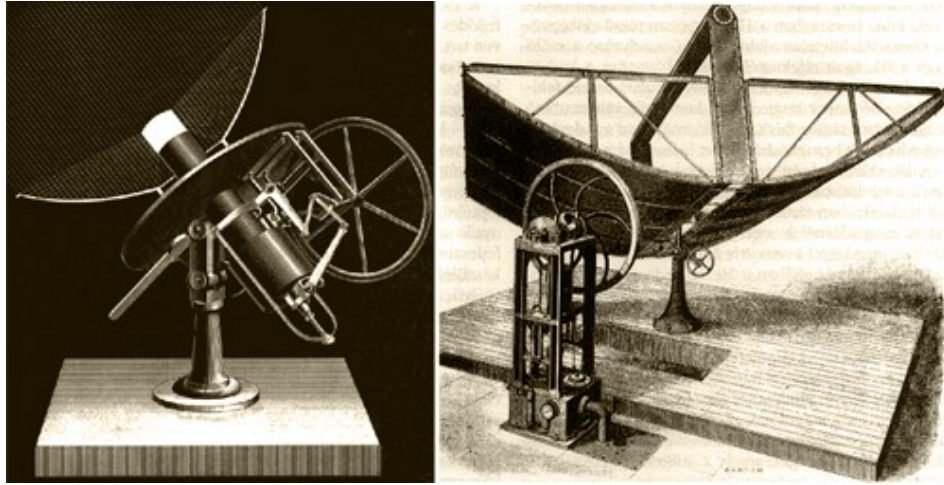


Figura 22. La máquina solar Stirling de John Ericsson

Fuente: (Land art generator, 2012)

Clarence Kemp

“El primer producto comercial fue el calentador de agua solar Climax, comercializado a partir de 1891 por su inventor **Clarence Kemp** que se puede apreciar en la figura 23. Se hicieron muy populares en aquella época en la costa oeste de Estados Unidos. A principios del siglo XX se realizaron más mejoras incorporando tuberías expuestas al sol y tanques de almacenamiento aislados remotamente a los que entraba el agua caliente. Todo esto permitió a las personas disfrutar de agua caliente todo el día y la noche”. (Perlín, 2017).

Climax Solar-Water Heater
UTILIZING ONE OF NATURE'S GENEROUS FORCES
THE SUN'S HEAT (Stored up in Hot Water for Baths, Domestic and other Purposes.)

Price Of No. 1 Heater for 1892 Reduced to \$18.00

Price, No. 1, \$25.00
This size will supply sufficient for 3 to 4 Baths.

CLARENCE M. KEMP, BALTIMORE, MD.

Figura 23. Colector solar comercial

Fuente: (Land art generator, 2012)

El desarrollo de los captadores solares continuó también a principios del siglo XX. Los hitos más significativos son los siguientes:

En 1901 **A.G. Eneas** instaló un colector focalizador de 10 m de diámetro que accionaba una bomba de agua en California. “El dispositivo constaba de una gran estructura en forma de paraguas que tenía en su interior 1788 espejos. El agua dentro de la caldera colocada en el colector se calentaba y el vapor producido actuaba mediante un motor compuesto convencional y una bomba centrífuga”. (B. Sorensen, 2009)

En 1912, **Frank Shuman** (1862-1918), un pionero estadounidense de la energía solar, construyó la primera central solar térmica en el mundo para una planta de bombeo en Meadi, Egipto como se puede observar en la figura 19. Dicho sistema utilizaba varios cilindros-parabólicos de 62 m de largo para enfocar la luz solar en un tubo absorbente. Los cilindros cubrieron en total más de 1200m de superficie. El motor solar fue capaz de desarrollar una potencia de 37 a 45 kW de forma continua durante un periodo de 5 horas. Permitted bombear más de 20 mil litros de agua por minuto desde el Nilo hasta los campos agrícolas adyacentes.

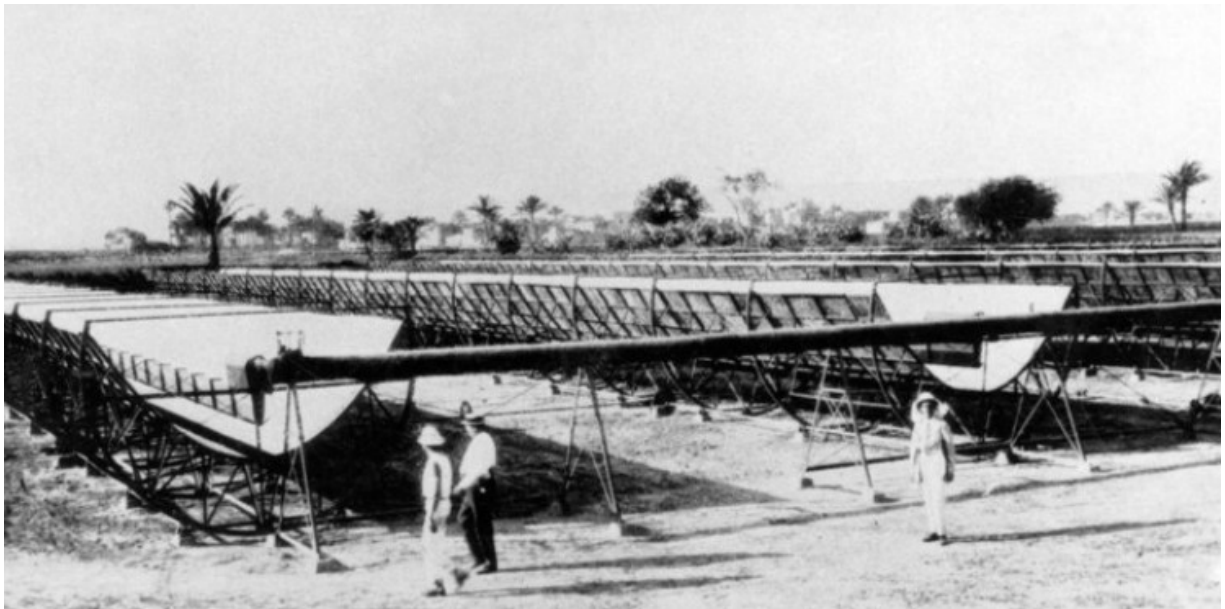


Figura 24. Trabajadores inspeccionando la primera planta solar térmica comercial

Fuente: (Howard, 2013)

Durante los últimos 50 años, se diseñaron y construyeron muchas variantes de captadores de enfoque de rayos solares. Se utilizaron dos tecnologías solares principales: con receptores centrales y distribuidos.

Los sistemas de receptores centrales se basan en heliostatos (espejos de seguimiento de dos ejes) para enfocar la luz solar en un único receptor montado en una torre. La tecnología de receptores distribuidos aplica a diversos enfoques, como antenas o cilindro parabólicas, concentradores de Fresnel.

Primera planta de concentración

La primera planta comercial de energía solar de concentración del mundo, la planta solar 10, se instaló en 2004 cerca de Sevilla, España. Reflejando la luz del sol a través de 624 grandes espejos móviles (llamados heliostatos) hacia lo alto de una torre de 115 m de altura, donde un receptor solar mediante una turbina de vapor y un generador puede producir 11 MW de energía eléctrica (suficiente para 55000 hogares).

La mayor central de este tipo del mundo se inauguró el 13 de febrero de 2014 en Ivanpah Dry Lake (California, EE. UU). La potencia nominal del sistema de generación eléctrica solar de 377 MW (suficiente para alimentar 140000 hogares) aquí más de 300 mil espejos controlados por

software siguen el sol en dos dimensiones y reflejan la luz solar hacia las calderas ubicadas en lo alto de 3 torres de 140 m de altura, como se puede ver en la figura 25.



Figura 25. Planta solar torre central Ivanpah Dry Lake

Fuente: (Álvarez, 2016)

2.1.6 Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos de fuentes renovables son aquellos que combinan dos o más tipos de energías, ya sea de energías renovables o convencionales para tener un sistema de mayor eficiencia, continuidad y confiabilidad al generar energía. Estos sistemas aprovechan las fortalezas de cada fuente de energía para maximizar la producción de energía y minimizar los efectos de gases de efecto invernadero así como menciona (Catalán, 2023), la finalidad es reducir la intermitencia de generación de energía, además de otras ventajas son:

- **Mayor disponibilidad y confiabilidad:** Los sistemas híbridos pueden garantizar un suministro de energía más confiable y continuo, incluso en condiciones climáticas variables. Si una fuente de energía está inactiva o produce menos energía, otras fuentes

complementarias pueden cubrir la demanda. Esto reduce la dependencia de una única fuente y aumenta la disponibilidad energética.

- **Reducción de emisiones:** Al integrar fuentes de energía renovable, los SHI (Sistemas Híbridos Integrados) contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con sistemas convencionales basados únicamente en combustibles fósiles.

Al maximizar el uso de energías limpias, los SHI ayudan a mitigar el cambio climático.

- **Flexibilidad y escalabilidad:** Los SHI son flexibles y adaptables a diferentes escalas y necesidades energéticas. Pueden ser implementados en sistemas aislados, como comunidades remotas o islas, así como en sistemas conectados a la red eléctrica. Además, los SHI pueden ser ampliados y adaptados a medida que la demanda energética crece o cambia.

- **Mayor eficiencia energética.** Al combinar múltiples fuentes de energía, los SHI permiten un mayor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles. Por ejemplo: en un sistema híbrido solar-eólico, la generación solar puede ser mayor durante el día, mientras que la generación puede ser más intensa durante la noche. Esto garantiza un suministro constante de energía y una mayor eficiencia en la producción.

A continuación, se ve en la figura 26 el ejemplo de la isla SAMSO en Dinamarca.

The first island to become completely energy self-sufficient in 10 years?

11 ONSHORE WIND TURBINES

1 turbine generates enough electricity to power 630 houses.

The turbines transmit electricity to the mainland when more electricity than the island can consume is generated.



OFFSHORE WIND TURBINES

10 103m high offshore wind turbines constructed in 2003 produce more energy than the island uses for transport



11 1MW onshore wind turbines generate 28,000 MWh, that's more electricity than the island's total consumption and the equivalent of 690,000 gallons of oil.

3 x STRAW FIRED PLANTS

- Tranebjerg
Heats 263 households
- Ballen / Brundy
Heats 232 households
- Onsbjerg
Heats 76 households

SAMSO: ISLAND FACTS

Area: 114 km²
Population: 4,000
Investment: DKK 368 million

SOLAR PLANT

One of the heating plants receives heat from 2500 m² of solar panels. This is combined with a 900 KW wood chip fired boiler.



EXCESS ENERGY

Excess electricity produced from offshore wind farms is invested in new energy projects.

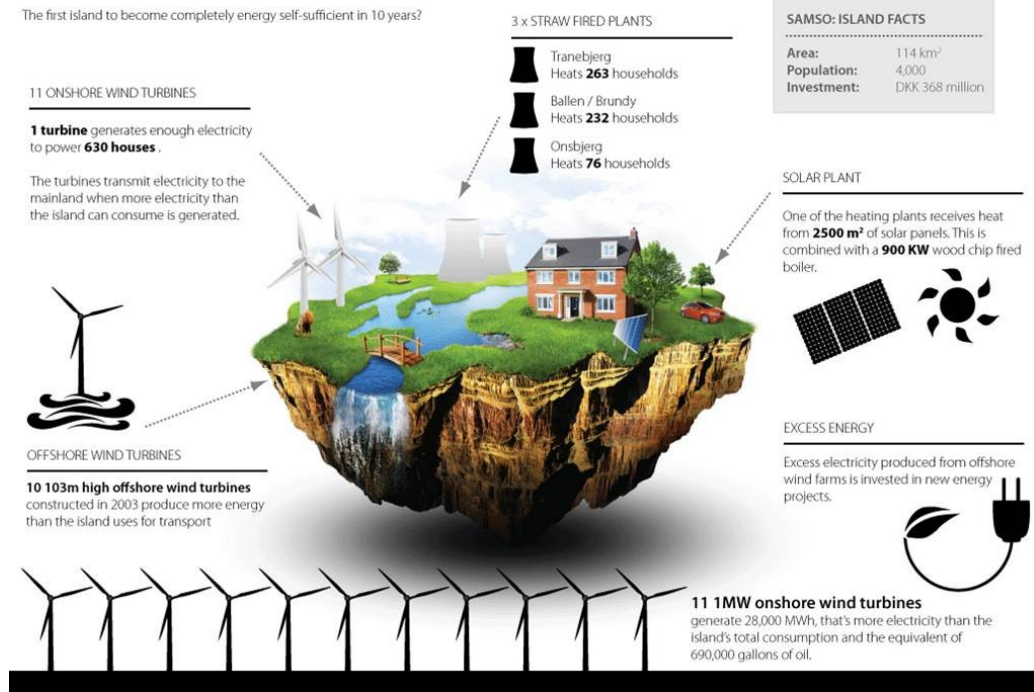


Figura 26. La energía autosuficiente de SAMSO

Fuente: (Gómez, 2019)

SAMSO genera tanta energía que han comenzado a venderla a otros lugares, sus fuentes de autosuficiencia y producción de energía son principalmente tres. En primer lugar, turbinas eólicas, cada una de ellas capaz de abastecer a 630 casas. En segundo lugar, paneles solares, para los cuales la isla ocupa 25 mil metros cuadrados para su instalación, y en tercer lugar calderas de biomasa como grandes hornos que utilizan combustibles naturales para generar calefacción y agua caliente a las viviendas.

En SAMSO, dichas calderas son alimentadas principalmente por grandes fajos de heno que ellos mismos producen. El calor generado es transmitido a un circuito de agua, que es transportada a las diferentes casas. Con este proceso, se cubre el 75% de las necesidades de calefacción de la isla. Por no hablar de que los combustibles utilizados son más sostenibles que la gasolina y mucho más baratos.

2.1.7 Tecnologías de concentración solar

Para construir concentradores reflectores es necesario emplear superficies ópticas de grandes dimensiones. “Los sistemas dióptricos, lentes de cristal, no se utilizan a causa de su fragilidad, peso y precio. Sin embargo, existen colectores constituidos por un gran número de prismas de cristal de reflexión total de pequeño espesor, (sistemas catadióptricos), con un factor de reflexión del 95%; la reflectividad global es del orden del 90%, superior a la de los mejores espejos y no experimentan degradación con el paso del tiempo.” (Rocha, 2016)

Los colectores de concentración utilizan sistemas ópticos reflectores y en algunos casos muy particulares, refractores, para aumentar la intensidad de la radiación solar que se dirige sobre una superficie receptora que la absorbe, (lentes Fresnel y lentes de líquido).

Cuando mayor sea el flujo solar sobre esta superficie, menor será la zona necesaria para conseguir el mismo efecto térmico sobre un fluido, lo que supone una reducción de las pérdidas térmicas.

Sin embargo, aparecen otros tipos de pérdidas como son el que estos colectores funcionan únicamente con la componente directa de la radiación, (no se aprovecha la difusa) y que aparecen pérdidas ópticas por defectos de enfoque y dirección; asimismo aparecen otros problemas, como:

- i. Una mayor complicación de las características ópticas de los concentradores, por cuanto precisan de sistemas de orientación y seguimiento del Sol, que permiten aprovechar al máximo la radiación solar incidente.
- ii. La existencia de flujos no estacionarios en los fluidos que circulan por el receptor.
- iii. Grandes variaciones tanto en la forma y diseño, como en las temperaturas y pérdidas térmicas de las superficies receptoras absorbentes. La amplia gama de configuraciones permite la manipulación de una serie de nuevos parámetros de diseño.
- iv. Una mayor complejidad con la introducción de factores ópticos adicionales, que complican los balances energéticos.

- v. Una mayor calidad en los sistemas ópticos, ya que tienen que trabajar durante largos períodos de tiempo, lo que implica el que deben mantener inalterables sus propiedades ópticas contra la suciedad, erosión, oxidación, condiciones climáticas, etc. (Rocha, 2016)

Todo esto supone un mayor coste del colector lo que introduce algunas restricciones en su utilización, aunque la aplicación de nuevos materiales reflectantes y mejoras en los sistemas de seguimiento, les confieren una cierta importancia práctica. La intensidad de la radiación en las superficies receptoras puede llegar a ser del orden de 4 a 1000 veces el valor de I_0 lo que puede implicar temperaturas relativamente elevadas y una mayor precisión en los mecanismos de seguimiento del Sol y enfoque en la superficie receptora, lo que encarece el equipo.

Un colector reflector de media temperatura se compone de dos partes fundamentales, el concentrador y el receptor. El concentrador es la parte del colector que refleja (o refracta) la radiación solar incidente sobre el mismo, dirigiéndola hacia el receptor, que la absorbe y transmite a un fluido térmico que circula por el mismo. Al ser el Sol la fuente de energía, es muy importante conocer la imagen del mismo reflejada sobre el receptor. El ángulo con el que el Sol se ve desde la Tierra es de aproximadamente 32° y este dato hay que tenerle presente, (aparte de otros propios motivados por errores de seguimiento y reflexión, así como de la dispersión de la radiación por la superficie reflectora originados por defectos de fabricación, etc.), a la hora de diseñar el dimensionamiento, tanto del concentrador, como del receptor.

Tipos de concentradores

Existe una amplia variedad de medios que permiten aumentar el flujo de la radiación solar sobre un receptor pudiéndose clasificar teniendo en cuenta una serie de factores, como:

- El que sean lentes o reflectores.
 - Por el sistema de montaje y modelo de orientación.
 - Por la magnitud de la concentración de radiación que son capaces de conseguir.
 - Por los materiales utilizados en su construcción.
 - Por los fluidos térmicos que se van a utilizar que dependen de sus aplicaciones, etc.
- (Rocha, 2016)

Una característica fundamental de estos colectores es el llamado índice de concentración $\frac{A_a}{A_r}$ que es la relación entre el área de la superficie de abertura del concentrador y el área de la superficie receptora.

En las Figura 27 se muestran tres secciones de sistemas de colectores de concentración; en cualquiera de ellos se enfoca la radiación con más o menos nitidez sobre un receptor que puede ser puntual o tener una geometría determinada por las características del concentrador; el índice de concentración para colectores de revolución es mucho mayor que para colectores cilíndricos.

- a. **Receptor plano y concentrador-reflector plano.** - Tiene un bajo índice de concentración, inferior a 4; se aprovecha en el receptor parte de la componente solar difusa incidente sobre el colector.
- b. **Receptor cilíndrico y concentrador-reflector cónico.** - Se mejoran las características de concentración del caso anterior.
- c. **Receptor cilíndrico y concentrador-reflector esférico.** - Se mejoran las características de concentración de los casos anteriores.
- d. **Concentrador-reflector tipo paraboloides de revolución.** - Permite obtener relaciones de concentración muy elevadas, lo que a su vez implica elevadas temperaturas; una modificación del mismo introduce un segundo reflector que permite llevar al foco a otra posición más conveniente. (Rocha, 2016)

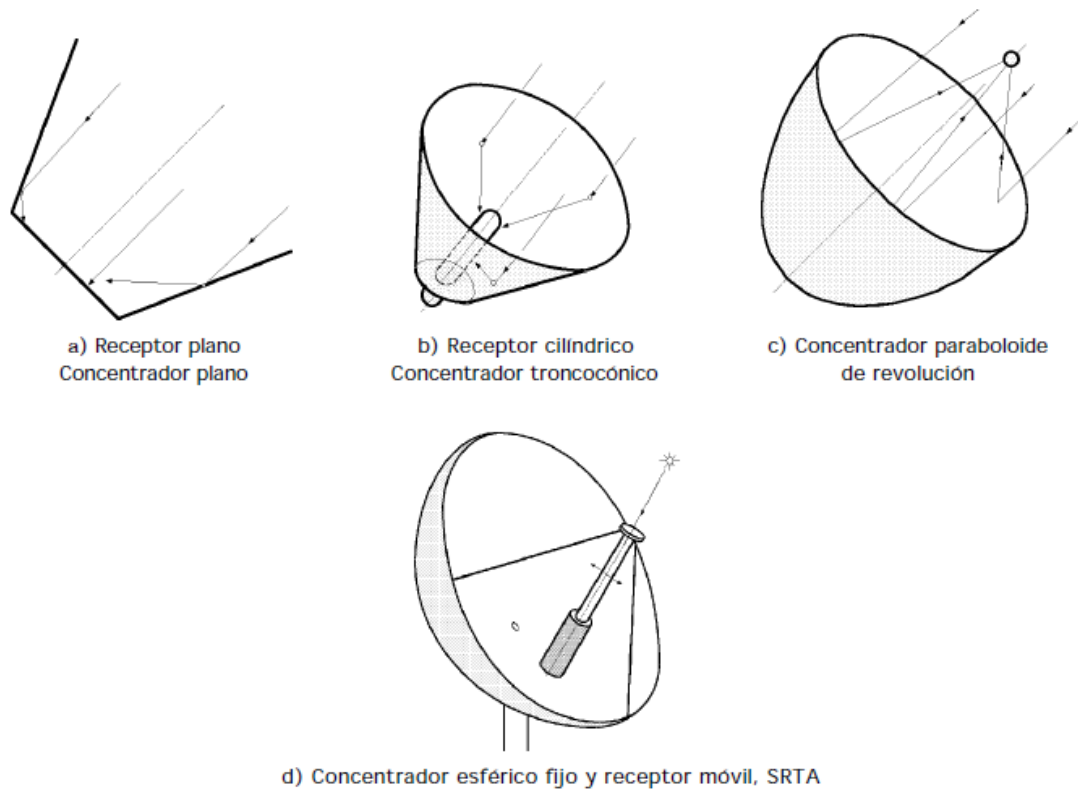


Figura 27. Distintos concentradores con receptores

Fuente: (Loureiro, 2019)

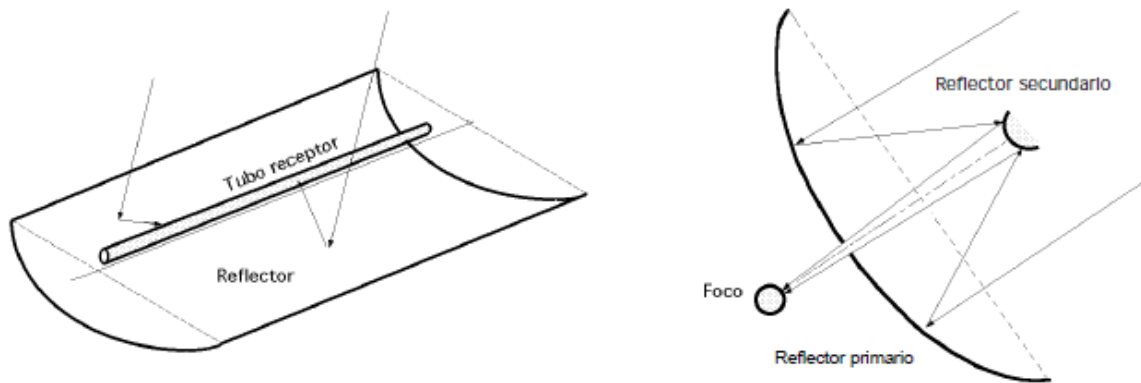


Figura 28. Concentradores cilindro-parabólicos

Fuente: (Loureiro, 2019)

- **Colector con concentrador-reflector cilíndrico parabólico y receptor tubular.** - Es el modelo más usado y en el que el tubo receptor se encuentra a lo largo de todas las posiciones focales. La temperatura alcanzada en el mismo puede llegar a ser del orden de los 300°C, suficiente para muchas aplicaciones.

En la figura 28 del lado izquierdo se representa un concentrador cilíndrico parabólico, y del lado derecho un concentrador cilíndrico parabólico con reflector secundario.

- **Concentrador de reflexión Fresnel y concentrador refractor Fresnel.** - En el reflector Fresnel, Figura 29 inciso a, las superficies pueden ser planas o curvas, estando diseñada cada una para reflejar individualmente la radiación sobre el receptor; su gran ventaja radica en su facilidad de construcción, siendo muy interesante su utilización en colectores solares de gran potencia y alta temperatura. El refractor Fresnel utiliza un sistema de concentración parecido a un montaje de lentes con un punto focal único, Figura 25 inciso b. (Loureiro, 2019)

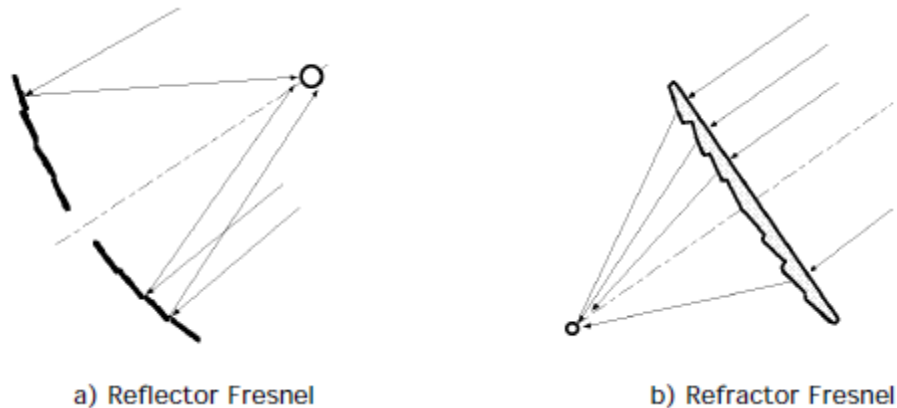


Figura 29. Concentradores tipo Fresnel

Fuente: (Loureiro, 2019)

- **Torre central.** Los sistemas de Torre central conocidos como CRS (Central Receiver System) están constituidos “por cientos o miles de espejos con seguimiento en dos ejes (helióstatos) que reflejan la radiación solar sobre una región focal que se sitúa a una altura suficiente para evitar sombreados entre heliostatos cercanos entre sí. Estos sistemas pueden concentrar la luz solar hasta 600 veces y operar a temperaturas entre los 250°C y 1000°C.” (IER, 2015).

La eficiencia térmica es mayor debido a que el área de pérdida de calor es pequeña comparada con el área de recepción.	Se requiere de un sistema de seguimiento del movimiento aparente del sol, de forma que se intercepte la radiación directa y mejore su eficiencia.
Tienen un impacto ambiental mínimo, cero emisiones contaminantes y cero ruidos durante su operación.	Las superficies reflectivas pueden perder su reflectancia con el tiempo, además requieren limpieza y mantenimiento periódicos.

Fuente: Kalogirou (2004)

De todos los tipos de concentradores antes mencionados nos centraremos en el concentrador parabólico compuesto en el modelo Tolokatzin.

2.1.7.1 Hornos solares Tolokatzin

En 1995 Eduardo Rincón Mejía junto con un equipo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México crearon el primer horno solar Tolokatzin (figura 31). Este horno tiene 8 espejos y puede llegar a un rango de temperaturas entre 120°C y 140°C, aunque con 120°C es suficiente para cocer cualquier alimento, manteniendo sus nutrientes y buen sabor (Rincón, 2008).

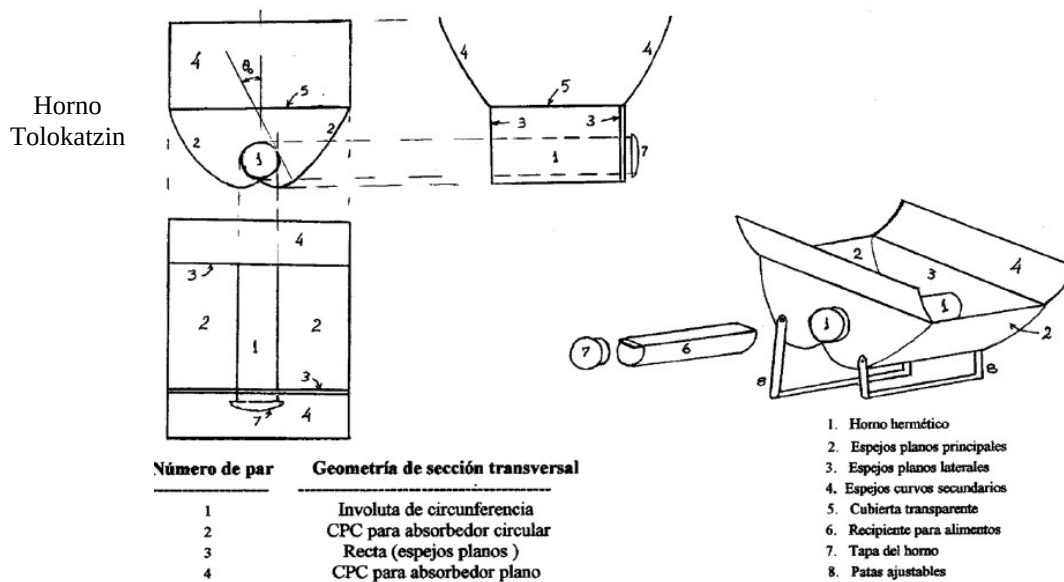


Figura 31.

con

concentrador 3D

Fuente: (Rincón, 2008).

La figura 32 resume la evolución de los concentradores Tolokatzin. En la figura 32A se muestra el diseño original realizado en 1995. Ese consiguió una concentración 3D efectiva con ángulos de aceptación de $\sim 45^\circ$, lo que permitió una operación estacionaria durante 3 horas aproximadamente sin necesidad de ajustar su orientación para seguir el sol, tiempo para cocinar todo tipo de alimentos. La temperatura de funcionamiento bajo irradiancias del orden de 700 W/m^2 era de aproximadamente 120°C , por lo que prácticamente todas las recetas de comida se podían cocinar a tiempo. Con este modelo se prepararon muchas comidas en el campus de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Sin embargo, en algunos días nublados, el tiempo necesario para cocinar era superior a tres horas y algunas comidas no podían cocinarse en un tiempo razonable. Para mejorar el rendimiento de los hornos, el par de espejos parabólicos que también sirven como tapas con bisagras claramente visibles en la figura 32A, fueron sustituidos por dos pares de espejos parabólicos, como se muestra en el modelo Tolokatzin V figura 32B, aumentando en dos el número de espejos. Este cambio mejoró el rendimiento del concentrador solar, pero también aumentó su complejidad.

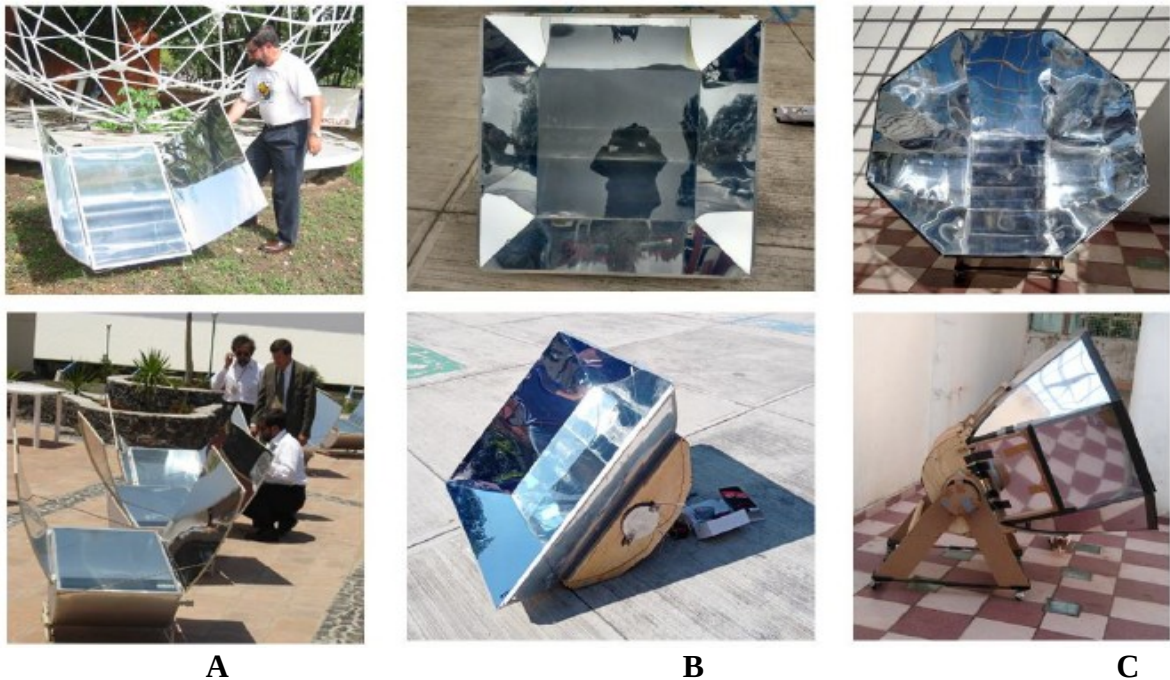


Figura 32. Evolución de concentradores Tolokatzin. A) modelo de 1995 con 8 espejos truncados de curvatura simple para concentración solar 3D; B) Tolokatzin V, con 10 espejos truncados de curvatura simple; C) Tolokatzin 2020 con 10 espejos

Fuente: (Mejia & Mora, 2018)

Tratando de conseguir un rendimiento aún mejor, “para proporcionar un acceso cada vez mayor al flujo luminoso a través de CMC” como dicta la Ley constructiva, el objetivo se centró en:

- a. Aumentar la eficiencia óptica del concentrador reduciendo el número medio de reflexiones de rayos que inciden sobre el absorbente.
- b. Acrecentar la relación de concentración (y por lo tanto la temperatura de estancamiento del absorbente).
- c. Mejorar el aislamiento térmico.

Este procedimiento dio lugar al modelo Tolokatzin 2020 cuyo diseño conceptual se muestra en la figura 32C. Como el diseño anterior (Tolokatzin V), la concentración solar se realiza en dos etapas: la primera realizada mediante una disposición ortogonal de espejos parabólicos de curvatura única óptimamente truncados, y una segunda etapa (sin contribución a la relación de concentración) consistente en una cantidad limitada por un espejo de involuta y dos planos perpendiculares a él, sellados por una doble tapa transparente, como se muestra en la figura 33 inciso B.



Figura 33. Diseño conceptual del Tolokatzin 2020. A) Vista lateral, B) Cavidad del absorbedor, C) Vista isométrica

Fuente: (Mejía, Rincón, & Rubio, 2021)

La primera Etapa tiene un área de aceptación “regular octogonal de longitud lateral L , y un área cuadrada de salida, también de longitud lateral. Con esta construcción la relación geométrica de concentración es: $C_g = 2\sqrt{2}+3$, con un semiángulo de aceptación de $\theta_0 = 15.782^\circ$ que permite una estación estacionaria durante más de 2 horas”. (Mejía, Rincón, & Rubio, 2021).

2.1.8 Concentradores solares en la industria

Dependiendo del rango de temperatura del proceso, se pueden utilizar diferentes tipos de CSMT que se pueden clasificar dos categorías dependiendo del tipo de seguimiento del movimiento aparente del Sol. En la Tabla 3 se indican las tecnologías de captadores solares clasificados por su sistema de seguimiento y rango de temperatura.

Tabla 3. Clasificación de los CSMT empleados comúnmente en calor de procesos industriales

Movimiento	Tipo de captador Solar.	Tipo de Absorbedor	Razón de Concentración.	Rango de Temperatura.
Estacionario	Colector Solar Plano Avanzado.	Plano	1	30-80°C
	Colector de tubo evacuado.	Plano	1	50-200°C
	Colector parabólico Compuesto.	Tubular	1-5	60-240°C
Seguimiento en un solo eje	Colector Tipo Fresnel.	Tubular	10-40	60-250°C
	Colector de Canal Parabólico	Tubular	14-45	60-350°C

Fuente: (S, The potential of solar industrial process heat applications, Applied energy., 2003)

Dentro de los procesos industriales más importantes que utilizan calor a un nivel de temperatura media son: esterilización, pasteurización, secado, hidrólisis, destilación y evaporación, lavado y la limpieza y la polimerización. Algunos de los procesos más importantes y el rango de las temperaturas requeridas para cada una se describen en la Tabla 4. En un sistema solar industrial, la interconexión de los captadores de suministro de energía convencional se debe hacer de una manera compatible con el proceso. La forma más sencilla de lograr esto es mediante el uso de almacenamiento de calor, que también puede permitir que el sistema funcione en períodos de

baja irradiación y por la noche. En la mayoría de las fábricas se utiliza un sistema central de suministro de calor ya sea de agua caliente o vapor a una presión que corresponde a la temperatura más alta que sea necesaria en los diferentes procesos. El agua caliente o vapor a baja presión a temperatura media ($< 150^{\circ}\text{C}$) puede ser utilizado para precalentar otros líquidos que se utiliza para procesos (lavado, teñido, etc.). Muchas veces el uso de sistemas de captadores tiene el inconveniente de realizar un suministro centralizado y es conveniente separar los procesos de manera que los requerimientos energéticos sean realizados de manera individual.

Tabla 4. Demanda de calor por nivel de temperatura y sector industrial

Sector Industrial.	Proceso.	Nivel de Temperatura.
Sector Alimenticio.	Secado.	30 °C – 90 °C
	Lavado.	40 °C – 80°C
	Pasteurizado.	80 °C – 110°C
	Hervir.	95 °C – 105 °C
	Esterilizar.	140 °C – 150 °C
	Tratamiento Térmico.	40 °C – 60°C
Sector Textil.	Lavado.	40 °C – 80 °C
	Blanqueamiento.	60 °C – 100°C
	Tintura.	100 °C – 160°C
Varios Sectores.	Hervir.	95 °C – 105 °C
	Destilar.	110 °C – 300°C
	Sectores de la Industria Química.	120 °C – 180°C
Sector Fotovoltaico.	Laminación de Paneles Solares.	115 °C - 130 °C

Fuente: (Weis Werner, 2005)

En un estudio denominado "ECOHEATCOOL" se informó que el 30% de la demanda de calor industrial, es requerido a temperaturas por debajo de 100°C y 57% a temperaturas por debajo de 400°C . Por otro lado, uno de los objetivos de la Tarea 33/IV, y que finalizó en octubre

de 2007, del programa de calor solar para procesos industriales de la IEA⁵ fue desarrollar, mejorar y optimizar colectores térmico solares para temperaturas que van de 80°C a 250°C (colectores de mediana temperatura). En la Tabla 5 se presenta el estado del arte hasta 2005 en colectores de mediana temperatura.

Tabla 5. Prototipos de colectores de mediana temperatura

NOMBRE.	TIPO DE COLECTOR.	TEMPERATURA DE OPERACIÓN. [°C]	FLUIDO DE TRABAJO.	COSTO.
2AR Flate- Plate Collector.	Colector plano con doble cubierta de vidrio antireflectiva.	80 – 150 $\eta_0 = 0.8$	Agua - glycol	Sin estimación hasta ahora
SHüCO	Colector Plano con doble cubierta de Vidrio.	80 – 150 $\eta_0 = 0.8$	Agua - glycol	2.7 m ² costo € 1195
AoSol	CPC estacionario.	80-110	Agua - glycol	Aprox. 150-200 €/m ²
Solarfocus	CPC	80-120	Agua - glycol	Aprox. 350 €/m ² pequeña escala.
MaReCo	CPC asimétrico.	50-90 $\eta_0 \text{ beam} = 0.60$ $\eta_0 \text{ diffuse} = 0.40$	Agua - glycol	150€/m ²
Parasol	Canal Parabólico.	100-200 $\eta_0 = 0.58$ $\eta = 0.6- 0.4$	Agua o Vapor	Sin estimación hasta ahora.

Fuente: (Weis Werner, 2005)

⁵ Las siglas IEA que significan International Energy Agency.

2.1.9 Configuraciones térmicas

Una instalación solar para producción industrial consiste en un campo de colectores solares a través del cual se hace circular agua o un fluido de trabajo. Para procesos industriales, las tecnologías más apropiadas son los colectores de aire, colectores de agua y colectores de concentración solar.

Los colectores de aire se encuentran principalmente en la industria de los alimentos con aplicaciones de secado. Los sistemas de calentamiento de agua convencionales, de placa plana o de tubos evacuados, también pueden ser utilizados con fines industriales y la gran mayoría de casos utiliza esta tecnología.

Para suministrar temperaturas más elevadas, los colectores de concentración solar resultan una buena opción para el sector industrial, ya que son sistemas mucho más sofisticados y robustos. Ello implica que requieren una mayor inversión inicial, la cual se recupera en periodos aceptables de tiempo, brindando costos competitivos para el suministro de calor en sus operaciones.

Un ejemplo de aplicación de esta tecnología se encuentra en las industrias lecheras de México, Italia e India, en las industrias farmacéuticas de Jordania y Egipto, en la industria textil de Alemania o en la desalinización de agua en California, solo por mencionar algunos proyectos en operación.

De manera esquemática, se muestran a continuación las tecnologías disponibles para generar calor solar aplicado a procesos industriales. La integración de los sistemas solares térmicos a procesos industriales en general puede realizarse de tres formas distintas:

a) Precalentamiento

El agua fría se precalienta en el campo solar y se introduce en un depósito de almacenamiento donde se calienta mediante una caldera de combustible fósil a la temperatura del proceso de producción requerida véase en la figura 34.

Usos

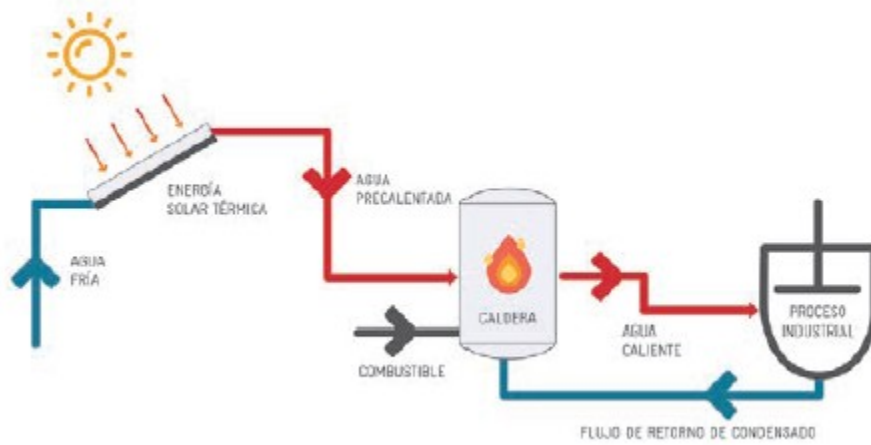


Figura 34. indirectos,

precalentamiento

Fuente: (Ortega H. , 2018)

b) Generación directa de vapor

El agua se evapora parcialmente en los colectores concentradores. El vapor calentado mediante energía solar se separa del agua restante dentro del tambor de vapor antes de ser enviado al proceso industrial o a la red de vapor de la fábrica. El condensado tratado, también llamado agua de alimentación, se envía de nuevo al campo de colectores. Otra opción es la generación de vapor indirecta. En este caso, el campo de colectores calienta el agua o el aceite térmico en un circuito cerrado para generar vapor mediante un intercambiador de calor como en la figura 35.



Figura 35. Sistema solar que suministra calor directamente a un proceso industrial

Fuente: (Ortega H. , 2018)

c) Calentamiento de procesos

El campo solar proporciona calor a una determinada temperatura para mantener la temperatura de un baño o un proceso de separación térmica. Se suministra calor adicional al proceso de producción mediante una caldera de combustible fósil. Ambos circuitos están cerrados de manera que el agua enfriada vuelve al campo de colectores o a la caldera respectivamente. Véase la figura 36.

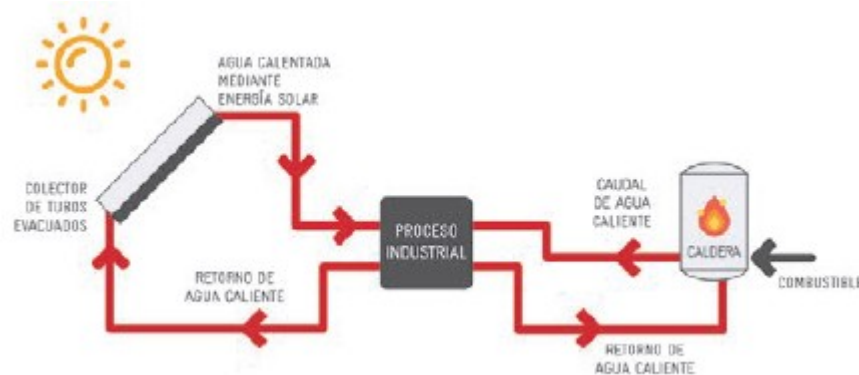


Figura 36.

Sistema solar que suministra calor directamente a un proceso industrial

Fuente: (Ortega H. , 2018)

2.1.10 Concentrador parabólico compuesto

La óptica anidólica u óptica sin imagen surge a mediados de 1960 como resultado de los desarrollos llevados a cabo de forma independiente por Baranov en la URSS, Ploke en Alemania y Winston en EE. UU., con el desarrollo del concentrador parabólico compuesto (CPC).

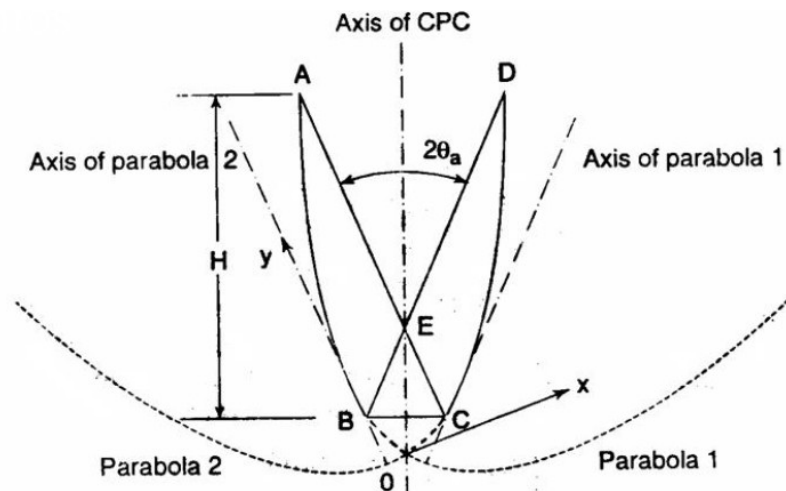


Figura 37. Concentrador parabólico compuesto con absorbedor plano

Fuente: (Mejía, Rincón, & Rubio, 2021)

Hoy en día existe un amplio desarrollo de CPC para aplicaciones solares, y se han generado varias geometrías que aprovechan la óptica sin imagen para concentrar la energía solar en receptores de diferentes “formas (circular, cuadrado, triangular, cuña, plano, elíptico). La figura 38 muestra cuatro diseños típicos de CPC. Todas estas geometrías se han utilizado para diferentes propósitos, como energía fotovoltaica, calefacción y refrigeración solar, cocina solar, destilación solar, entre otros.” (Mora & Mejía, 2023).

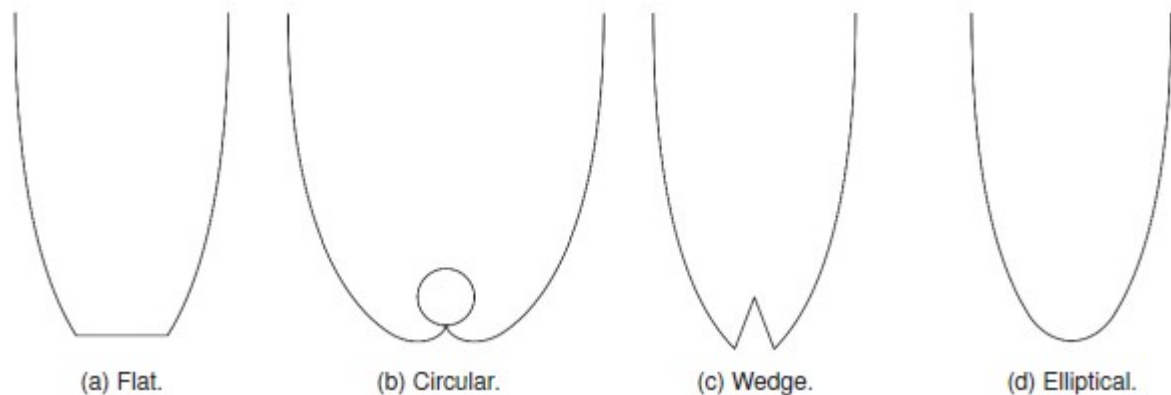


Figura 38. Diferentes receptores de CPCs

Fuente: (Mora & Mejía, 2023)

Los colectores parabólicos compuestos (CPC) están formados por espejos diseñados para redistribuir la radiación solar, tanto difusa como directa, en un área localizada. La geometría del concentrador depende de varios parámetros para aumentar el aprovechamiento de la radiación.

Inicialmente, los CPC fueron ideados para aplicaciones de detección de radiación “Cherenkov en física de altas energías, sin embargo, debido a sus características, su uso se ha extendido a diferentes sectores como el solar para distintos tipos de procesos industriales.” (Mejía & Mora, 2018).

Para proponer un prototipo funcional, es necesario realizar una propuesta validada mediante modelos teóricos con el fin de asegurar las condiciones térmicas que permitan aportar lo más que sea posible al calentamiento de la plancha calefactora de manera que el sistema híbrido sea eficiente.

El principal objetivo de la óptica anidólica es la transferencia de radiación de forma eficiente y controlada, por lo que este tipo de óptica se utiliza para el diseño de concentradores e iluminadores. Hay dos aspectos fundamentales en el diseño de concentradores para el área solar, uno es maximizar la transferencia de flujo y el otro es crear distribuciones controladas de la irradiancia.

El parámetro más importante de un concentrador solar es el coeficiente de concentración, que permite relacionar directamente la cantidad de energía que será redirigida al receptor. Considerando la Figura 39, que muestra un concentrador solar genérico que permite recoger el flujo de energía solar sobre una zona de captación o apertura concentrándolo en otra superficie de menor tamaño, denominada receptor o salida. El coeficiente de concentración geométrico se define en la ecuación 1 donde se define el semiángulo de aceptación, dentro del cual la luz es captada en el área de apertura y redirigida al receptor. Se dice que la radiación se recibe a través de un ángulo de aceptación porque la radiación incidente dentro de este ángulo llega al receptor después de atravesar el área de apertura.

Según la segunda ley de la termodinámica y la ley de Stefan – Boltzmann (o mediante el concepto de *conservación etendue*), la concentración máxima ideal de un concentrador solar se puede determinar con facilidad. El valor máximo que puede alcanzar un concentrador solar es utilizando espejos curvos. Aunque el coeficiente de concentración geométrico para los CPC alcanza teóricamente el límite termodinámico máximo, los CPC están diseñados para aplicaciones de baja concentración que tienen valores entre diferentes rangos de temperatura en el receptor.

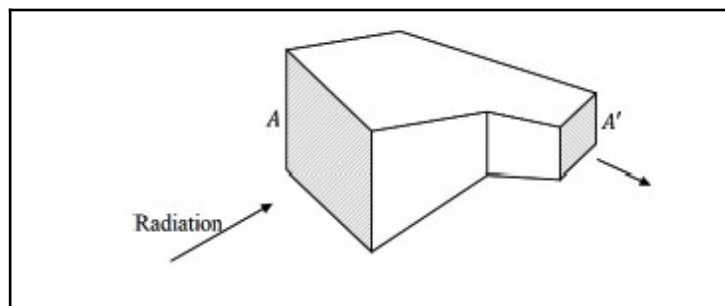


Figura 39. Diagrama Esquemático de un concentrador

Fuente: (Mora & Mejía, 2023)

Muy idealmente, considerando solo la radiación como fenómeno de transporte, la temperatura que se puede alcanzar con un concentrador solar se puede relacionar con la concentración del dispositivo a través de:

$$t_r \propto \left(\frac{C_g}{C_{g,max}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

Independientemente del tipo de receptor que pueda tener el CPC, los rayos que ingresan al concentrador con un semiángulo de máxima aceptación (rayos extremos) deben de ser reflejados por el espejo de manera que lleguen tangencialmente al receptor, mientras que todos los rayos que ingresan con un ángulo menor al semiángulo máximo (es decir, dentro del ángulo de aceptación angular total), son dirigidos al receptor luego de pasar por la óptica interna del CPC (reflexión o refracción). La descripción para un CPC con receptor cilíndrico se obtiene para los ejes coordenados, cuya superficie reflectante se genera considerando la característica de que todo rayo ingresa dentro del ángulo de aceptación angular es interceptado por el receptor, pero si los rayos de luz entran paralelos al eje focal, en cualquier punto donde incida el rayo de luz, la normal al reflector biseca el ángulo entrante entre la tangente y el receptor que lo atraviesa, y el rayo incidente.

Tomando en consideración lo anterior, la geometría de los espejos para el CPC con receptor circular de radio está formada por dos curvas simétricas, como se muestra en la figura 40.



Figura 40. Geometría del CPC con receptor circular

Fuente: (Mora & Mejía, 2023)

Criterio de truncamiento

En la práctica es común truncar la altura del CPC a un ángulo establecido con el fin de ahorrar material, en la actualidad existen varios criterios y metodologías para truncar el CPC-2D, varios autores, basados en los trabajos descritos.

Con el empleo de la Ley Constructal, se ha demostrado que el ángulo óptimo de truncamiento, además de favorecer la transferencia de la energía solar hacia el absorbedor, disminuye la altura de los CPCs, así como la cantidad de reflector a emplear. Además, debido a haber optimizado el ángulo de truncamiento, el número de reflexiones promedio disminuye considerablemente, lo que repercute de manera directa en una mayor cantidad de potencia térmica que logra llegar al absorbedor.

La evolución, aplicando la Ley Constructal en el refinamiento del diseño de los concentradores Tolokatsin, que toma como principio de diseño el truncamiento óptimo de los sistemas, lleva a rendimientos cada vez más altos, como debe ocurrir en toda tecnología para el aprovechamiento energético. “El diseño insignia, horno solar, ha sido el sistema que más ha evolucionado en 30 años de mejora continua. Los demás diseños para diferentes aplicaciones, como el esterilizador o el sistema de tratamiento de aguas residuales, no han sido modificados debido a que de las experiencias en la operación de los hornos se han acoplado desde la concepción de estos sistemas para operar en las condiciones más eficientes.” (E., E.A, & D., 2020).

Ley constructal de Bejan

La ley constructal de Bejan establece que “para que un sistema de flujo de tamaño finito persista en el tiempo, debe evolucionar de tal manera que proporcione un acceso cada vez mayor a las corrientes que fluyen a través de él” (Bejan,2016).

Tras la afirmación de Bejan, la ley constructiva ha sido aplicada a diversos sistemas de ingeniería, la ley constructiva ha sido aplicada a diversos sistemas de ingeniería (Rocha et al., 2012) y más recientemente en sistemas de energías renovables. En algunas de estas investigaciones se establecieron las configuraciones que deben de tener los elementos involucrados para obtener la configuración más adecuada para favorecer los flujos involucrados.

En el caso de los concentradores solares multicompuestos, que claramente pertenecen a dispositivos basados en ópticas sin imágenes, los flujos están formados por luz solar concentrada. Si bien el primer diseño de los hornos Tolokatzin realizado hace más de 25 años parecía optimizado al lograr una concentración solar 3D a partir de espejos de simple curvatura que permitan un gran rendimiento, según la teoría constructiva el diseño siempre estaría sujeto hacia la mejora (no existe un óptimo absoluto, ¡Porque lo óptimo evoluciona con el tiempo!) “Donde quiera que miremos, lo que vemos está evolucionando porque es libre de moverse y transformarse. Sin libertad para cambiar, no hay nada. No hay diseño, no evolución y, por lo tanto, lo hay futuro” (Bejan, 2020).

2.1.11 Calor industrial

En particular, el sector industrial demanda grandes cantidades de energía, dos terceras partes son en forma de calor.

Asociado a la demanda de calor, este sector enfrenta importantes retos económicos, como el incremento del precio de los combustibles fósiles y su volatilidad en los mercados internacionales que impacta en la estabilidad del costo del suministro de energía.

El amplio espectro de ramas y subramas del sector industrial puede ser categorizado de acuerdo con la intensidad en su consumo de energía, de tal manera existen empresas energéticamente intensivas y las de consumo moderado o no intensivas. El uso de la energía en el sector industrial es ampliamente variado, sin embargo, se puede categorizar en dos grandes clasificaciones, uso eléctrico y térmico. El 74% de la energía es utilizada para generar calor de proceso, a través del uso de combustibles fósiles principalmente.

De la demanda de calor en la “industria⁴, casi la mitad (48%) es requerida para calor de alta temperatura (más de 40 °C) principalmente en las industrias intensivas, el 22% se utiliza para calor de media temperatura (150 a 400 °C) y el restante 30% se destina a calor de baja temperatura (menos de 150 °C).” (Ortega H. , 2018)

2.1.11.1 Panorama en el mundo

La energía requerida para calentamiento y refrigeración representa el 51% del consumo total final de energía en el mundo, siendo este una de las principales fuentes de emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) seguida del sector transporte y en tercer lugar la generación de electricidad.

Dicho consumo de energía se divide casi por partes iguales entre el calor para procesos industriales y el calor para edificaciones como se puede ver en la figura 41.

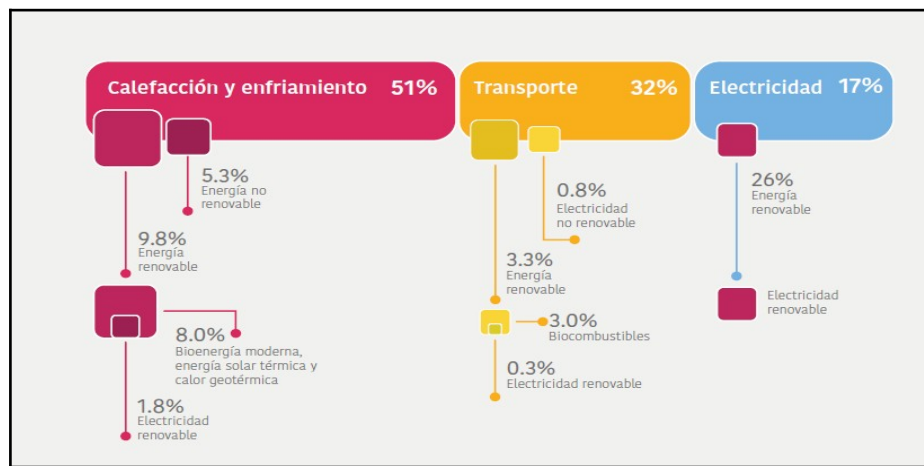


Figura 41. Energía renovable en el consumo final total de energía por sector final

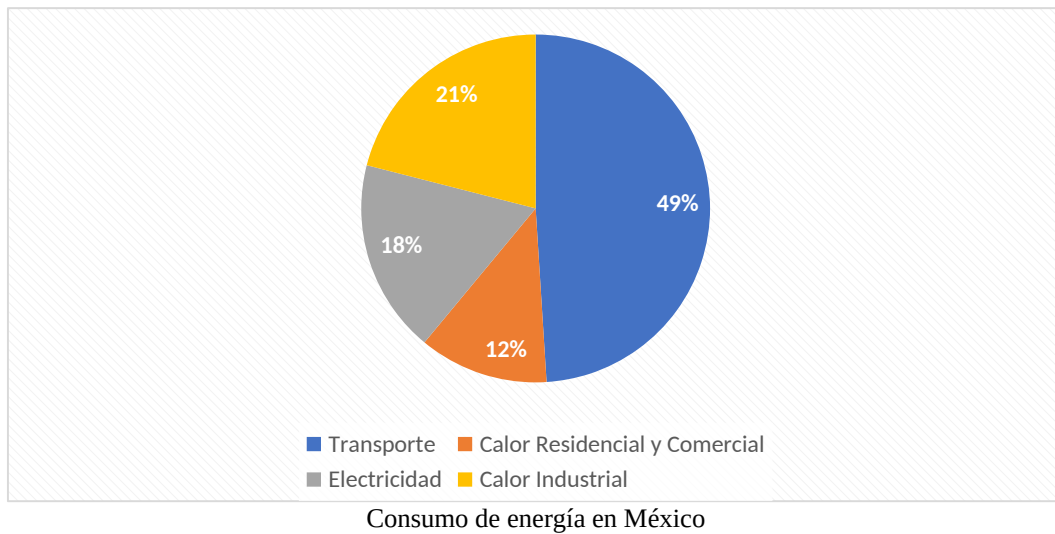
Fuente: (Sánchez & Torres, 2020)

2.1.11.2 Panorama en México

En México, la situación es similar que en el resto mundo, ya que el uso de energía en forma de calor representa alrededor del 33% del consumo final de energía en todo el país; así como una contribución importante a las emisiones de GEI por parte de México como se puede ver en la figura 42.

42.

Figura



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 43 durante los últimos 8 años el consumo de energía para la generación de calor ha crecido a un ritmo de 2.84 % anual, esto impulsado principalmente por el crecimiento del sector industrial.

La generación de calor a partir de fuentes renovables de energía en el país se lleva a cabo principalmente por el uso de biomasa tradicional (quema de leña) en el sector residencial y una menor participación de uso de bagazo de caña en el sector industrial. El aprovechamiento de tecnologías de energía solar para generación de calor ha aumentado su volumen de participación de 2 petajoules en el año 2010 a 10 petajoules en el año 2017, impulsadas por las políticas de apoyo a la vivienda de interés social más eficientes energéticamente fomentando el uso de calentadores solares de agua.

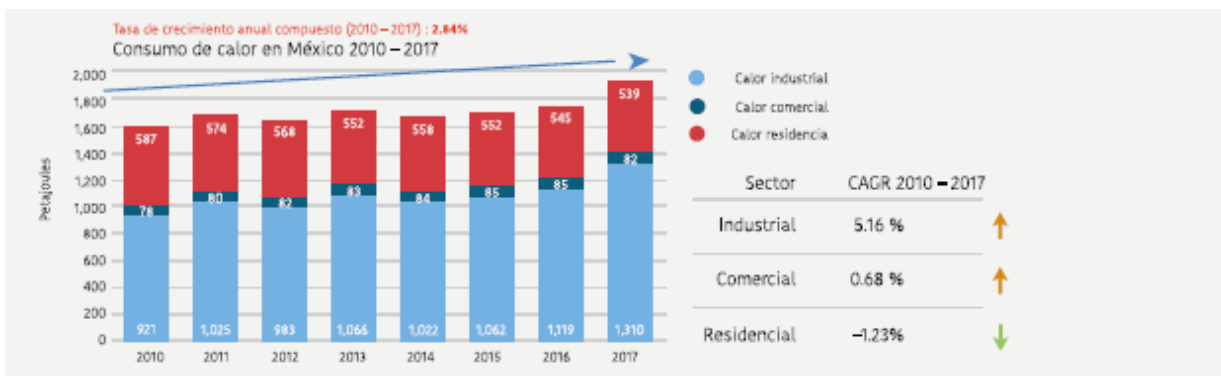


Figura 43. Evolución del consumo de energía para generación de calor en México 2010-2017 por sector

Fuente: (Sánchez & Torres, 2020)

2.1.12 Fluidos caloportadores

La tecnología termosolar utiliza principios muy sencillos en el cual el calor es absorbido por un fluido térmico que es esencial para el óptimo funcionamiento del sistema térmico, este fluido caloportador (HFT, Heat Transfer Fluid) el cual se suele calentar a diferentes temperaturas variando conforme al fluido y transporta el calor generado a través de un intercambiador de calor para contribuir a el calentamiento para cumplir algún proceso en específico, en este caso el calentamiento de una plancha para unificar térmicamente las partes de un módulo fotovoltaico. En la figura 44 se puede ver un sistema de concentración solar que por medio de radiación direccional los fotones para calentar el fluido en cuestión teniendo un almacenamiento de este fluido a una temperatura objetivo de 393° C llevado por un sistema de intercambiadores para producir vapor sobrecalentado que se emplea en una turbina de bloque para producir energía mecánica y a partir de un generador eléctrico, electricidad. En periodos de radiación solar baja, se emplean calderas auxiliares donde el fluido es calentado por medio de sistemas de combustión de gas.

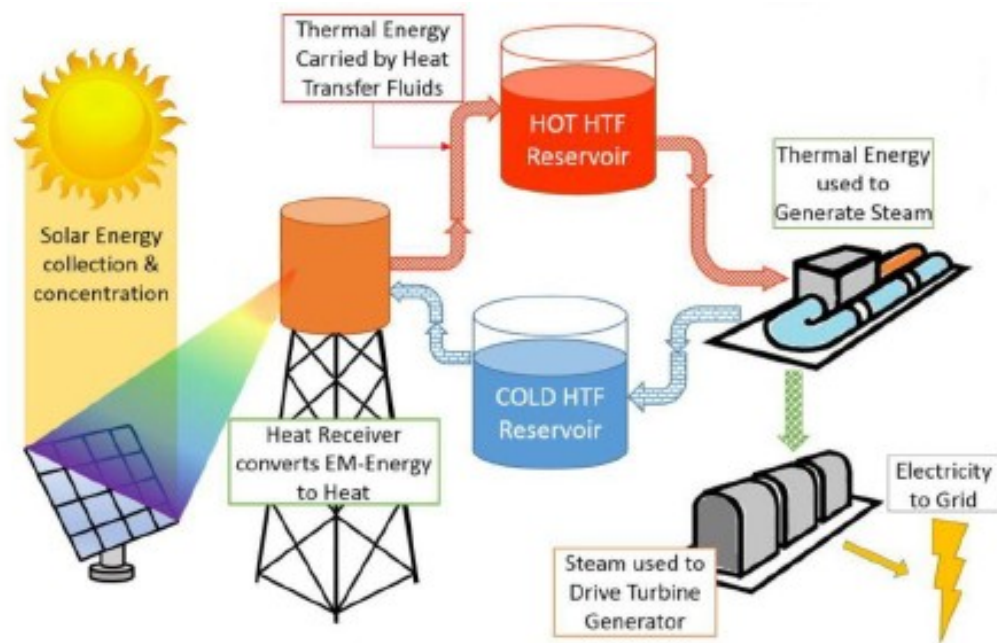


Figura 44. Esquema planta termosolar

Para fines del desarrollo de nuestro sistema híbrido se necesita seleccionar el fluido adecuado para tener un sistema con eficiencia energética que transportan por medio de un sistema de transmisión de calor esa energía térmica desde el punto de captación y transmite el calor recibido al subsistema de intercambio, comúnmente este tipo de fluidos trabajan en un circuito cerrado de manera que el calor cedido por el fluido vuelve al captador para reiniciar el ciclo.

Variables a considerar del HTF

Existen diversas características del fluido caloportador a tomar en cuenta sabiendo el proceso al cual va a trabajarse como son:

- Bajo punto de fusión y alto de ebullición que permita un amplio rango de temperatura de trabajo maximizando la eficiencia del ciclo.
- Baja presión de trabajo, para que no sean necesarios equipos de presurización.
- Elevada conductividad térmica a fin de mejorar la transferencia de calor entre los equipos de intercambio y reducir los gradientes de temperatura.
- Estabilidad térmica que evite el deterioro fisicoquímico de los componentes y evite el contacto con el oxígeno en caso de un fluido inflamable.
- Baja viscosidad en todo el rango de trabajo, reduciendo las pérdidas de carga y el tamaño de los equipos de bombeo. Además, favorece el arranque de la planta a temperatura ambiente, por lo que no es necesario equipos de precalentamiento.
- Baja toxicidad, de forma que minimice daños sobre el personal de mantenimiento.
- Bajo impacto ambiental.
- Alta densidad de energía, de esta forma se maximiza la cantidad de energía térmica almacenada por unidad de volumen reduciendo así el espacio necesario para la instalación.
- Baja corrosión a los elementos del sistema, especialmente con las aleaciones que se utilicen para contener el HTF.
- Bajo coste, tanto de adquisición como de mantenimiento.

- Pérdidas térmicas bajas.

Por los puntos antes mencionados es importante seleccionar el fluido adecuado que puede ser almacenado térmico (TES, Thermal Energy Storage) ya que esta puede resultar una alternativa económica para hibridar sistemas.

Hoy en día, los fluidos caloportadores más usados en la industria térmica son el aire, agua/vapor, aceites térmicos, sales fundidas y metales líquidos; que en mayor o menor medida cumplen los requisitos anteriormente mencionados.

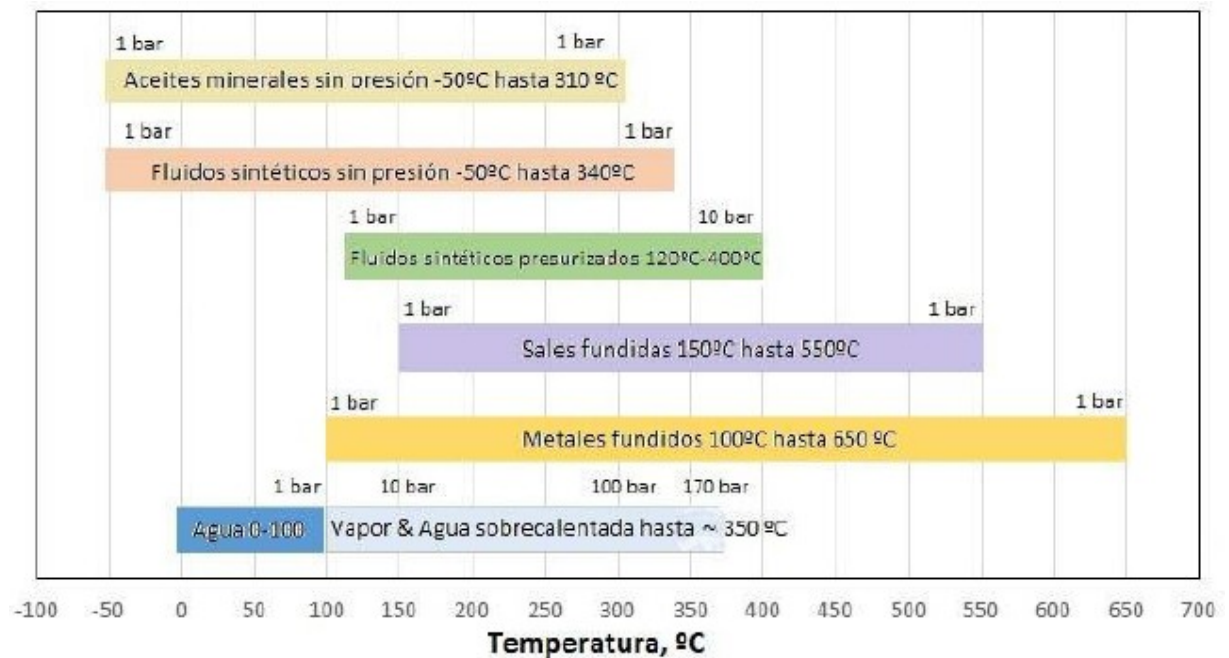


Figura 45. Rangos de temperatura de distintos fluidos

Fuente: (Jiménez, 2022)

En la figura 45 podemos darnos cuenta de que existen diversidad de fluidos para distintas condiciones de proceso, además de ver los rangos de temperatura y presión de fluidos para aplicaciones en la industria.

Algunas otras propiedades del HTF son: temperatura de fusión y congelación, temperatura de degradación, estabilidad térmica, densidad, calor específico, conductividad térmica, viscosidad y presión de vapor.

También existen parámetros adimensionales que garantizan el fluido del flujo en el interior del circuito, mediante estos es posible establecer si es laminar o turbulento, la eficiencia de la transferencia de calor o el crecimiento de las capas límite térmica o hidrodinámicas estos son:

Número de Prandtl

El número de Prandtl es un número adimensional que relaciona los espesores de las capas límite cinética y térmica del fluido. Es decir, mide la efectividad relativa del transporte de momento con respecto al transporte de la energía por difusión (difusividad térmica). Cuando Pr es pequeño significa que el calor difunde muy rápido comparado con la velocidad (momento) y se define como en la ecuación 2:

$$Pr = \frac{\text{velocidad de la cantidad de movimiento}}{\text{velocidad de la difusión del calor}} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2)$$

El mercurio tiene una conducción de calor efectiva comparada con la velocidad por lo que su Pr es más bajo que el de los aceites, los metales líquidos poseen números muy bajos, los gases tienen valores próximos a 1 esto significa que el momento y el calor se disipan a la misma velocidad en el fluido y los valores más altos corresponden a los aceites llegando hasta valores de 100,000.

Número de Reynolds

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión del flujo del fluido para establecer una relación entre las fuerzas convectivas y las viscosas presentes en el fluido. Determina si el flujo es laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). Representada en la ecuación 3:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas convectivas}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{\rho v \delta}{\mu} \quad (3)$$

Indicando la viscosidad si este valor es mayor menor será la importancia de la viscosidad y viceversa.

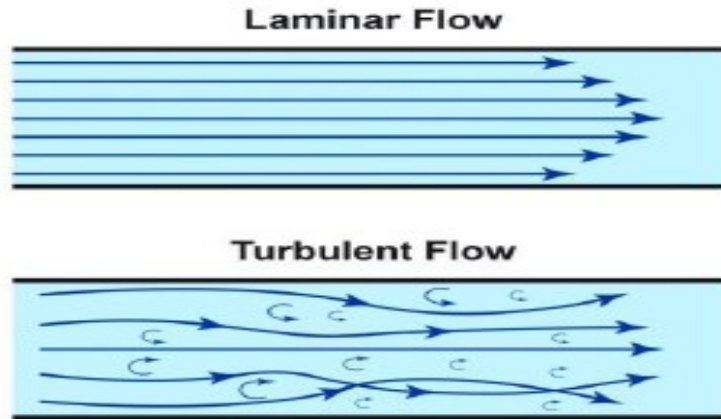


Figura 46. Regímenes de fluido en conductos

Fuente: (Jiménez, 2022)

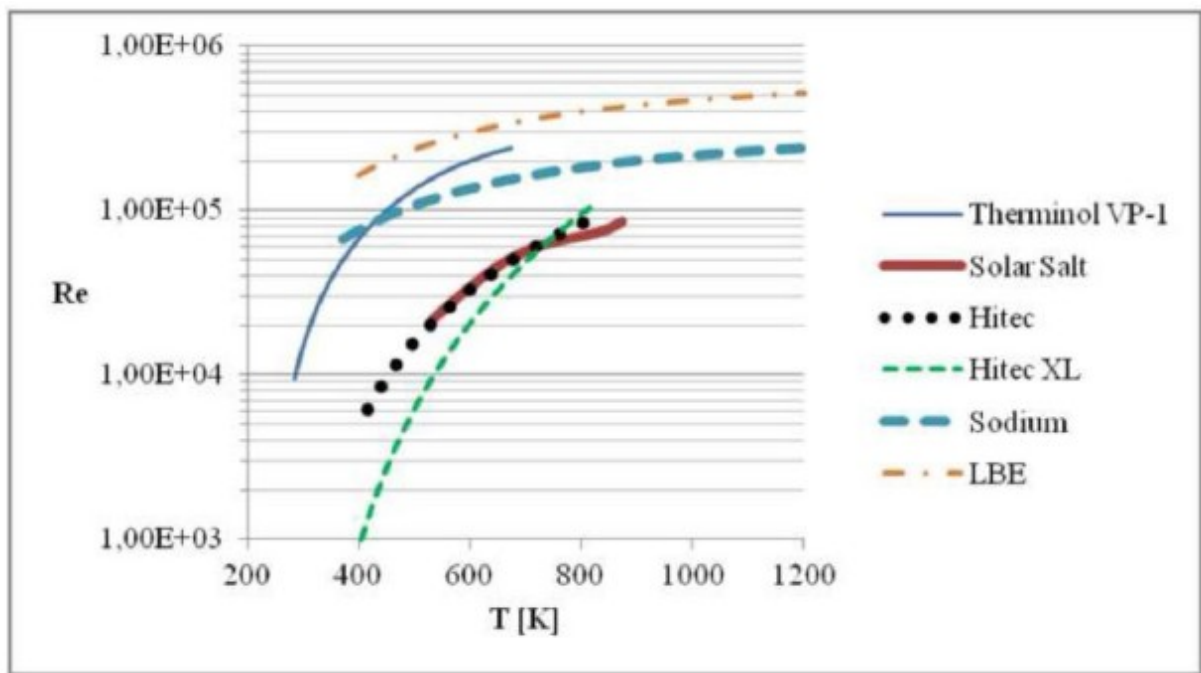


Figura 47. Número de Reynolds de distintos fluidos caloportadores en función de la temperatura de trabajo

Fuente: (Jiménez, 2022)

Número de Nusselt

Este número adimensional mide el aumento de transferencia de calor por convección desde una superficie por la que discurre un fluido en comparación con la transferencia de calor si se diese solo por conducción. Establecido en la ecuación 4.

$$\text{Nu} = \frac{\text{transferencia de calor por convección}}{\text{transferencia de calor por conducción}} = \frac{hL}{k} \quad (4)$$

Dónde la k es la conductividad térmica del fluido, la L es la longitud característica y la h el coeficiente de transferencia de calor. Por tanto, el número de Nusselt representa la mejora de transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección relativa a la conducción a través de la capa del propio fluido.

Selección del fluido caloportador

Conociendo los fluidos que existen en general, el que sería el adecuado para transportar ese calor tendría que estar dentro del rango de temperaturas de trabajo desde nuestro tubo absorbedor del concentrador y a través del serpentín de cobre calentando de manera eficiente nuestra plancha del laminador hasta 135 °C para un curado de EVA óptimo.

El agua, por su abundancia y elevada conductividad térmica, es el fluido caloportador más utilizado en aplicaciones con rangos de temperaturas relativamente bajos, pues la elevada presión de vapor que posee al superar su temperatura de ebullición limita su uso. Por supuesto no es tóxico, lo que no supone ningún riesgo de explosión o incendio ni medioambiental. Sin embargo, su utilización está limitada por su temperatura de vaporización, 100°C, ya que para temperaturas mayores sería necesario elevar la presión de trabajo de la instalación para mantener el agua en estado líquido, agua sobrecalentada, presurizando por tanto el circuito y elevando los costes considerablemente. El tradicional uso del vapor y agua sobrecalentada queda limitado por su temperatura máxima de ebullición y como se ha mencionado anteriormente, la alta presión que se requiere en el circuito para poder mantener el fluido en la fase líquida (tuberías y otros equipos de gran espesor que elevan el coste). A partir de esos valores se hace uso de los aceites térmicos (minerales, sintéticos o con base de silicona), entre los que destacan Therminol VP-1, Dowtherm A o Helisol 5A, capaces de operar a presiones de vapor cercanas a la atmosférica a temperaturas de hasta 400°C. Por lo que alguno de estos aceites nos podría servir para nuestro objetivo.

2.1.13 Intercambiadores de calor

Se pueden diferenciar una gran cantidad de criterios para clasificar los equipos de transferencia de calor, pero las más comunes son las que a continuación se enuncian:

- Clasificación según la trayectoria de los fluidos.
- Clasificación según la forma en que el calor es transferido.
- Clasificación según la aplicación.
- Clasificación según características de construcción.
- Clasificación según el número de fluidos involucrados.

Los intercambiadores son frecuentemente caracterizados por características de construcción. Los cuatro principales tipos de construcción son:

- ✓ Intercambiadores de calor tubulares.
 - ✓ Intercambiadores de calor de placas.
 - ✓ Intercambiadores de calor de casco y tubos.
 - ✓ Intercambiadores de calor tipo tubo espiral.
- Intercambiadores de calor tubular: Este intercambiador es generalmente construido por tubos circulares, elípticos, rectangulares, redondos y planas.

Existe una considerable flexibilidad en el diseño, porque la geometría puede variar fácilmente cambiando el tubo de diámetro, posición y longitud. Este intercambiador de calor es diseñado para presiones relativamente altas. Se utilizan principalmente líquido-líquido y líquidos con cambios de fase (condensación y evaporación). Se utilizan para gas-líquido y gas-gas en las aplicaciones de transferencia de calor en las que la temperatura y presión de funcionamiento son muy altas. (labat, 2018)



Figura 48. Intercambiador tubular

Fuente: (Lavati, 2018)

2.1.14 Fabricación de módulos fotovoltaicos

La fabricación de paneles solares o módulos fotovoltaicos empieza desde la selección del silicio purificado y termina con el montaje del marco, con las pruebas de calidad que se deben hacer durante y al final de los procesos para garantizar que el panel funcione de acuerdo con las normativas y concuerden con las especificaciones técnicas esto se puede observar en la figura 49.

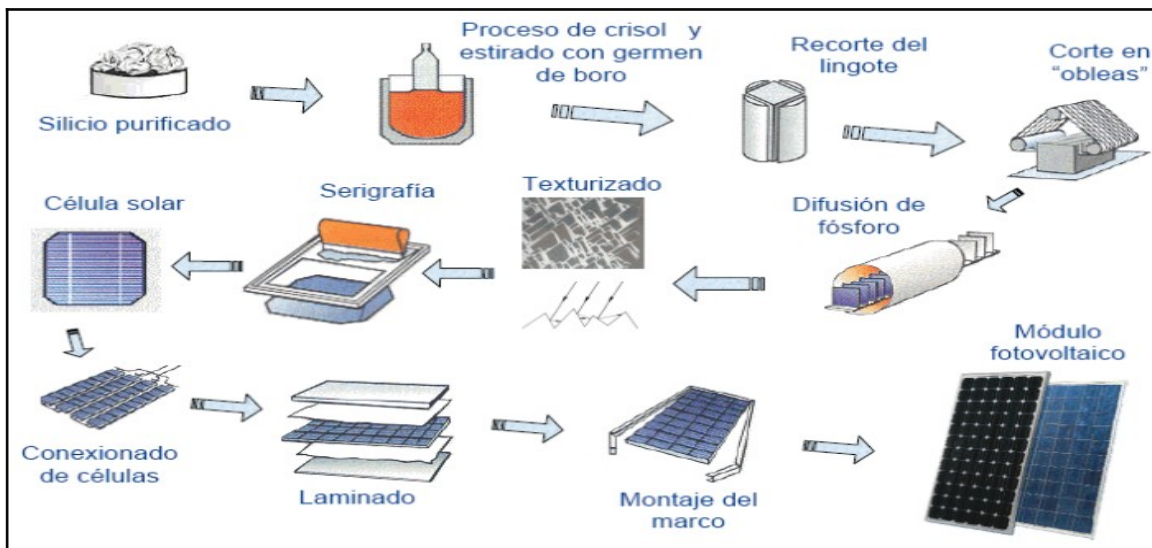


Figura 49. Fabricación de módulos fotovoltaicos

Fuente:(Cuytronic, 2017)

2.1.14.1 Elementos del módulo fotovoltaico

Para el ensamble de dichos paneles solares se necesitan de distintos elementos que lo conforman, estos son:

- **Vidrio templado**

El vidrio utilizado en la fabricación de un panel solar no es un vidrio cualquiera. Es un vidrio especial ultrapuro con bajo contenido en hierro, especialmente diseñado para reflejar menos y dejar pasar la mayor cantidad de luz. Es un vidrio templado especial de 3,2 mm o 4 mm recubierto con una sustancia antirreflejante. (Dk solarenergy, 2022)

- **EVA (Etilen Vinil Acetato)**

Es un termoplástico con las siguientes características:

- 1) Excelente durabilidad, como resistencia a la intemperie, alta temperatura y resistencia a la humedad, resistencia a la luz UV.
- 2) Excelente adhesión al vidrio, metal y plásticos PET, TPT manteniendo la adhesión a largo plazo.
- 3) Excelente luz y transmitancia y transparencia.
- 4) Inactivación e inocuidad en la célula solar durante el procesamiento.
- 5) Tener una alta tasa de reticulación después de la laminación.
- 6) Buena propiedad de encapsulación. (Dk solarenergy, 2022)

- **Ribbon (BUSSBAR)**

Las células solares de silicio están metalizadas con delgadas tiras de forma rectangular impresas en los lados frontal y posterior de una célula solar fotovoltaica.

Estos contactos metálicos se denominan barras colectoras y tienen un propósito importante, que es conducir la corriente continua generada por la célula solar fotovoltaica.

Con frecuencia, las barras colectoras de células solares están construidas de cobre, recubiertas con plata. El revestimiento plateado es necesario para mejorar la conductividad actual (lado frontal) así como para reducir la oxidación (lado posterior). (Dk solarenergy, 2022)

- **Dedos de células solares (Fingers)**

Perpendiculares a las barras colectoras están los dedos de rejilla metálicos y más delgados, también llamados dedos de celdas solares, que recolectan la corriente generada para su entrega a las barras colectoras. Estos contactos, las barras colectoras y los dedos, se imprimen en la superficie de la célula solar fotovoltaica mediante una tecnología llamada serigrafía. (DS NEW ENERGY, 2019)

- **Backsheet.**

Las láminas traseras son un componente menos visible de los paneles solares pero esenciales para su rendimiento a largo plazo. Las láminas traseras protegen los paneles solares contra el daño ambiental y aseguran que los paneles permanezcan eléctricamente aislados. La falla de la lámina posterior puede provocar pérdida de energía y problemas de seguridad, y el impacto puede ser significativo, desde la degradación de la energía y daño total al panel fotovoltaico. (Dk solarenergy, 2022)

- **Caja de conexiones.**

La caja de conexiones es un “gabinete” que se encuentra en la parte posterior del panel solar donde las cadenas de células, o strings están conectadas eléctricamente. La caja de conexiones (o caja de empalmes) está pegada a la parte posterior del panel solar con adhesivo de silicona o una cinta especial de doble cara. Tiene diodos de baipás en su interior que garantizarán la seguridad y el correcto funcionamiento del panel solar. (Dk solarenergy, 2022)

- **Marcos de aluminio.**

Los marcos de aluminio anodizado es el último elemento por ensamblar y tiene las siguientes características:

- Sirve a manera de aislante eléctrico.
- Permite que los perfiles tratados tengan un mayor nivel de resistencia y durabilidad.
- Cuenta con una capa protectora, la cual tiene una elevada resistencia frente a la corrosión.
- Resulta muy apropiado en aquellas áreas expuestas a climas adversos.
- Mientras mayor sea el grosor del óxido, el nivel de protección que ofrecerá ante los agentes atmosféricos será más grande. (Dk solarenergy, 2022)

- Ofrece gran resistencia frente a las abrasiones

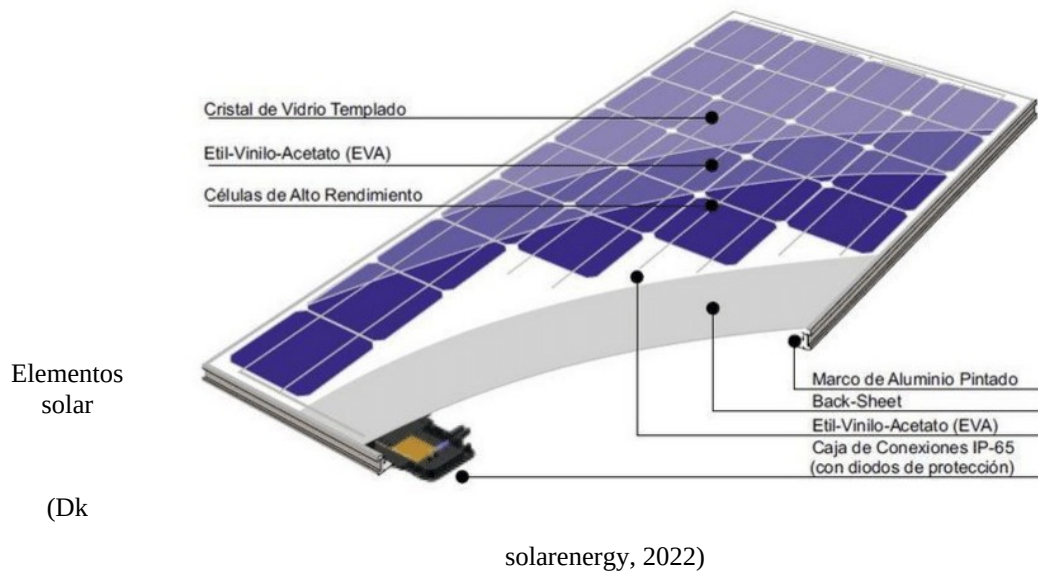


Figura 50. del panel

Fuente:

2.1.14.1 Procesos de ensamble de los paneles solares

Para ir conformando el producto final que es el módulo fotovoltaico y seguir los más altos estándares se tiene que seguir una serie de procesos que se describen brevemente a continuación en la figura 51:

51. de

Figura Procesos



ensamblado de paneles solares

Fuente: Elaboración propia

- **Soldadora semiautomática**

Esta máquina nos ayuda a armar los strings o cadenas en serie con distintos números de celdas de manera semiautomática. La cara de la celda de color gris es positiva y la azul la negativa que nos sirve para hacer las conexiones adecuadas con el Ribbon.

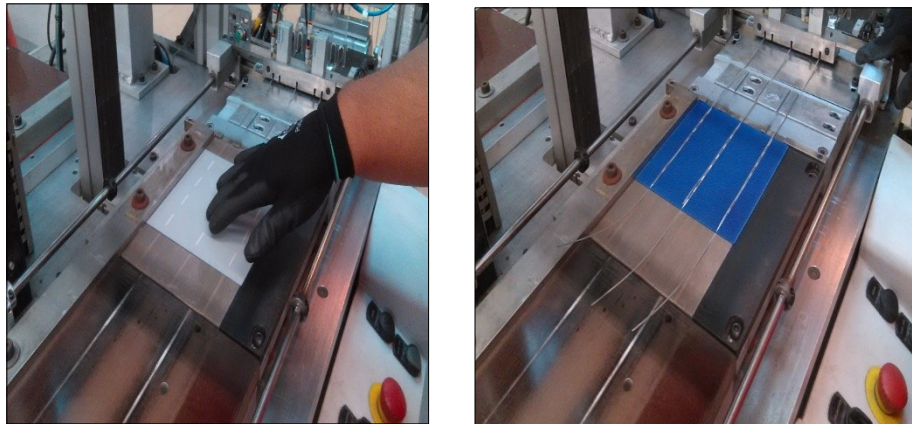


Figura 52.

Soldadora semiautomática

Fuente: (S.C, 2020)

En la figura 52 se puede apreciar la unión las tiras de ribbon por la cara positiva de la celda color gris y la negativa color azul.

- **Mesa de prelamado.**

En esta mesa se reciben todas las celdas fotovoltaicas conectadas y soldadas debidamente por la soldadora semiautomática, aquí se hace una revisión de todas las conexiones y que no haya alguna célula fisurada, además de conectar los bussbar a los busswire que recolectarán toda la energía captada en cada una de las cadenas.



Figura 53.

Mesa de

prelamado

Fuente: (S.C, 2020)

- **Laminado.**

El proceso de Laminación de módulos fotovoltaicos se lleva a través de un proceso de sellado térmico al vacío, este proceso es importante para idear nuestro prototipo laminador híbrido y se ve a detalle en el capítulo 3 de "Diseño y Simulación".

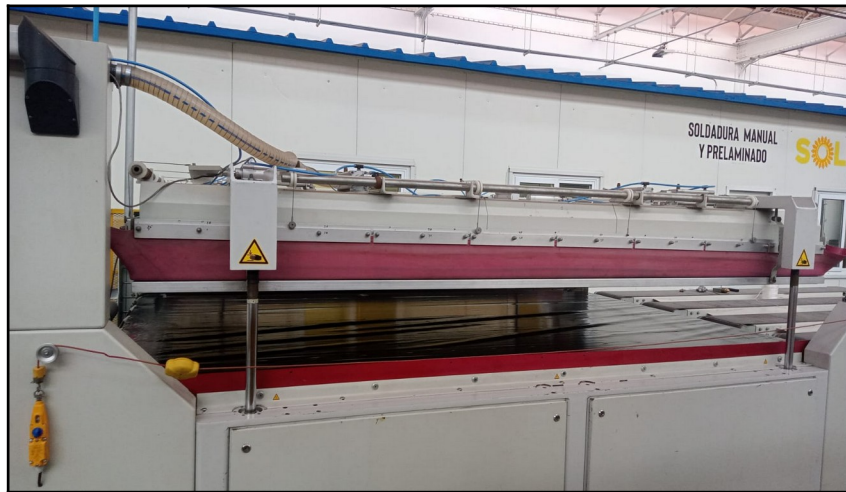


Figura 54. Laminadora solar

Fuente: (S.C, 2020)

El proceso de laminado se puede subdividir aproximadamente en 4 operaciones de trabajo:

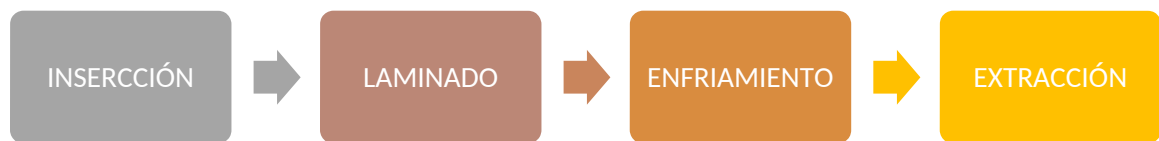


Figura 55. Operaciones de laminado

Fuente: Elaboración propia

La mesa de inserción transporta el módulo previamente preparado al laminador mediante transportadores de rodillos. Aquí el módulo se suelda y desgasifica al vacío. Una cinta

transportadora circulante transfiere el módulo a la prensa de enfriamiento en la que el módulo se enfría bajo presión. Después de esto, el módulo terminado se transporta a la mesa de extracción.

Durante el laminado, los diferentes sistemas que interactúan son:

- El **sistema de vacío** produce la presión necesaria para laminar y enfriar.
- El **aceite portador** calienta la placa calefactora junto con las varillas calefactoras eléctricas.
- El **sistema de enfriamiento** asegura el enfriamiento simultáneo de los módulos.
- El **sistema hidráulico** abre y cierra la cámara de vacío superior del laminador.
- El **sistema neumático** mueve las tapas de la prensa de enfriamiento, la estación de limpieza y los pasadores. Las válvulas de vacío y los tensores de membrana también se accionan neumáticamente.
- El **sistema eléctrico** suministra energía a los motores del transportador, la placa calefactora y el control.



Figura 56. Sistemas que interactúan en el laminado

Fuente: Elaboración propia

Esta máquina tiene diferentes parámetros como la temperatura, el vacío, la duración del proceso y la presión, que se controlan independientemente para proporcionar unas condiciones óptimas de proceso.

El proceso de laminado consiste en realizar vacío para extraer los posibles gases que se puedan encontrar en el módulo fotovoltaico y aplicar presión para asegurar que todos los materiales queden unidos.

La obtención de un buen encapsulado puede prevenir de manera significativa la degradación de las células solares. Una laminación correcta debe mantener las células solares en buen estado durante al menos 25 años. Para controlar que el laminado es el correcto, debe cumplir las siguientes especificaciones:

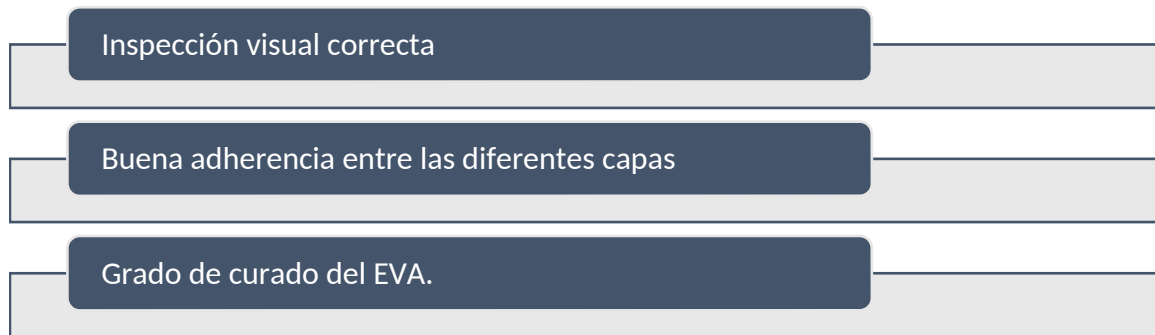


Figura 57. Especificaciones de control de laminado

Fuente: Elaboración propia

- **Enmarcado**

El proceso de enmarcado se realiza por una enmarcadora se observa en la figura 58 que ensambla 2 postes cortos y 2 postes largos a la estructura del módulo que proviene de la laminadora.



Figura 58. Enmarcado de postes de aluminio

Fuente: (S.C, 2020)

Los marcos son de aluminio anodizado cuyas características ya se describieron en la parte de elementos en los módulos fotovoltaicos.

- **Módulo de electroluminiscencia**

Las celdas solares pueden presentar defectos característicos, tales como microgrietas, dedos rotos, contactos defectuosos entre celdas, celdas con fisuras o celdas rotas, los cuales no son perceptibles a simple vista. La prueba de electroluminiscencia en la industria fotovoltaica proporciona información de los defectos que se encuentran en las celdas solares.

La prueba de electroluminiscencia (EL), es una técnica de medición no destructiva que consta del mismo funcionamiento que un diodo emisor de luz. Esta prueba se realiza a los paneles solares, introduciendo un flujo eléctrico a través de las células solares. La EL es una técnica que sirve para caracterizar las células solares y el módulo fotovoltaico, es útil ya que es rápida, no destructiva, sensible a los efectos de los parámetros de resistencia y recombinación, de derivación y serie. La EL emitida por una célula solar en diagonal hacia adelante, puede ser detectada por una cámara de CCD en condiciones de oscuridad. Véase figura 59.

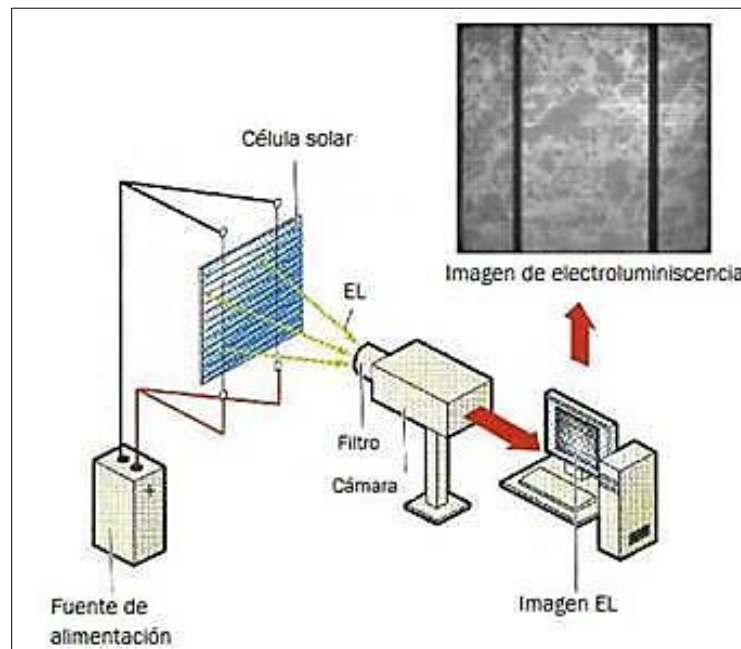


Figura 59. Diagrama de prueba de electroluminiscencia

Fuente: (Ecorfan, 2020)

- **Simulador Solar.**

Este proceso consiste en realizar una prueba eléctrica con una radiación promedio de 1000 W/m^2 , 1.5 AM y 25°C por medio del cual obtenemos valores de corriente, tensión y así definir la potencia del panel solar como se ve en la figura 60.

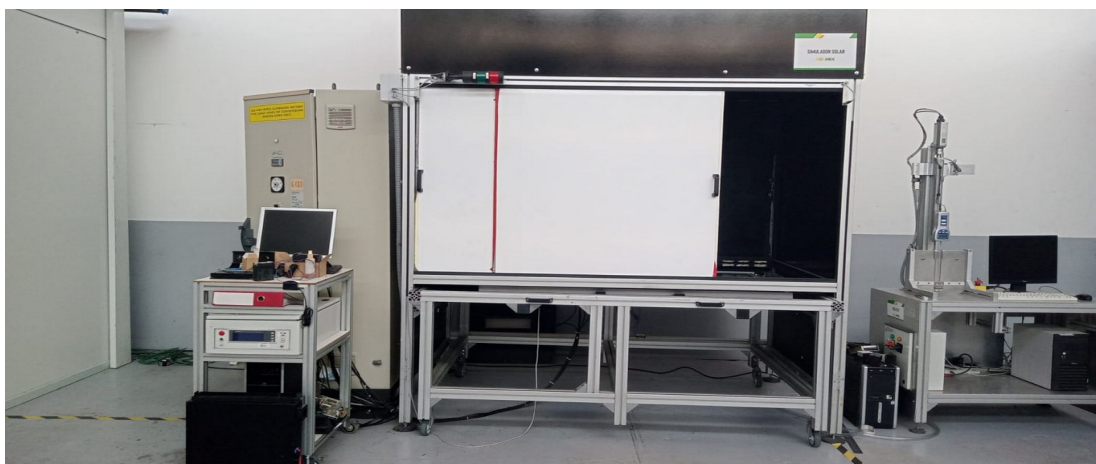


Figura 60. Simulador solar.

Fuente: (S.C, 2020)

Finalmente se imprime la hoja de datos del módulo con sus características principales a condiciones estándar y a condiciones de operación como se puede apreciar en la figura 61.

ERA[®] SOLAR	
Module	ESPHSC450
Maximum power (Pmax)	450W
Output tolerance	± 3%
Maximum power Voltage (Vmp)	41.5V
Maximum power Current (Imp)	10.85A
Open Circuit Voltage (Voc)	49.3V
Short Circuit Current (Isc)	11.6A
Normal Operating Cell Temp (NOCT)	45°C
Maximum System Voltage	DC1500V
Module Series Fuse	20A
Weight	24kg
Dimension	2094x1038x40mm
Standard Test Conditions	
AM.1.5 IRRADIANCE=1000W/m ² Temp=25°C	
Made in China	
⚠ WARNING-ELECTRICAL HAZARD	
Solar modules generate electricity when exposed to sunlight. One module on its own is below the safety extra low volt level, but multiple modules connected in series (summing the voltage) represent a danger.	

Figura 61. Ficha de datos del MFV

Fuente: (S.C, 2020)

2.1.15 Variables para el curado del EVA

Se sabe que el EVA es un material polimérico importante para el ensamble de los módulos fotovoltaicos cuyo proceso de curado comienza una vez que se alcanza una temperatura mínima o umbral, lo que se traduce en una sesión de calor dando lugar a una reacción exotérmica. En las tablas 6 y 7 se puede ver los datos de la receta para laminar un módulo fotovoltaico para 2mm y 4mm respectivamente, también podemos ver que los rangos de

temperatura oscilan entre 115 °C y 140 °C estas tablas nos dan un referente de temperaturas para una máquina industrial. Aunque el prototipo laminador a pequeña escala con el que trabajaremos oscilen las temperaturas entre 80°C y 100°C. (Larrey, 2016)

Tabla 6. Grado de curado del EVA para policarbonato de 2mm

Código de la muestra	Receta de Laminación		G (%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	
46.0116.0_16	115	20.5	38
46.0116.0_23	135	12.5	60
46.0116.0_24	135	17.5	72
46.0116.0_25	135	22.5	80
46.0116.0_45	131	17.5	58

Fuente: (Larrey, 2016)

Tabla 7. Grado de curado del EVA para policarbonato de 4mm

Código de la muestra	Receta de laminación		G (%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	
46.0116.0_15	125	12.5	44
46.0116.0_16	140	12.5	69

Fuente: (Larrey, 2016)

La diferencia de resultados entre la tabla 6 y 7 es el grosor de la hoja de policarbonato una de 2 mm y otra de 4mm respectivamente. Las características generales del EVA se pueden ver en el Anexo 1 mediante su ficha técnica.

Capítulo III. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología planteada para el proyecto a realizar y se puede observar en la figura 62.



Figura 62. Metodología empleada

Fuente: Elaboración propia

La metodología que se empleó en el desarrollo de esta tesis es la que se explica a continuación y se indica esquemáticamente en la figura anterior. Los pasos que se siguieron llevan un orden con la finalidad de que se cumplan con los objetivos específicos descritos anteriormente.

En la investigación se propuso un prototipo de micro concentradores que a su vez conforman un colector solar con concentración para suministro de calor de proceso a través de un intercambiador para un laminador de paneles solares siendo una investigación de tipo:

- **Cualitativa** ya que seleccionan materiales que nos llevan a una eficiencia adecuada para alcanzar temperaturas entre 80 y 100°C para cumplir con los objetivos de diseño y simulación del colector concentrador con la placa calefactora.
- **Cuantitativa** ya que requiere de datos que se utilizaron en ecuaciones que nos ayudaron a determinar parámetros como temperatura, eficiencias, área de colectores, factor de emisión.
- **Aplicada** ya que se integran materias de estudio como sistemas térmicos solares, termodinámica, transferencia de calor, mecánica de fluidos y electricidad.

3.1 Metodología de cálculo

En esta sección se describen brevemente los conceptos puntuales por medio de ecuaciones que se utilizan para el diseño de los micro concentradores para el colector, el intercambiador de calor, el dimensionamiento del campo de colectores solares térmicos, el balance medioambiental y el económico.

3.1.1 Ecuaciones y conceptos para el cálculo del CPC

Las siguientes variables que se utilizaron para calcular el CPC son las que se describen a continuación:

Donde:

ϕ_{Int} = Diámetro interno del absorbedor. [m]

ϕ_{Ext} = Diámetro externo del absorbedor. [m]

R_{Nom} = Radio nominal del absorbedor. [m]

θ_0 = Semiángulo de aceptación. [°]

t = Parámetro truncado. [°]

l = longitud del absorbedor. [m]

Es importante conocer el círculo unitario para tener referencia de los radianes y grados en que se presenta la variable t que se puede observar en la figura 63 donde se representa la circunferencia unitaria.

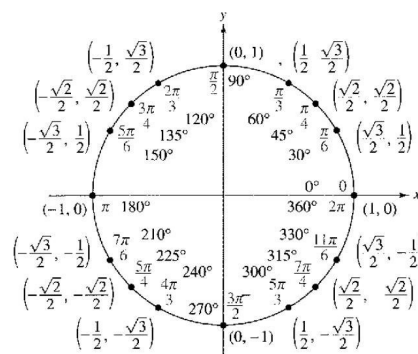


Figura 63. Circunferencia unitaria

Fuente: (González, 2015)

Truncamiento óptimo del CPC. Dentro de los diversos criterios de truncamiento, existe el criterio de rincón. Asumiendo que sea uniformemente convexa o plana cuando el ángulo de truncamiento:

$$t_t = \left(\frac{\pi}{2}\right) - 3(\theta_o) \quad (3)$$

Para asegurar que el factor de concentración C no se vea afectado, se considera un valor de concentración mayor al propuesto inicialmente para asegurar que el truncamiento no afecte el desempeño térmico del dispositivo (Mejía E. A., 2010). Y el factor de concentración tiene una relación directa con el semiángulo de apertura θ_o del CPC (González, 2015).

$$C = \left(\frac{1}{\sin(\theta_o)}\right) \quad (4)$$

Ecuaciones paramétricas que describen al CPC. Existen algunas ecuaciones paramétricas que ayudan a puntualizar nuestra trayectoria de curvas una de ellas para la parte de involutas y otra para causticas esto con el afán de que la mayoría de los rayos que inciden en él con ángulo θ sean reflejados con éxito hacia el absorbedor de forma cilíndrica y que su ángulo de incidencia no sea mayor al de aceptación $\theta_{m\acute{a}x}$. (Rincón Mejía et al, 2009)

De acuerdo con González (2015), para describir al absorbedor cilíndrico por medio de ecuaciones paramétricas, se toma en cuenta a una circunferencia con centro en el origen y donde el parámetro t va desde 0 a 2π ;

$$\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{i}; \quad (5)$$

$$0 \leq t \leq 2\pi$$

Para describir las involutas que envuelven al absorbedor cilíndrico y que describen las curvas AB Y AC y donde el parámetro t va desde 0 hasta $\frac{\pi}{2} + \theta_o$ observándose la ecuación:

$$\mathbf{r}_a(t) = \dot{i}; \quad (6)$$

$$0 \leq t \leq \frac{\pi}{2} + \theta_0$$

La curva que va de CD Y BE se conoce como acustica donde t va desde $\theta_0 + \frac{\pi}{2}$ hasta

$\frac{3}{2}\pi - 3\theta_0$ descrita por las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$f(t) = \dot{i} \quad (7)$$

$$; \theta_0 + \frac{\pi}{2} \leq t \leq \frac{3}{2}\pi - 3\theta_0$$

Donde:

a: radio de la circunferencia (absorbedor).

t: parámetro que describe las curvas.

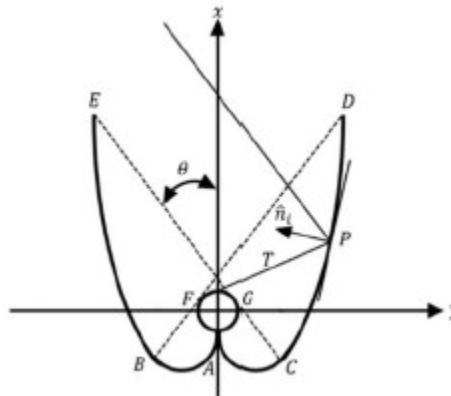


Figura 64. Curvas involutas y acusticas del CPC

Fuente: (Mora & Mejía, 2023)

En la figura 64 se ven las relaciones de las ecuaciones paramétricas descritas en las ecuaciones 5,6 y 7.

Radiación absorbida por unidad de área iluminada. Para calcular la radiación solar absorbida por unidad de área reflejada [W/m^2] se toma como dato inicial la radiación directa que incide en el lugar. Como menciona Duffie y Beckman se utiliza la siguiente ecuación para calcular dicho dato:

$$S = FG_{bn} \cos \Theta \tau_{cb} \tau_{cpc,b} \alpha_b + \frac{Gd}{C} \tau_{c,d} \tau_{cpc,d} \alpha_d \quad (8)$$

Donde:

S: Radiación absorbida por unidad de área [W/m^2]

F: Factor de control que es 1 si la radiación directa se encuentra dentro del ángulo de aceptación del concentrador, 0 en cualquier otro caso.

G_{bn} : Radiación global incidente. [W/m^2]

Θ_0 : Semiángulo de aceptación. [$^\circ$]

τ_{cb} : Transmisividad de la cubierta del concentrador para radiación directa. []

$\tau_{cpc,b}$: Transmisividad del concentrador para radiación directa. []

α_b : Absortividad del receptor para radiación directa. []

$\frac{Gd}{C}$: Radiación incidente entre la razón de concentración geométrica. [W/m^2]

$\tau_{c,d}$: Transmisividad del concentrador para radiación difusa. []

α_d : Absortividad del absorbedor para radiación difusa. []

Eficiencia del concentrador (η_c). La eficiencia indica la cantidad de energía que se pudo aprovechar respecto a la que se suministró al sistema, este valor se expresa en cantidad decimal que al multiplicarse por 100 queda en forma de porcentaje.

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_c}{(I_s)(A_s)} \quad (9)$$

Donde:

\dot{Q}_c : Energía que entrega el concentrador solar propuesto [W]

I_s : radiación solar incidente [W/m^2]

A_a : Área de apertura del concentrador [m^2]

Eficiencia óptica (η_o). Esta eficiencia se calcula a partir de las características ópticas de la lámina reflejante, la absorbancia del absorbedor, la transmitancia de la cubierta y considerando errores de fabricación que pueden estar entre un rango de 5% a 15%.

$$\eta_o = \omega\tau\alpha(1 - \vartheta) \quad (10)$$

Donde:

ω : Reflectancia de la lámina SPEC. []

τ : Transmisividad del vidrio sodio – calcio. []

α : Absortividad de la pintura negra mate. []

ϑ : imperfecciones de construcción de máximos. []

Eficiencia total del concentrador. Resulta de multiplicar la eficiencia térmica y la eficiencia óptica.

$$\eta_c = (\eta_t)(\eta_o) \quad (11)$$

Donde:

η_t : Eficiencia térmica. [%]

η_o : Eficiencia óptica. [%]

Temperatura de estancamiento. Para garantizar la temperatura de estancamiento tiene que ser mayor a la temperatura de operación del proceso, es por esto por lo que la concentración geométrica debe ser un poco mayor y se utiliza el criterio de truncamiento óptimo propuesto por Eduardo Rincón para mitigar las pérdidas de calor lo más posible.

$$T_s = \left[\frac{(\eta_o)(G_s)(C_g)}{(1+p)(\varepsilon)(\sigma)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

Donde:

η_o : Eficiencia óptica. []

G_s : Irradiancia a la superficie. [W/m²]

Cg: Concentración Geométrica. []

p: pérdidas. []

ε : Emisividad. []

σ : Constante de Stefan-Boltzmann. [W/m²K]

Capacidad del colector. Los litros de capacidad de un colector concentrador se calcularon de la siguiente manera:

$$V = \left(\frac{(n)(D)^2}{4} \right) (l) \quad (13)$$

Donde:

V= volumen de fluido en el tubo interno de cobre.

D_{int}= Diámetro interno del absorbedor. [m]

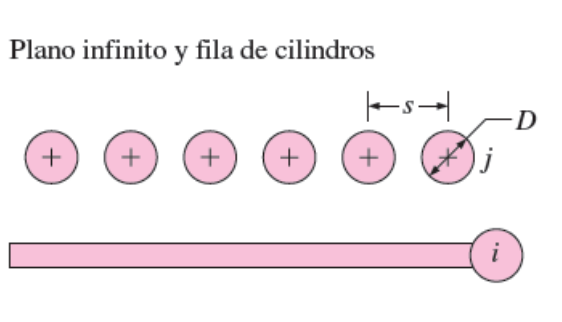
l = largo del tubo absorbedor. [m]

3.1.2 Cálculos para el intercambiador de calor

Una vez planteadas las ecuaciones para diseñar el CPC, viene el diseño de nuestro serpentín que servirá como intercambiador de calor y se plantea de la siguiente manera:

Para resolver el problema se supone un comportamiento como una configuración geométrica infinitamente larga (2D) de “Plano infinito y fila de cilindros”. La figura 65 muestra la expresión para el factor de visión para la geometría seleccionada.

Plano infinito y fila de cilindros



$$F_{i \rightarrow j} = 1 - \left[1 - \left(\frac{D}{s} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{D}{s} \tan^{-1} \left(\frac{s^2 - D^2}{D^2} \right)^{1/2} \quad (14)$$

Figura 65. Expresión del factor de visión para plano infinito y fila de cilindros

Fuente: (Incropera & Dewitt, 1999)

Factor de forma o de visión. Este factor que se define como fracción de radiación que sale de la superficie i que es interceptada por la superficie j .

Donde:

F_{ij} : Fracción de i interceptada por j . []

D : Diámetro externo. [m]

S : Distancia entre centros de los tubos. [m]

Las superficies se comportan como cuerpos negros, se desprecia la resistencia por conducción en la pared del tubo, con un flujo totalmente desarrollado, la temperatura en la superficie exterior del tubo se fijó en $T_s = 78 \text{ }^\circ\text{C}$.

La figura 66 muestra una imagen en isométrico del sistema y la figura 67 muestra una vista en sección del sistema cortado por la mitad a través del plano de corte.

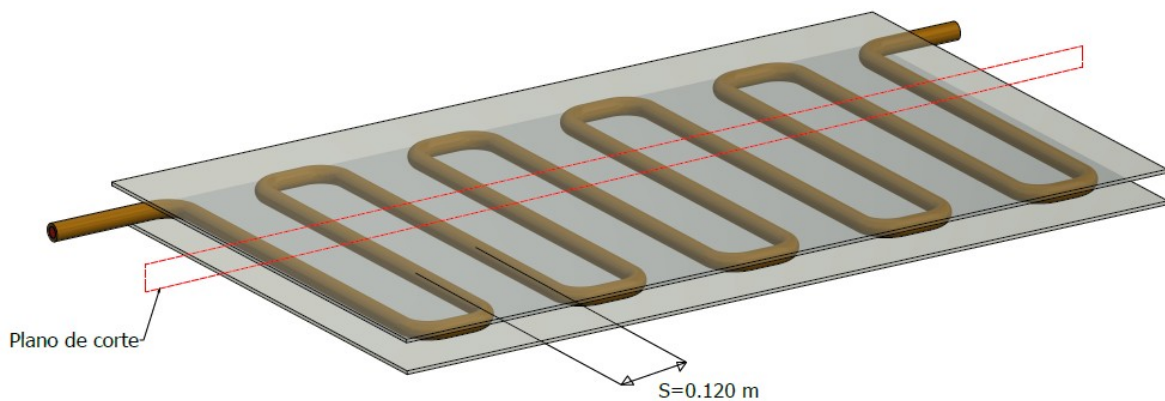


Figura 66. Isométrico de intercambiador de calor

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Ansys, 2024)

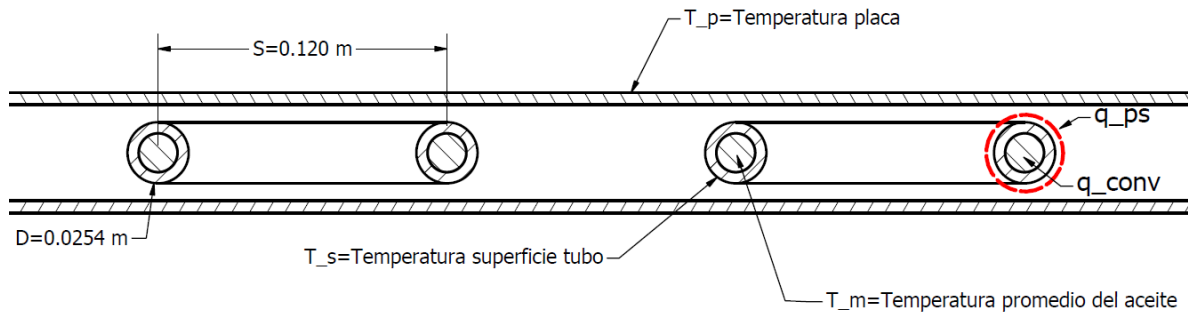


Figura 67. Vista del sistema intercambiador seccionado

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Ansys, 2024)

Desarrollando un balance de energía sobre una sección del serpentín, de acuerdo con la figura 67, resulta que:

$$q_{ps} = q_{conv} \quad (15)$$

Donde:

q_{ps} : Transferencia de calor por radiación de superficies.

Q_{conv} : Transferencia de calor por convección.

O lo que es lo mismo:

$$A_p F_{ps} \sigma (T_p^4 - T_s^4) = h A_s (T_s - T_m) \quad (16)$$

Donde:

A_p : Área del panel [m^2]

F_{ps} : Factor de visión

σ : Constante de Stefan-Boltzmann $\left[\frac{W}{(m)(k^4)} \right]$

T_p : Temperatura de la placa [k]

T_s : Temperatura de la superficie [k]

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{(m^2)(K)} \right]$

A_s : Área del tubo de cobre [m²]

T_m : Temperatura media del Aceite [K]

$$(T_p^4 - T_s^4) = \frac{h A_s (T_s - T_m)}{A_p F_{ps} \sigma} = \left(\frac{A_s}{A_p} \right) \frac{h (T_s - T_m)}{F_{ps} \sigma} \quad (17)$$

El próximo paso consiste en determinar el tipo de flujo de aceite en el tubo. Para conocer el tipo de flujo se calcula el número de Reynolds.

$$\Re_D = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \mu} \quad (18)$$

Pero antes se tiene que sacar la viscosidad dinámica μ por medio de la ecuación:

$$\mu = \rho \nu \quad (19)$$

Donde:

\Re_D = Numero de Reynolds

\dot{m} = Flujo másico del aceite [kg/s]

D = Diámetro externo [m]

μ = Viscosidad Dinámica [m²/s]

ρ = Densidad del aceite [kg/m³]

Luego el coeficiente de convección se determina con la siguiente relación:

$$h = \frac{4k}{D} \quad (20)$$

Donde:

h : coeficiente de convección [W/m²]

k : coeficiente de conductividad térmica [W/m²K]

D : Diámetro externo del tubo [m²]

Luego para determinar la relación de áreas del tubo con relación a las placas de cobre:

$$\frac{As}{Ap} = \left(\frac{(n)(D)}{(2)(S)} \right) \quad (21)$$

Por último, de la ecuación 17 se despejan las temperaturas y se obtiene:

$$(Tp)^4 - (Ts)^4 = \left(\frac{(h)(As)(Ts - Tm)}{(Ap)(Fps)(\sigma)} \right)$$

Y se llega a la ecuación 22

$$(Tp)^4 - (Ts)^4 = \left(\frac{As}{Ap} \right) \left(\frac{(h)(Ts - Tm)}{(Fps)(\sigma)} \right) \quad (22)$$

3.1.3 Calor necesario para la placa de cobre

Al incorporarse una placa de cobre al sistema laminador de MFV se requiere saber el calor requerido a la plancha calefactora donde se cocerán los paneles solares esto dependerá de la masa del cobre, calor específico del mismo y del flujo másico del fluido caloportador como aceite térmico.

Para saber el calor requerido antes tenemos que saber el área de la placa del laminador.

Donde:

l: Largo [m]

$$A_{PL} = (l)(a) \quad (23)$$

a: Ancho [m]

Luego el volumen de la placa de cobre.

Donde:

A_{PCu} : Área de la placa de Cobre [m²]

$$V_{PCu} = (A_{PCu})(h) \quad (24)$$

V_{PCu} : Volumen de la placa de Cobre [m³]

h: espesor o altura de la placa de Cobre [m]

Finalmente, la masa del cobre.

Donde: ρ_{Cu} = Densidad del Cobre. [kg/m³]

$$m_{Cu} = (\rho_{Cu}) (V_{Cu}) \quad (25)$$

 V_{Cu} = Volumen del Cobre. [m³]**Calor requerido**

Para Calcular la cantidad de Calor Requerido para elevar la placa de cobre de la temperatura inicial a una temperatura final se tiene que:

Donde:

Q: Cantidad de calor requerido [J]

$$Q = (m)(Cp)(\Delta T) \quad (26)$$

m: masa de la placa de Cobre [kg]

 Cp_{Cu} : Calor especifico del Cobre [J/kgK]

$$Q_{pCu} = mCp_{Cu}\Delta T \quad (27)$$

 T_o : Temperatura inicial [°C] T_f : Temperatura Final [°C]**Cantidad de colectores concentradores**

La cantidad de colectores concentradores se determina en base a datos como el flujo másico del aceite, capacidad calorífica del mismo, temperaturas de entrada y de salida, eficiencia del colector y de la radiación solar incidente.

Donde:
$$A_c = \frac{(\dot{m})(Cp_{Aceite})(T_{out} - T_{in})}{(\eta_c)(I_s)}$$

 η_c = Eficiencia \dot{m}_{Aceite} = Flujo masico de aceite [m/s²] Cp_{Aceite} = Capacidad calorífica. [J/kgK] T_{in} = Temperatura de entrada. [°C] T_{out} = Temperatura de salida. [°C] I_s = Radiación Solar Incidente. [W/m²]**Calor suministrado**

Para calcular el calor suministrado según (AI, 2024) por un campo de colectores solares de concentración, necesitas seguir estos pasos:

1. Determina la irradiancia solar (G): Esta es la cantidad de energía solar que llega a la superficie de los colectores medida en W/m^2 .
2. Calcula el área efectiva de captación (A): Es el área total de los colectores solares que efectivamente recibe la radiación solar. Se mide en m^2 .
3. Considera el rendimiento óptico (η): El rendimiento óptico del colector es la eficiencia con la que convierte la radiación solar en calor. Este valor se puede obtener de las especificaciones del colector y puede variar dependiendo las condiciones operativas.
4. Calcula la energía térmica suministrada (Q): Utiliza la siguiente fórmula para calcular la energía térmica que el sistema de colectores solares suministra:

Donde:

Q = Energía térmica suministrada [W] $Q= (G)(A)(\eta)$ **(29)**

G = es la irradiancia solar [W/m^2]

A = área efectiva de captación [m^2]

η es el rendimiento óptico del colector adimensional (como una fracción o porcentaje).

Balance medioambiental

Para saber cuál sería el balance ambiental de tCO_2 evitadas se toma en cuenta que:

Donde:

FE = Factor de emisión [$tCO_2e/MWh *año$]

EC = Energía generada por los colectores [MWh]

$Q= (FE)(EC)$ **(30)**

3.2 Metodología de diseño y simulación

Para esta parte se utilizan los resultados obtenidos en la parte de metodología de cálculo y se utilizan dos softwares para tener un diseño puntual estos softwares son Solidworks 2023 y Ansys 2024.

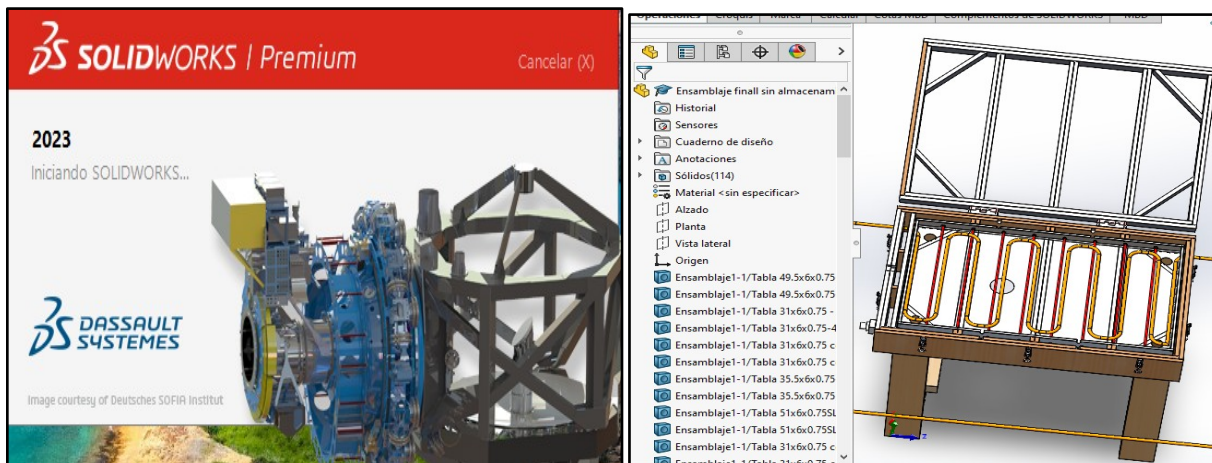


Figura 68. Solidworks y diseño mecánico del laminador

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

El primer Software nos ayudó a diseñar los micro concentradores que conforman un colector solar, el intercambiador de calor y el laminador eléctrico-solar térmico además de que se simuló térmicamente la placa intercambiadora de calor y el colector concentrador.

Cabe mencionar que en la simulación se utiliza el Método de elementos finitos (FEM) que es una técnica numérica para analizar diseños de ingeniería. El FEM está aceptado como el método de análisis estándar debido a su generalidad y compatibilidad para ser implementado en computadoras. Además, divide el modelo en numerosas piezas pequeñas de formas simples llamadas “elementos”, que reemplazan eficazmente un problema complejo por muchos problemas simples que deben ser resueltos de manera simultánea.

Con la herramienta ANSYS se obtuvo un prediseño de intercambiador de calor

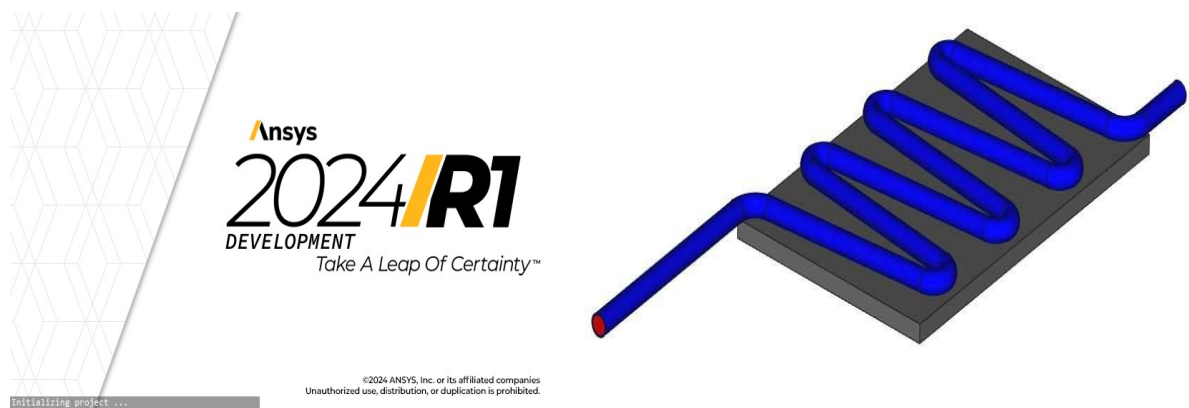


Figura 69. Prediseño de intercambiador

Fuente: Elaboración propia de diseño en (Ansys, 2024)

En la figura 69 se observa el prediseño del intercambiador de calor de serpentín de tubos de cobre con una distancia en el centro de 0.120 m dando como resultado 10 vueltas por debajo de la placa de cobre de 3mm como se puede ver en el diseño de la figura 70.

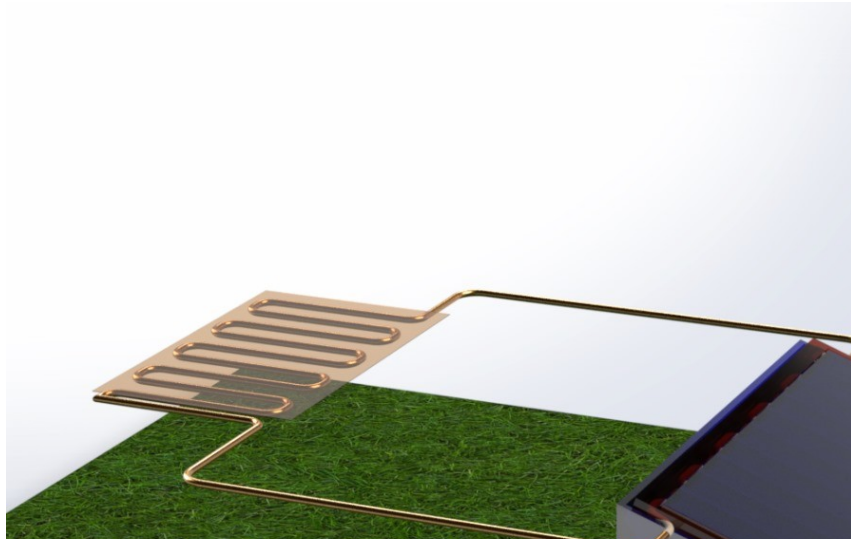


Figura 70. Diseño de intercambiador de calor

Elaboración propia con (Solidworks, 2023)

Por lo cual en el diseño es importante seleccionar y adherir materiales para que la simulación sea de manera correcta por tanto se enlistan los materiales por cada elemento que conforman los micro concentradores, el colector concentrador, el intercambiador de calor y el laminador esto se ve en el apartado de “Selección de materiales”.

Selección de materiales.

De una gama extensa de materiales existentes se seleccionaron los que ayudarán a que nuestro diseño sea el óptimo a continuación se presentan en la tabla 8 y 9.

Tabla 8. Elementos del colector solar

Elemento del colector solar con micro concentradores	Material	Función
Micro concentrador. Es la parte principal del colector y se modela con ecuaciones paramétricas.	Lámina de acero inoxidable	Carcasa para darle rigidez
	Tubo de cobre	Absorbedor circular
	Pintura negro mate	Recubrimiento del tubo de cobre
	Aceite mineral	Fluido caloportador
	Fibra de vidrio	Aislante térmico

	Lámina SPEC	Espejos reflectores
Colector solar. Formado por 10 micro concentradores.	Caja de madera	Conjunto de 10 micro concentradores
	Vidrio templado	Cubierta para efecto invernadero
	Tubo de cobre	Conexión para intercambiador de calor

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Elementos del laminador

Elemento del laminador de paneles solares	Material	Función
Sistema eléctrico Es el sistema energético convencional y original de la laminadora de paneles solares.	Resistencias calefactoras	Calentamiento de la plancha con electricidad
	Termostato	Control de temperatura
	Ventiladores axiales	Ventilación
	Madera	Carcasa del laminador
Sistema de vacío Evitar burbujas en los paneles solares.	Bomba de vacío	Vacío
Intercambiador de calor Placa de cobre que se integra a la laminadora para suministrarle energía solar térmica.	Tubo de cobre	Serpentín de cobre para transferencia de calor
	Placa de cobre	Plancha calefactora
	Aceite térmico	Flujo caloportador

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV Diseño y simulación

4.1 Diseño del colector concentrador

En el diseño del colector concentrador se tomaron en cuenta distintos prototipos desde concentradores solares de absorbedor plano y de absorbedor cilíndrico. Algunos de ellos se muestran a continuación.

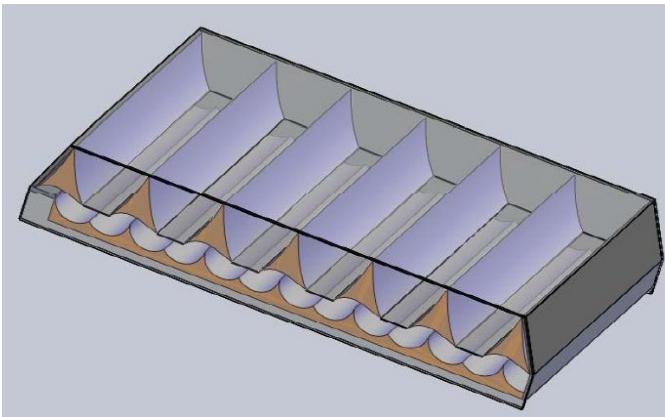


Tabla 10. Características de colector con absorbedor plano

Características del calentador de aire solar.	
Cg	2
Θ_0	18.0848°
Área del colector	2m ²
Ángulo de Truncamiento.	$\frac{\pi}{2} - 3\theta_0$

Figura 71. Colector solar de aire

Fuente: (A. Lentz, 2009)

Fuente: Elaboración propia.

Este prototipo de la figura 71 es un colector solar para calentar el aire y permite incrementos de temperatura del orden de 100 °C con eficiencias térmicas muy aceptables. (A. Lentz, 2009). Las ecuaciones que describen a este prototipo es específicamente para un concentrador Parabólico Compuesto para un absorbedor plano.

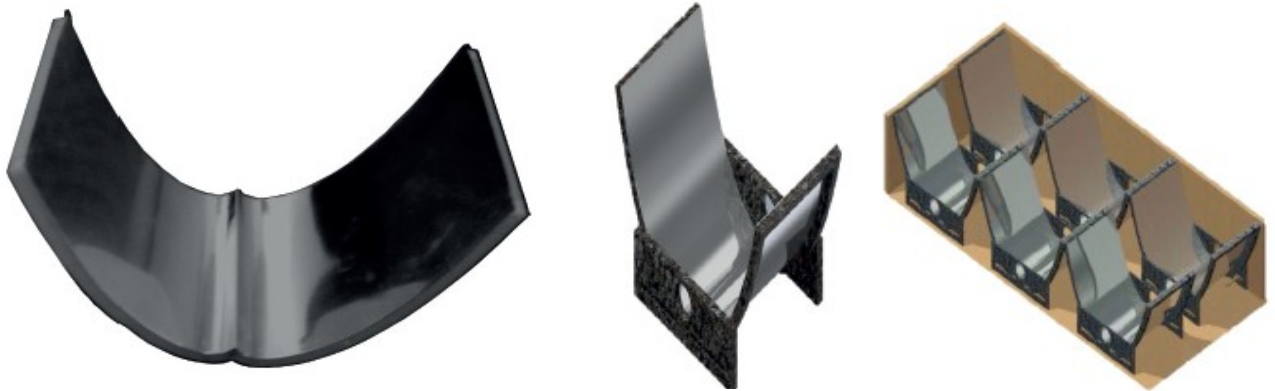


Figura 72. Prototipo de CPC para tratamiento de agua

Fuente: (Mejia & Mora, 2018)

El prototipo de la figura 72 es un CPC con absorbedor cilíndrico que tiene como finalidad el tratamiento de agua, este prototipo sigue las ecuaciones paramétricas que seguiremos para nuestro concentrador solar.

Tabla 11. Características del Tolokatzin

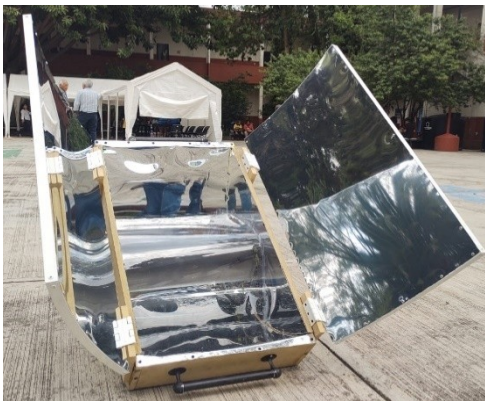


Figura 73. Concentrador solar Tolokatzin

Fuente: Elaboración propia

Características de concentrador solar multicompuesto Tolokatzin.		
Cg		2.9
Θo		25°
Ángulo de truncamiento.		$\frac{\pi}{2} - 3\theta_o$
Diámetro del absorbedor.		5"

Fuente: Elaboración propia

El concentrador Tolokatzin de la figura 73 tiene como finalidad cocinar alimentos con energía proveniente del sol.

CPC. El concentrador parabólico compuesto fue diseñado con el software Solidworks 2023. En la figura 74 se observa el concentrador con cada uno de los materiales que lo conforma.

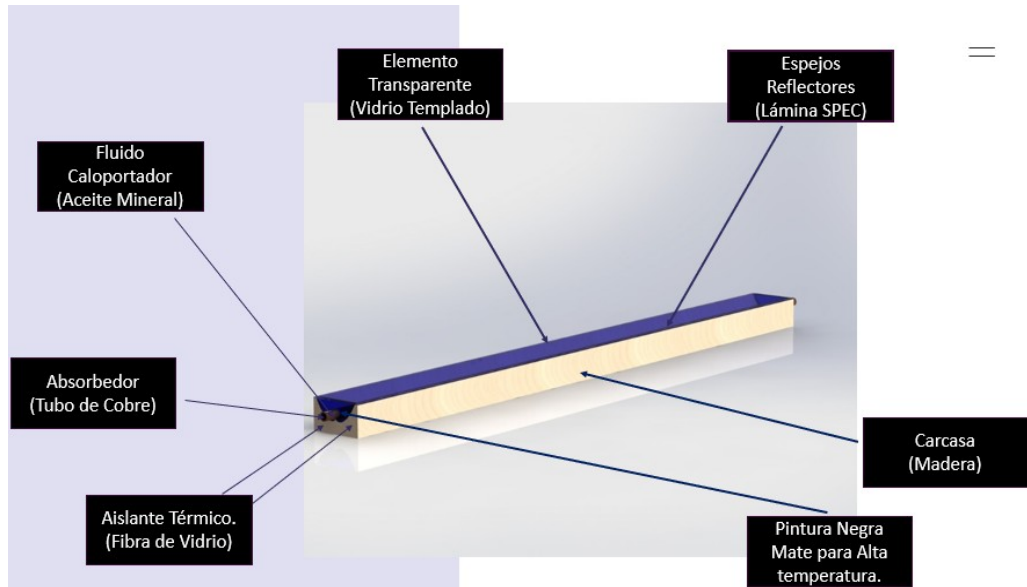


Figura 74. Micro concentrador y sus elementos

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

En la figura 75 se observa el diseño del micro concentrador representando las ecuaciones paramétricas para generar la involuta y las acusticas para un absorbedor cilíndrico de 1" de diámetro.

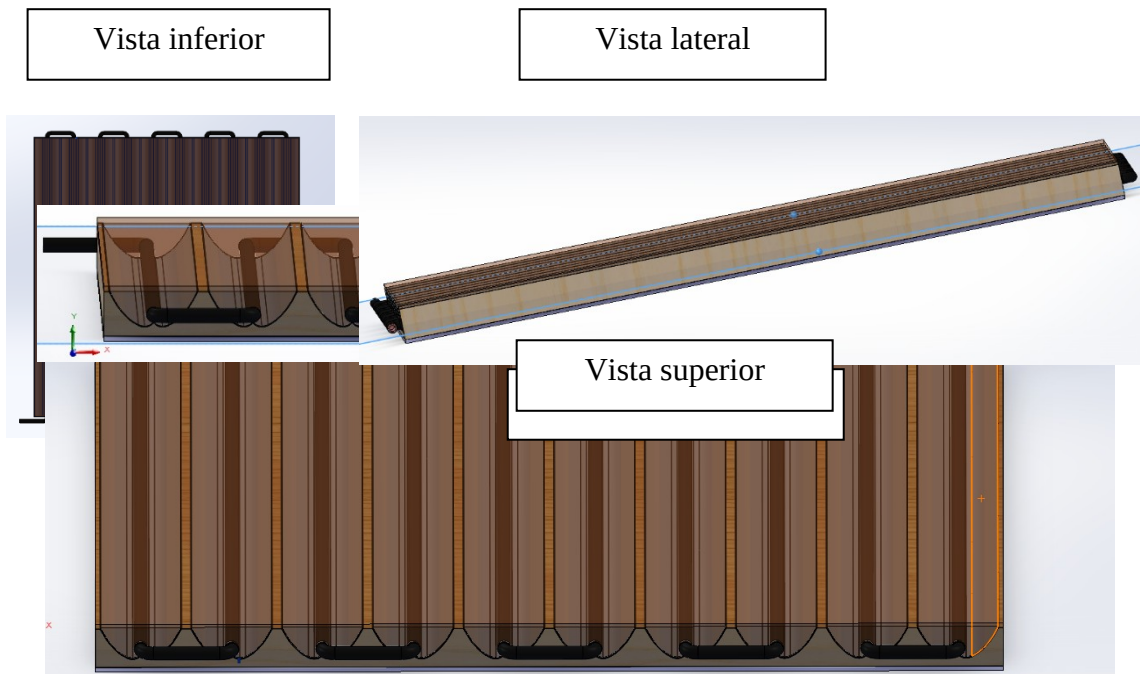


Figura 75. Diferentes vistas del colector concentrador

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

En las distintas vistas del colector se aprecian los tubos de cobre de los colectores cubiertos de pintura negra mate para mayor absorción de los rayos solares, cada tubo tiene su canal en el cual hay huecos rellenos de fibra de vidrio como aislante para mantener el calor además tienen una lámina reflejante con curvas involutas y acusticas para que haya el mayor aprovechamiento del sistema, en total son 10 canales que están interconectados en serie con su respectiva entrada y salida, la cubierta que le da soporte a todo el concentrador es de madera.



Figura 76. Colector con micro concentradores y características principales

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

Las dimensiones del colector propuesto son de 2 m x 1.30 m el volumen que correrá por los 25 colectores solares será de 255 lt y pasan por un tubo de 1" de diámetro.

La configuración de los 25 colectores concentradores configurados con baterías de 5 paralelos de 5 series y esto se puede observar en la figura 77.

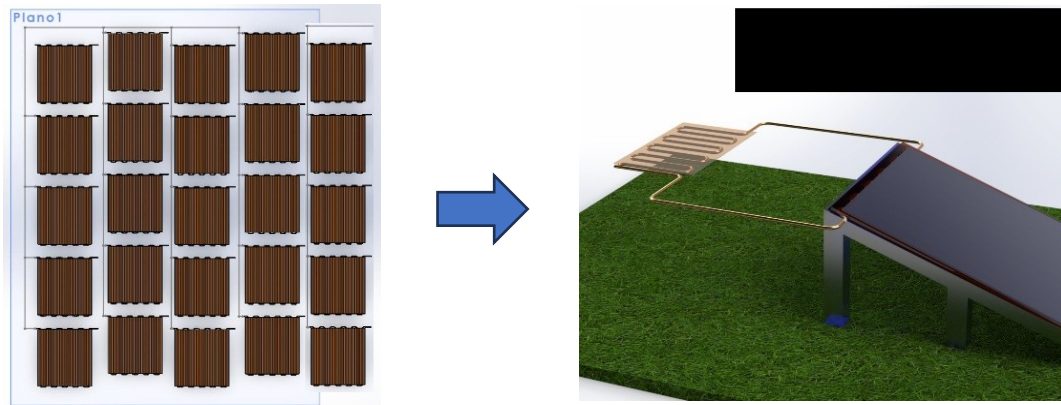


Figura 77. Configuración de colectores concentradores

Fuente: Elaboración propia con (Solidworks, 2023)

4.2 Diseño del intercambiador

Intercambiador. El intercambiador de calor se diseñó con ayuda de Solidworks 2023 y Ansys 2024.

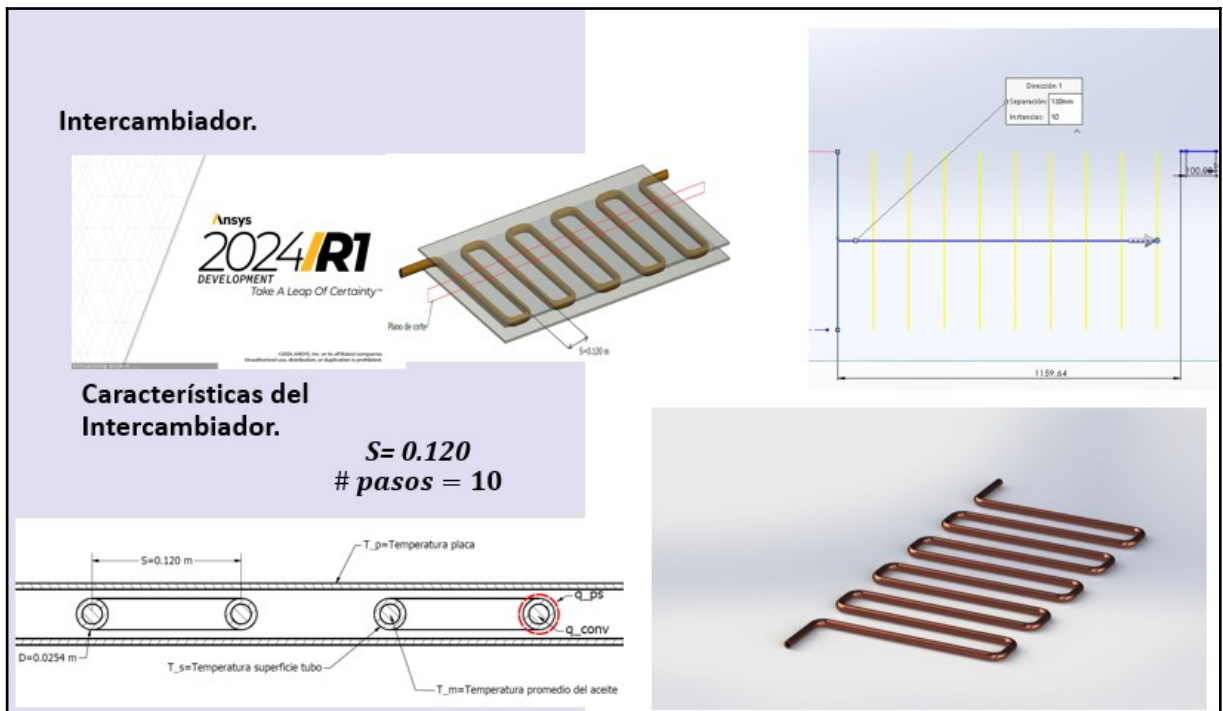


Figura 78. Diseño de intercambiador de calor

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Ansys, 2024)

Se consideró una separación de 0.120 entre los centros de los tubos y se obtuvo que sería de 10 pasos el serpentín que pasa por debajo de la placa de cobre de 13 kg.

Estos 3 prototipos mencionados anteriormente son integrados de tal manera que se pueda utilizar tanto energía eléctrica como energía solar térmica, proveniente del colector con micro concentradores.

4.3 Diseño de laminador

En el diseño del laminador fue fundamental conocer el funcionamiento de uno industrial, y para tener algo a pequeña escala se investigaron prototipos que utilizan energía eléctrica para laminar paneles solares pequeños como los que se presentan en la figura 79.

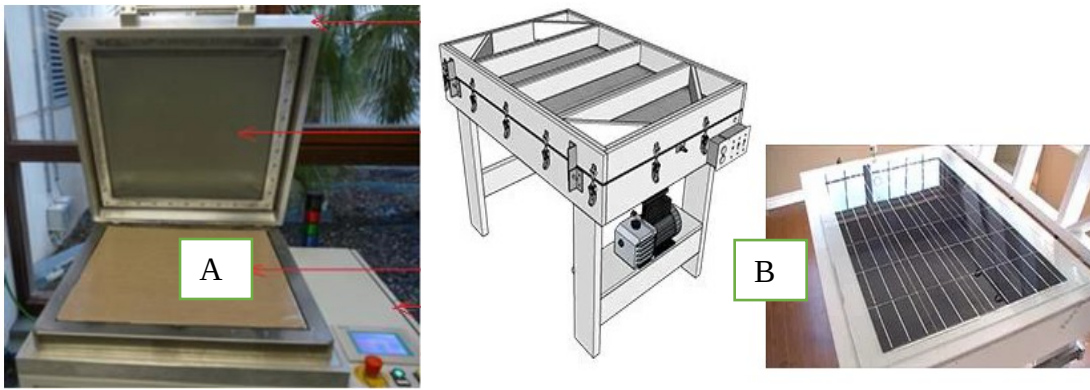


Figura 79. Algunos prototipos de laminadores fotovoltaicos

Fuente: (P. Energy, 2024)

En la figura 79 A se muestra una laminadora automática a escala L036A fabricada por la empresa P Energy que consta de una tapa un diafragma, teflón, un cuadro eléctrico y una pantalla táctil las características generales se pueden ver en la tabla 12. (P. Energy, 2024).

Tabla 12. Características generales del prototipo A

Laminador L036A	
Consumo de energía	4000 W
Dimensiones	35"X28"X39" (Largo-Ancho y Alto)
Sistema de Calentamiento	Membrana de Silicona Calefactora
Vacío	< 5 mbar
Peso	350 kg
Consumo de aire	10 lt/min

Fuente: Elaboración propia

El prototipo de la figura 79 B está diseñado para encapsular paneles de 28 celdas en serie para dar un aproximado de ≈ 75 W considerando que cada celda da 2.7 W, este prototipo es con el que se trabajó para integrarle un intercambiador de calor que se calienta con energía solar térmica. (Technologies, 2019)

Las características generales del prototipo B se pueden ver en la tabla 13:

Tabla 13. Características generales del prototipo B

Laminador RST	
---------------	--

Potencia	120 VCA, 1100-1500 W
Dimensiones	51"X 34"X38" (Largo-Ancho y Alto)
Capacidad	28 celdas
Temperatura de Funcionamiento	100°C-150 °C
Vacío	5Pa (0.05 mbar)
Tiempo de Laminación	≈ 1h

Fuente: Elaboración propia

El laminador eléctrico utiliza 6 elementos de resistencias calefactoras, el consumo de corriente total sería de $6 \times 1,6 = 9,6$ amperios, y la potencia total sería de $120 \text{ V} \times 9,6 \text{ A} = 1152 \text{ W}$.

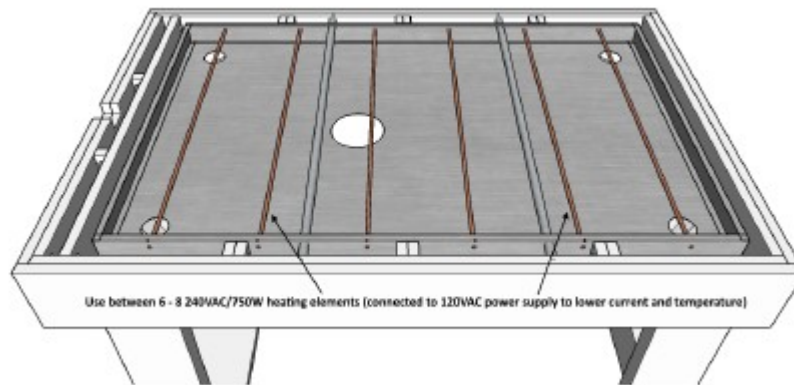


Figura 80. Laminador con 6 resistencias calefactoras

Fuente: (Technologies, 2019)

El prototipo en el cual se integra el sistema solar térmico es el laminador de la figura 80.

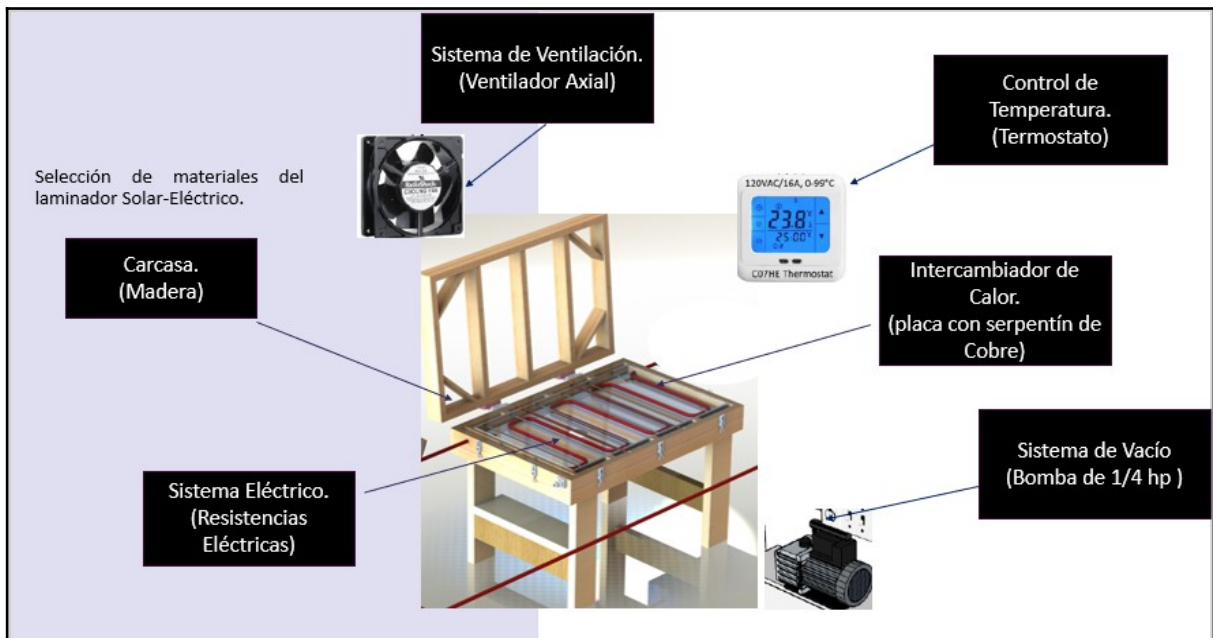


Figura 81. Elementos del laminador solar-eléctrico

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

En la figura 81 se puede observar los elementos descritos en la tabla 9 y en la figura 82 se puede ver la plancha calefactora proveniente del colector (color amarillo) y las resistencias eléctricas (color rojo).

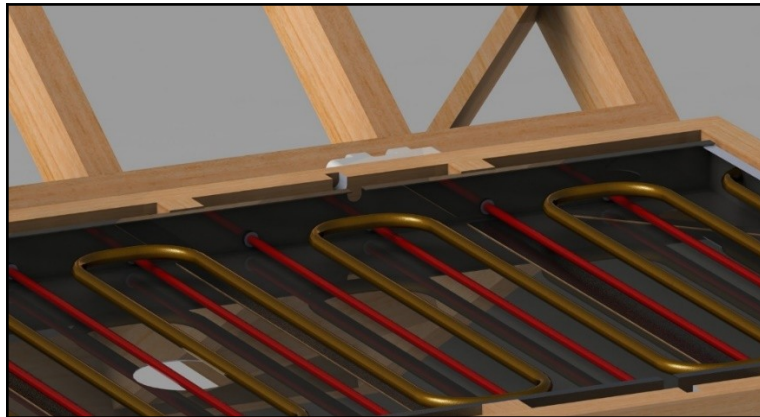


Figura 82. Diseño del laminador con intercambiador de calor y resistencias eléctricas

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

La integración que se le realizó a este prototipo es una placa de cobre con un serpentín por debajo que proviene del suministro de energía solar del campo de colectores concentradores.

Placa integrada a
 Elaboración diseño con
 2023)
 En la figura
 observa la
 cobre que se
 medio de energía solar y de electricidad convencional.

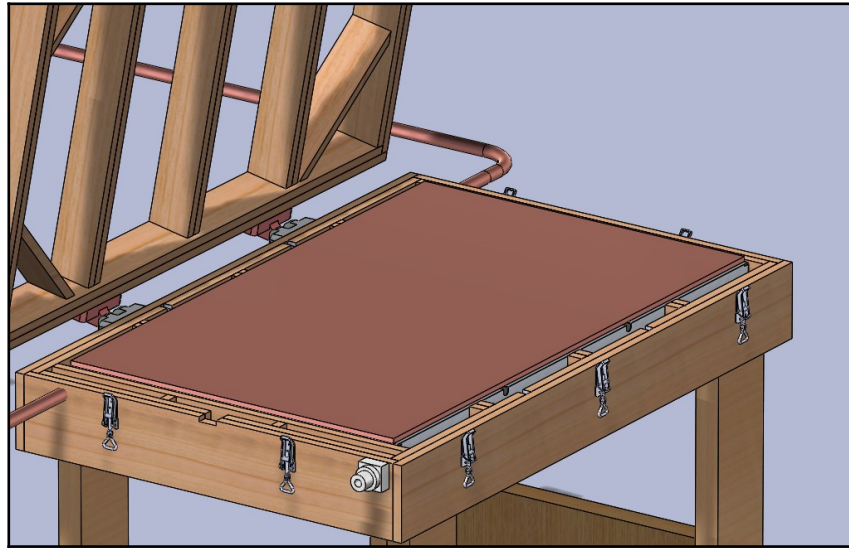


Figura 83. calefactora laminador
 Fuente: propia de (Solidworks,
 83 se
 placa de
 calienta por

4.4 Diseño final de colector concentrador, intercambiador y laminador

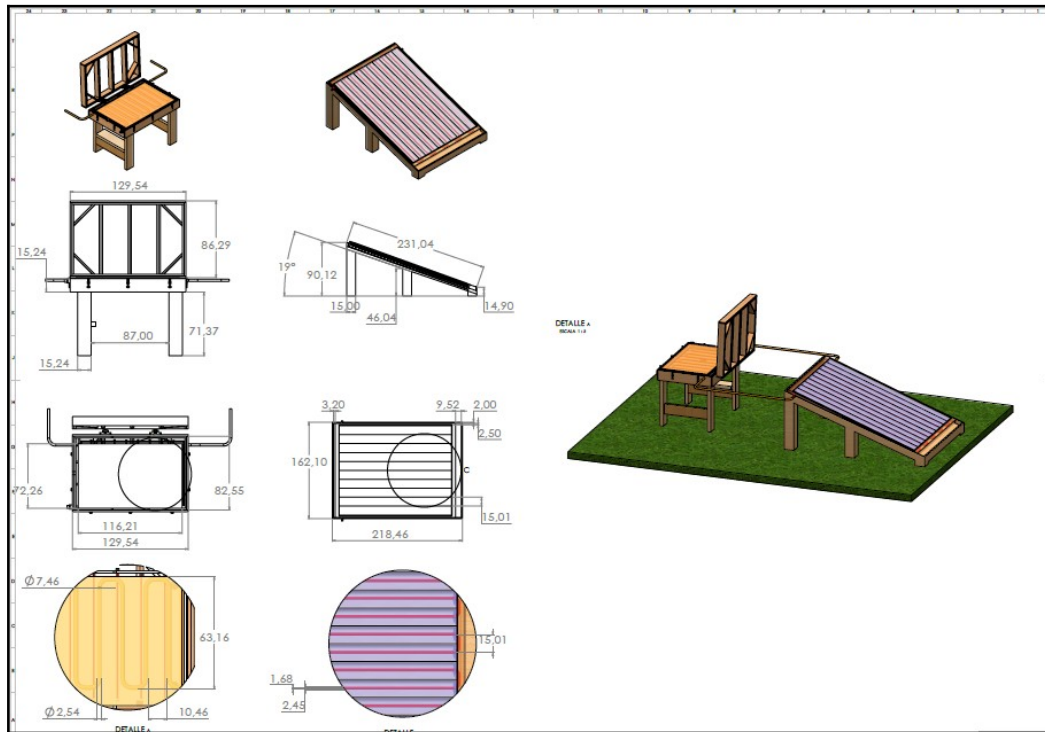


Figura 84. Esquema del sistema híbrido térmico eléctrico
 Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

Las medidas del prototipo se pueden observar en la figura 84, el sistema cuenta con un campo de colectores de concentración solar cada colector tiene dimensiones de 2.31 m x 1.62 m que se inclinan a 19° estos llevaran a través del tubo absorbedor de 1" de diámetro aceite térmico al laminador eléctrico con medidas de 1.29 m x .86 m en el cual se encuentran 6 resistencias calefactoras, y se le incorpora una placa de cobre por donde se le suministrara calor de proceso a dicho laminador.

4.5 Simulación de colectores solares y placa radiadora

Una vez diseñado el sistema térmico-eléctrico observado en la figura 85 se puede proceder a la simulación de la placa radiadora proveniente de los colectores.

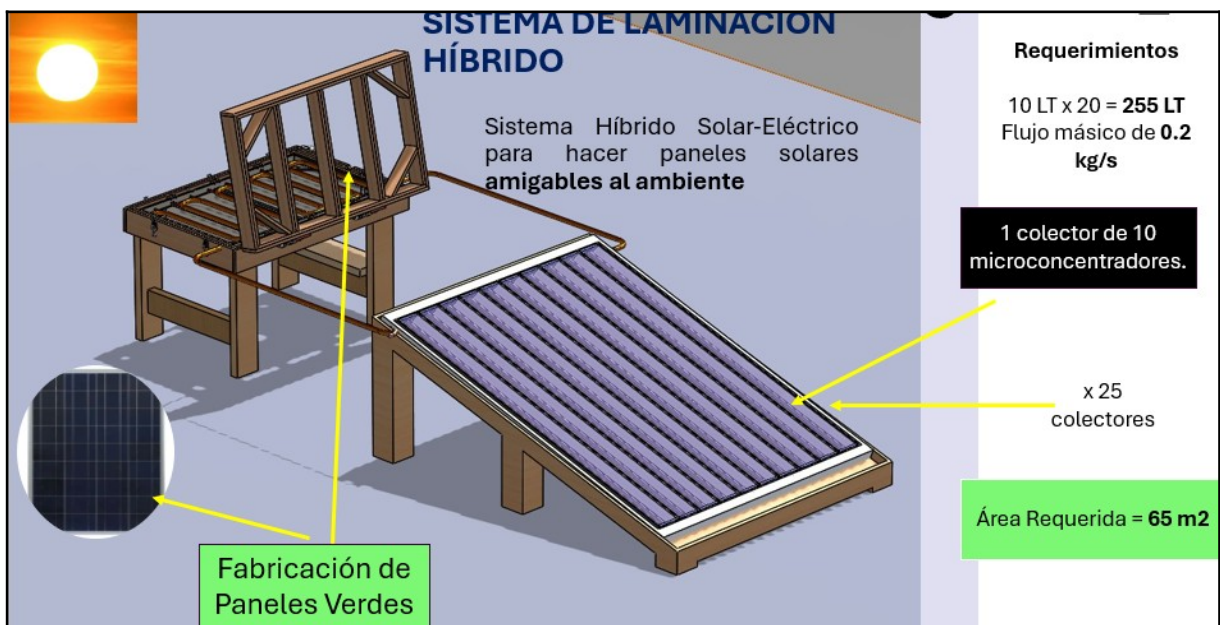


Figura 85. Sistema de laminación híbrido

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

La simulación del sistema térmico solar con serpentín para transferirle calor a una placa de cobre se realizó con SolidWorks simulation.

Los pasos que se realizaron por la metodología de elementos finitos descrita anteriormente se continua con los siguientes pasos:

- ✓ Estudio solar. Con esta herramienta se simuló la trayectoria del sol y se toman medidas a las 12 am sobre los colectores y el serpentín que va por debajo de la placa calefactora y que actúa como intercambiador de calor esto se puede observar en la figura 86.
- ✓ Simulation flow. Esta herramienta ayudó a simular el fluido caloportador como aceite térmico y reflejar en el resultado la temperatura en la placa gracias al flujo por el serpentín.

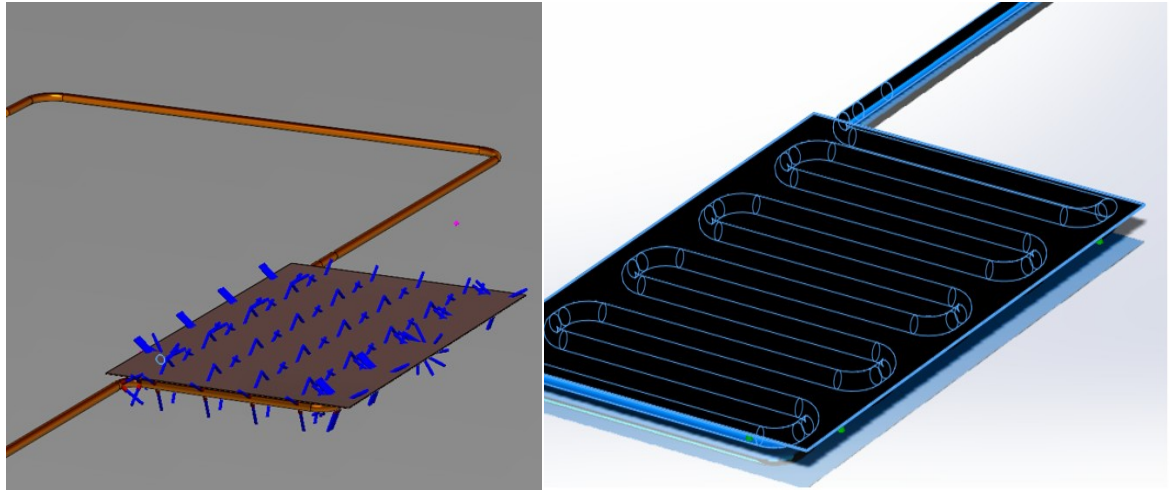


Figura 86. Simulación de placa de cobre con serpentín

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

En la figura 87 se observa la temperatura que alcanza la placa gracias al serpentín en el que fluye el aceite térmico proveniente de los colectores apreciándose una temperatura que va de 352 K a 356 K.

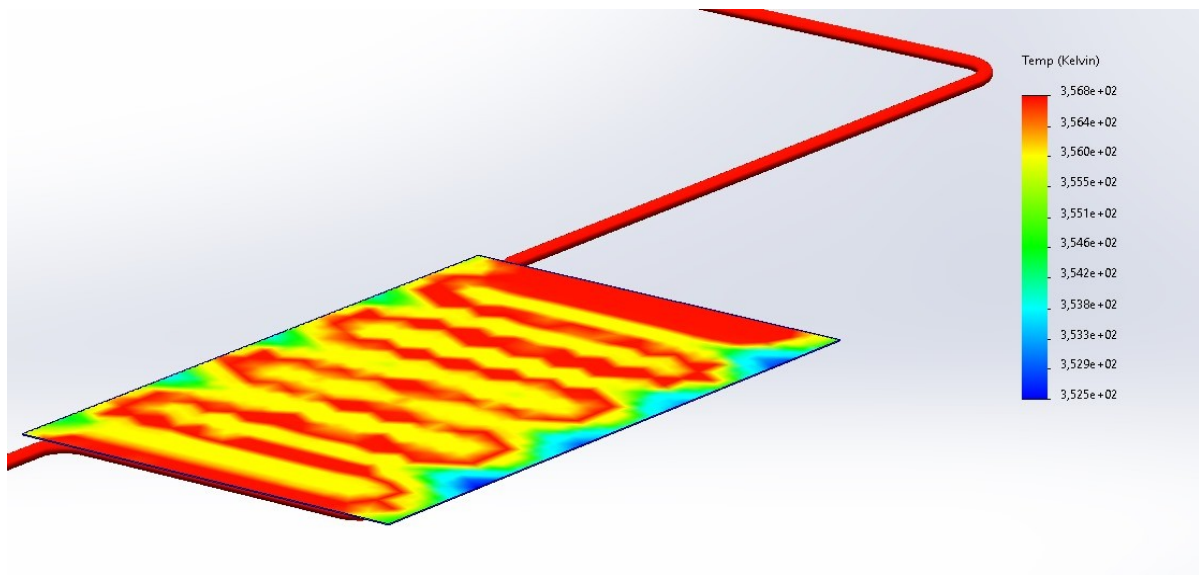


Figura 87. Temperatura de la placa de cobre

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

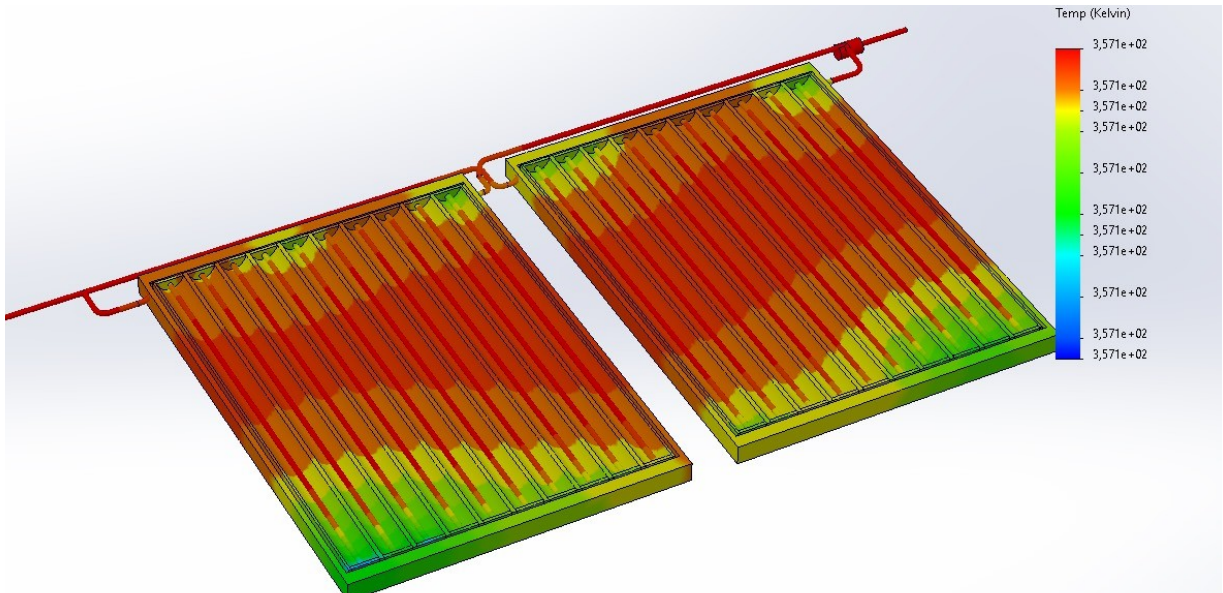


Figura 88. Temperatura en el colector

Fuente: Elaboración propia de diseño con (Solidworks, 2023)

Por último, en la simulación del colector se determina una temperatura de 357 K esto a las 12 del mediodía con latitud y longitud de UACM colonia del valle.

Capítulo V. Análisis y resultados

5.1 Análisis y resultados del colector concentrador

Para realizar el análisis del colector concentrador se tienen que determinar primero las curvas que envuelven al absorbedor cilíndrico. Para tener una referencia de los diámetros externos e internos de distintos tubos podemos ir al Anexo 2.

De la ecuación 3 arroja el resultado de criterio de truncamiento y con las ecuaciones 6 y 7 se calculan los puntos de las involutas y las acusticas.

Datos:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{Int}} &= 0.685'' = 1.74 \text{ cm} & \theta_0 &= 25^\circ \\ \phi_{\text{Ext}} &= 1'' = 2.54 \text{ cm} & \text{Criterio de truncamiento} &= 270^\circ - 75^\circ = 195^\circ \\ R_{\text{Nominal}} &= 1.3 \text{ cm} & l_{\text{Absorbedor}} &= 200 \text{ cm} \end{aligned} \quad (3)$$

Involuta del punto A al C.

De la ecuación 6 para calcular los puntos de la involuta derecha AC con punto intermedio **M** y parámetro **t** de 0° a 115° .

Para punto A con t=0

$$A = \dot{c} \quad (6)$$

Obteniendo así los puntos:

$$X_A = 0 \quad Y_A = -1.3$$

Para punto intermedio M con $t = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$

$$M = \dot{c}$$

Obteniendo los puntos:

$$X_M = 1.3 \quad Y_M = -2.04$$

Causticas del punto C al D.

De la ecuación 7 para calcular los puntos de la curva acustica derecha CD con puntos parámetro **t** de 115° a 195° .

Para punto B con $t = 115^\circ = \frac{23}{36}\pi$

$$x(115) = 1.3 \left[\frac{\sin(25) \cos(115 - 25) - (115 + 90 + 25) \left(\frac{\pi}{180}\right) \cos(115)}{1 + \sin(115 - 25)} + \cos(25) \right] \quad (7)$$

$$y(115) = -1.3 \left[\frac{\cos(25) \cos(115-25) + (115+90+25) \left(\frac{\pi}{180}\right) \sin(115)}{1 + \sin(115-25)} - \sin(25) \right]$$

Obteniendo los puntos:

$$X_E = 2.28 \quad Y_E = -1.82$$

Para punto C con $t = 195^\circ$

$$x(195) = 1.3 \left[\frac{\sin(25) \cos(195-25) - (195+90+25) \left(\frac{\pi}{180}\right) \cos(195)}{1 + \sin(195-25)} + \cos(25) \right]$$

$$y(195) = -1.3 \left[\frac{\cos(25) \cos(195-25) + (195+90+25) \left(\frac{\pi}{180}\right) \sin(195)}{1 + \sin(195-25)} - \sin(25) \right]$$

Obteniendo los puntos:

$$X_D = 7.06 \quad Y_D = 3.24$$

Tabla 14. Puntos de curvas de CPC

DISEÑO DE INVOLUTAS Y CÚSTICAS					
INVOLUTA	LADO IZQUIERDO		LADO DERECHO		Puntos
t	X	Y	X	Y	
0	0	-1.30	0.00	-1.30	Punto A
90	-1.30	-2.04	1.30	-2.04	Punto M
115	-2.28	-1.82	2.28	-1.82	Punto B
195	-7.06	3.24	7.06	3.24	Punto C

Fuente: Elaboración propia

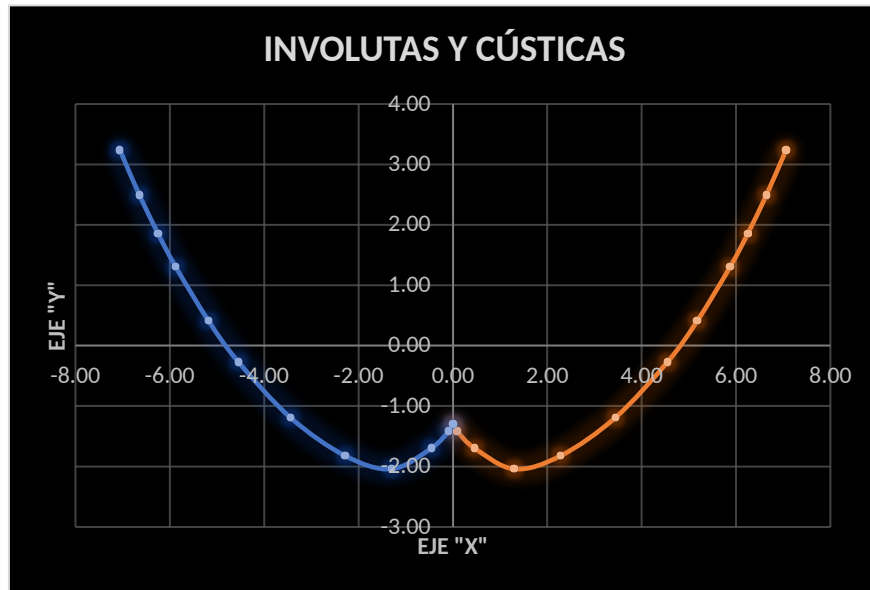


Figura 89. Curvas involutas y acusticas

Fuente: Elaboración propia

La concentración geométrica conforme a la ecuación 4:

Datos:

$$\Theta_0 = 25^\circ$$

$$C = \xi?$$

$$C = \left(\frac{1}{\sin(25^\circ)} \right) = 2.36 \quad (4)$$

$$C = 2.36$$

De acuerdo con la ecuación 9 la relación absorbida por unidad de área del colector será:

Datos:

$$S: \xi? \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$F: 1$$

$$G_{bn}: 865 \text{ W/m}^2 \quad S = 1(865 \text{ W/m}^2) (\cos 25) (0.88) (0.95)^{0.72} (0.95) + (186/2.3 \text{ W/m}^2) (0.88)$$

$$\Theta_0: 25 [^\circ] \quad (0.95)^{0.72} (0.95) \quad (8)$$

$$\tau_{cb}: 0.88 [] \quad S = 697 \text{ W/m}^2$$

$$\tau_{cpc,b}: 0.95 []$$

$$\alpha_b: 0.95 []$$

$$\frac{Gd}{C}: 186/2.3 \text{ W/m}^2$$

$$\tau_{c,d}: 0.88 []$$

$$\alpha_d: 0.95 []$$

La eficiencia térmica se calcula conociendo el valor de la radiación absorbida por unidad de área y la radiación solar incidente para encontrar la primera eficiencia teórica:

Datos:

$$S = 697 \text{ W/m}^2$$

$$I_b + I_d = 1051 \text{ W/m}^2$$

$$\eta_t = \frac{697 \text{ W/m}^2}{1051 \text{ W/m}^2} = 0.6631 \approx 70\% \quad (9)$$

$$\eta_t = 70\%$$

La eficiencia óptica utilizando fichas técnicas de los materiales y conforme a la ecuación 11 se tiene que:

Datos:

$$\omega: 0.96 []$$

$$\tau: 0.88 []$$

$$\alpha: 0.95 []$$

$$\vartheta: 0.15 []$$

$$\eta_o = (0.96) (0.88) (0.95) (1-0.15) = 0.6821 \approx 70\% \quad (10)$$

$$\eta_o = 70\%$$

La eficiencia total obteniéndolo de la multiplicación de las dos eficiencias anteriores.

Datos:

$$\eta_o = 0.7$$

$$\eta_t = 0.7$$

$$\eta_T = (0.7) (0.7) = 0.49 \approx 50\% \quad (11)$$

$$\eta_T = 50\%$$

La temperatura de estancamiento se deduce utilizando la constante de Stefan-Boltzmann, la eficiencia óptica, la concentración geométrica y la radiación incidente.

La temperatura de estancamiento es:

Datos:

$$\eta_o: \text{Eficiencia óptica. []}$$

$$G_s: \text{Irradiancia a la superficie. [W/m}^2]$$

$$C_g: \text{Concentración Geométrica. []}$$

$$p: \text{pérdidas. []}$$

$$\varepsilon: \text{Emisividad. []}$$

$$\sigma: \text{Constante de Stefan-Boltzmann. [W/m}^2\text{K]}$$

$$T_s = \left[\frac{(0.7) \left(700 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) (2.3)}{(1+0.2) (0.9) \left(5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2(\text{k})} \right)} \right]^{\frac{1}{4}} = 98^\circ \text{C}$$

(12)

$$T_s = 98^\circ \text{C}$$

La capacidad del colector viene determinada por las medidas del concentrador diseñado y el diámetro del absorbedor, y posteriormente multiplicado por la cantidad que habrá en el campo de colectores.

Datos:

$V = \text{¿? [cm}^3\text{]}$

$D = 2.54 \text{ cm}$

$l = 200 \text{ cm}$

$$V = \left(\frac{(n)(2.54 \text{ cm})^2}{4} \right) (200 \text{ cm}) = (1014 \text{ cm}^3)(10 \text{ tramos de tubería}) = 10014 \text{ cm}^3$$

(13)

$\text{Si } 1 \text{ cm}^3 = 0.001 \text{ lt}$

$10014 \text{ cm}^3 \text{ a lt} = 10 \text{ lt}$

(10lt) (25 colectores concentradores) = 250 lt en los colectores más la tubería (que va del colector y constituye el serpentín) sería aproximadamente 255 litros.

Los 25 colectores concentradores salieron del dimensionamiento calculado en la cantidad de colectores requeridos

5.2 Análisis y resultados de la placa radiante

Se conoce: Diámetro externo del serpentín $D_{ext}=0.0254 \text{ m}$, diámetro interno del serpentín $D_{i=0.016129 \text{ m}}$, flujo másico de aceite $\dot{m}=0.2 \text{ kg/s}$, temperatura media del aceite $T_m=80^\circ \text{ C}$.

Datos:

Propiedades del aceite a 80 °C

Densidad	827.2 kg/m ³
Viscosidad cinemática ν	1.1338E-05 m ² /s
Calor específico	2110.1472 J/kg.K
Conductividad térmica	0.1376 W/m.K
Numero de Prandtl	139.8

Se busca: Temperatura en la placa T_p .

Suposiciones:

- Para resolver se supone que el problema se comporta como una configuración geométrica infinitamente larga (2D) de “Plano infinito y fila de cilindros”. La expresión ocupada para la ecuación 15.
- Las superficies se comportan como cuerpos negros.
- Se desprecia la resistencia por conducción en la pared del tubo.
- Flujo totalmente desarrollado.
- La temperatura en la superficie exterior del tubo se fijó en $T_s=78^\circ\text{C}$.

Desarrollando balance de energía sobre una sección del serpentín:

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección y $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

Sabemos que $D=0.0254\text{ m}$ y $S=0.120\text{ m}$, por lo tanto, $\frac{D}{S}=0.21167$, y el factor de visión está dado por la ecuación 14:

Datos:

$F_{ps}=?$

$D= 0.025\text{ m}$

$S= 0.120\text{ m}$

$$F_{ps} = 1 - \left[1 - (0.21167\text{ m})^2 \right]^{\frac{1}{2}} + (0.21167\text{ m}) \tan^{-1} \left(\frac{0.120\text{ m}^2 - 0.0254\text{ m}^2}{0.0254\text{ m}^2} \right)^{1/2} = 0.31$$

(14)

Para calcular la viscosidad dinámica se realiza la siguiente sustitución en la ecuación 19.

Datos:

$\mu=?$

$\rho= 827.2\text{ kg/m}^3$

$v= 1.1338 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$

$$\mu = (827.2\text{ kg/m}^3) (1.1338 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}) = 0.00937879\text{ Ns/m}^2$$

(19)

El próximo paso consiste en determinar el tipo de flujo de aceite en el tubo. Para conocer el tipo de flujo se calcula el número de Reynolds dado por la ecuación 18.

Datos:

$$\Re_D = ?$$

$$\dot{m} = 0.2 \text{ kg/s}$$

$$D = 0.0254 \text{ m}$$

$$\mu = 0.00937879 \text{ Ns/m}^2$$

$$\Re_D = \frac{4(0.2 \text{ kg/s})}{\pi(0.0254 \text{ m})(0.00937879 \text{ Ns/m}^2)} = 1683.4$$

(18)

Dado el resultado, el flujo es laminar.

El coeficiente de convección para flujo laminar se puede determinar con la siguiente relación.

Datos:

$$h = ?$$

$$k = 0.1376 \text{ W/mK}$$

$$D = 0.0254$$

$$h = \frac{4(0.1376 \frac{\text{W}}{\text{mK}})}{0.0254 \text{ m}} = 21.67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

(20)

A continuación, se debe determinar la relación de áreas del tubo con relación a la placa:

Datos:

$$D = 0.0254 \text{ m}$$

$$S = 0.120 \text{ m}$$

$$\frac{A_s}{A_p} = \frac{\pi(0.0254 \text{ m})}{2*0.120 \text{ m}} = 0.33$$

(21)

Finalmente, de la ecuación 21 sustituyendo los datos:

Datos:

$$\frac{A_s}{A_p} = 0.33$$

$$h = 21.67 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$F_{ps} = 0.31$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$(T_p^4 - T_s^4) = (0.33) \frac{\left(21.67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right) (T_s - T_m)}{(0.31) \left(5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}\right)}$$

$$(T_p^4 - T_s^4) = (4.10 \times 10^8) (T_s - T_m) \quad (22)$$

Usando $T_s = 351.15 \text{ K}$ y $T_m = 353.15 \text{ K}$, y resolviendo por ensayo y error, se encontró la temperatura de la placa con esta configuración:

$$T_p = 346.32 \text{ K} = 73.17^\circ \text{C}$$

5.3 Análisis y resultados del intercambiador y colector concentrador

El análisis del intercambiador va de la mano con el campo de colectores concentradores y se realiza de la siguiente manera:

Para saber el calor necesario de la placa de cobre se necesita saber el área del laminador.

$$A_L = (119 \text{ cm}) (76 \text{ cm}) = 9044 \text{ cm}^2 \quad (23)$$

Quitando marcos de la madera del laminador queda el área de la placa ocupando la ecuación 23.

$$A_{Cu} = (101.9 \text{ cm}) (72.4 \text{ cm}) = 7377.56 \text{ cm}^2$$

Luego para calcular la masa de la placa de cobre con espesor de 2mm empleando la ecuación 24.

$$V_{\text{Cu}}: (7377.56 \text{ cm}^2) (0.2\text{cm}) = 1475.51 \text{ cm}^3 \quad (24)$$

Y por último sabremos la masa del cobre con la ecuación 25.

$$m_{\text{Cu}} = (8.90 \text{ gr/cm}^3) (1475.51 \text{ cm}^3) = 13 \text{ kg} \quad (25)$$

5.4 Cálculo de calor requerido para la placa de cobre

Se realiza mediante el calor requerido en la placa calefactora, calculando la cantidad de *calor requerido* para elevar la temperatura de una placa de cobre de 13 kg de 20 °C a 80 °C.

Datos:

$$Q_{\text{pCu}} = ?$$

$$C_{\text{pCu}} = 390 \text{ J/kgK}$$

$$T_i = 80 \text{ °C}$$

$$T_f = 20 \text{ °C}$$

$$m = 13 \text{ kg}$$

Sustituyendo:

$$Q_{\text{pCu}} = (13 \text{ kg}) (390 \text{ J/kg K}) (353.15 \text{ K} - 293.15 \text{ K})$$

$$Q_{\text{pCu}} = \underline{304200 \text{ J}} = 304.2 \text{ kJ} \quad (27)$$

5.5 Cantidad de colectores requeridos

Calculando el área de los colectores sabiendo que su eficiencia es de 0.7 con un flujo de aceite de 0.2 m³/s con capacidad calorífica de 2110.15 J/kgK, con una temperatura de entrada de 20 °C y de salida de 98 °C.

Datos:

$$m = 0.2 \text{ kg/s}$$

$$\eta = 0.7$$

$$C_{\text{pAceite}} = 2110.15 \text{ J / kg K}$$

$$T_{\text{in}} = 371.15 \text{ K}$$

$$T_{\text{out}} = 293.15 \text{ K}$$

$$A_c = ?$$

$$A_c = \frac{(0.2 \text{ kg/s})(2110.15 \text{ J/kgK})(371.15 \text{ K} - 293.15 \text{ K})}{(0.7)(700 \text{ W/m}^2)}$$

$$(28)$$

$$A_c = 67.18 \text{ m}^2$$

Entonces el número de colectores es:

$$\# \text{ colectores} = \frac{67.18 \text{ m}^2}{2.6 \text{ m}^2} =$$

25 colectores con micro concentración.

5.6 Calor suministrado por los colectores concentradores

En este apartado calculamos los calores suministrados a distintas horas en el mes de agosto con la radiación promedio, un caso para 1 colector y otro para los 25 colectores a utilizarse.

- Entonces calculando el calor suministrado por 1 colector concentrador de 6:00 a 19:00 conociendo la radiación por horas promedio del mes de agosto.

Datos:

$$Q_{\text{sum}} = \text{¿?}$$

$$G = 700 \text{ W/m}^2$$

$$A = 2.60 \text{ m}^2$$

$$\eta = 0.70$$

Sustituyendo:

$$Q_{\text{sum}} = (700 \text{ W/m}^2)(2.60 \text{ m}^2)(0.70) \quad (29)$$

$$Q_{\text{sum}} = 1274 \text{ W} = 1274 \text{ J/s}$$

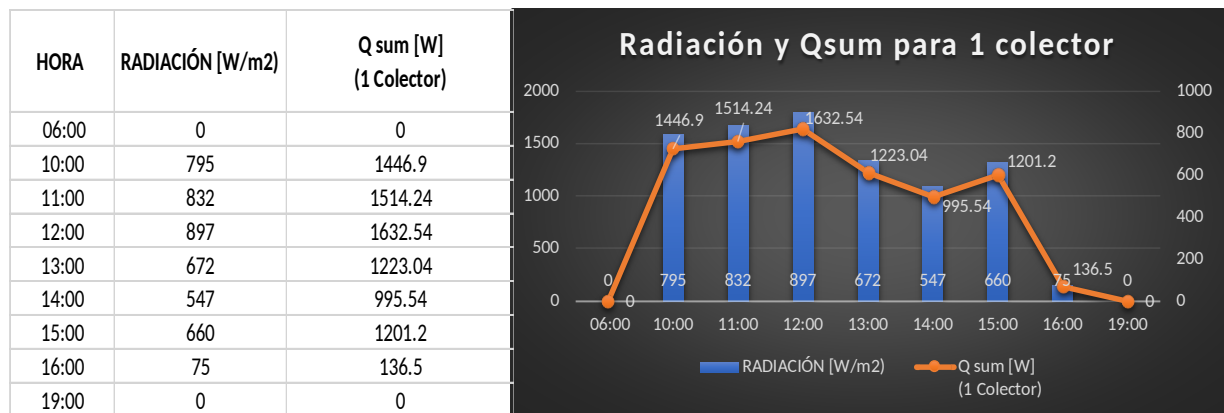


Figura 90. Radiación y calor suministrado para 1 colector

Fuente: Elaboración propia con datos de (NASA, 2024)

En la figura 90 podemos ver que el calor suministrado por 1 colector varía conforme a la radiación si es más alta esta como por ejemplo a las 12:00 h que se tiene 897 W/m² se obtendrá un calor de 1632 W y si es más bajo como a las 16:00 h con radiación de 75 W/m² el calor suministrado será de 136.5 W.

- Calculando el calor suministrado por 25 colectores concentrador de 6:00 a 19:00 conociendo la radiación por horas promedio del mes de agosto.

Datos:

$$Q_{sum} = \text{¿?}$$

$$G = 700 \text{ W/m}^2$$

$$A = 65 \text{ m}^2$$

$$\eta = 0.70$$

Sustituyendo:

$$Q_{sum} = (700 \text{ W/m}^2)(65 \text{ m}^2)(0.70) \quad (29)$$

$$Q_{sum} = 1274 \text{ W} = 1274 \text{ J/s}$$

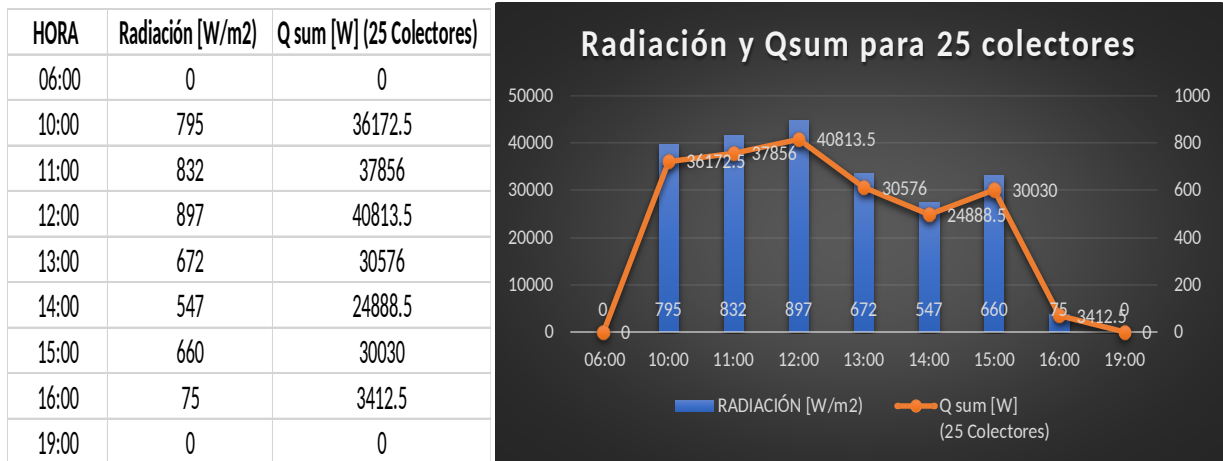


Figura 91. Radiación y calor suministrado para 25 colectores

Fuente: Elaboración propia con datos de (NASA, 2024)

En la figura 91 podemos visualizar que el calor suministrado por 25 colectores varía conforme a la radiación si es más alta esta como por ejemplo a las 12:00 h que se tiene 897 W/m² se obtendrá un calor de 1632 W y si es más bajo como a las 16:00 h con radiación de 75 W/m² el calor suministrado será de 3412.5 W.

5.7 Balance medioambiental

Para saber el impacto ambiental que tendría la implementación del sistema de concentración solar partimos de lo que el laminador fotovoltaico convencional contamina en un día suponiendo que este trabaja 8 horas al día para cocinar 8 paneles solares ya que cada módulo fotovoltaico se produce en 1 hora y el sistema de concentración cubre 5 horas de las totales.

Los datos de los cuales se parte son que el laminador tiene una potencia de 1500W y tomando en cuenta el Factor de emisión como se puede ver en el Anexo 4 se procede a calcular de la siguiente manera:

Datos:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{FE} &= 0.438 \\
 \text{tCO}_2\text{e/MWh *año} & \quad \mathbf{Emisiones evitadas} = (2.71 \text{ MWh})(0.438 \text{ t CO}_2\text{e/MWh * año}) \quad \mathbf{(30)} \\
 \mathbf{EC} &= (4.3) (0.63) = \\
 2.71 \text{ MWh} & \quad \quad \quad = 1.187 \text{ tCO}_2\text{e/año}
 \end{aligned}$$

Las emisiones que se evitarían serían de 1.187 tCO₂e/año con generación de energía solar de concentración del 63% de 4.3 MWh contribuyendo al sistema eléctrico.

5.8 Balance económico

Para realizar el balance económico se toman en cuenta los 25 colectores propuestos con un costo unitario de \$8,000 MXN los cuales nos ayudarán a sustituir el 63% de la energía eléctrica convencional y se observa en la tabla 15 que el beneficio sin deducción es en el año 19 y con deducción en el año 15 que se puede ver en la figura 90 tomando en cuenta el costo de tarifa eléctrica GMTH en el horario intermedio con un costo de 1.96 \$/kWh y suponiendo un incremento de 8% de inflación año con año en la delegación Benito Juárez cuando el horario de trabajo del laminador es de 10 am a 6 pm.

Considerando que el proyecto es de largo plazo, la evaluación económica debe hacerse a valor presente (VP), considerando una tasa de descuento; es decir, con una tasa de interés que podría dar el banco por invertir 200 mil pesos.

Tabla 15. Evaluación económica

Incremento
tarifa [%] **8%**

Tasa de
descuento [%] **6%**

Años	Consumo Anual kWh (Actual)	Campo de colectores (kWh)	Tarifa Elec	Ahorro (\$)	Utilidades a VP (\$)	
			Consumo (\$/kWh)		Sin Deduccion	Con Deduccion
0					(\$200,000.00)	(\$200,000.00)
1	4,380	2,738	\$ 1.96	\$ 5,358.66	-\$194,945	-\$134,945
2	4,380	2,721	\$ 2.11	\$ 5,752.62	-\$189,825	-\$129,825
3	4,380	2,705	\$ 2.28	\$ 6,175.56	-\$184,640	-\$124,640
4	4,380	2,689	\$ 2.47	\$ 6,629.58	-\$179,388	-\$119,388
5	4,380	2,672	\$ 2.66	\$ 7,116.99	-\$174,070	-\$114,070
6	4,380	2,656	\$ 2.88	\$ 7,640.23	-\$168,684	-\$108,684
7	4,380	2,640	\$ 3.11	\$ 8,201.94	-\$163,229	-\$103,229
8	4,380	2,625	\$ 3.35	\$ 8,804.95	-\$157,705	-\$97,705
9	4,380	2,609	\$ 3.62	\$ 9,452.29	-\$152,110	-\$92,110
10	4,380	2,593	\$ 3.91	\$10,147.22	-\$146,444	-\$86,444
11	4,380	2,578	\$ 4.23	\$10,893.25	-\$140,706	-\$80,706
12	4,380	2,562	\$ 4.56	\$11,694.12	-\$134,894	-\$74,894
13	4,380	2,547	\$ 4.93	\$12,553.87	-\$129,008	-\$69,008
14	4,380	2,531	\$ 5.32	\$13,476.83	-\$123,048	-\$63,048
15	4,380	2,516	\$ 5.75	\$14,467.65	-\$117,011	-\$57,011
16	4,380	2,501	\$ 6.21	\$15,531.31	-\$110,897	-\$50,897
17	4,380	2,486	\$ 6.71	\$16,673.17	-\$104,705	-\$44,705
18	4,380	2,471	\$ 7.24	\$17,898.98	-\$98,434	-\$38,434
19	4,380	2,456	\$ 7.82	\$19,214.91	-\$92,083	-\$32,083
20	4,380	2,442	\$ 8.45	\$20,627.59	-\$85,652	-\$25,652
21	4,380	2,427	\$ 9.12	\$22,144.13	-\$79,138	-\$19,138
22	4,380	2,413	\$ 9.85	\$23,772.17	-\$72,541	-\$12,541
23	4,380	2,398	\$ 10.64	\$25,519.90	-\$65,860	-\$5,860
24	4,380	2,384	\$ 11.49	\$27,396.12	-\$59,094	\$906
25	4,380	2,369	\$ 12.41	\$29,410.29	-\$52,241	\$7,759
26	4,380	2,355	\$ 13.41	\$31,572.53	-\$45,301	\$14,699
27	4,380	2,341	\$ 14.48	\$33,893.74	-\$38,273	\$21,727

Fuente: Elaboración propia

Entonces en la figura 92 se observa el flujo de efectivo sin ningún tipo de estímulo fiscal y entonces nuestro retorno de inversión no se ve reflejado después del año 27 que es mayor a el tiempo de vida de los colectores de 25 años.

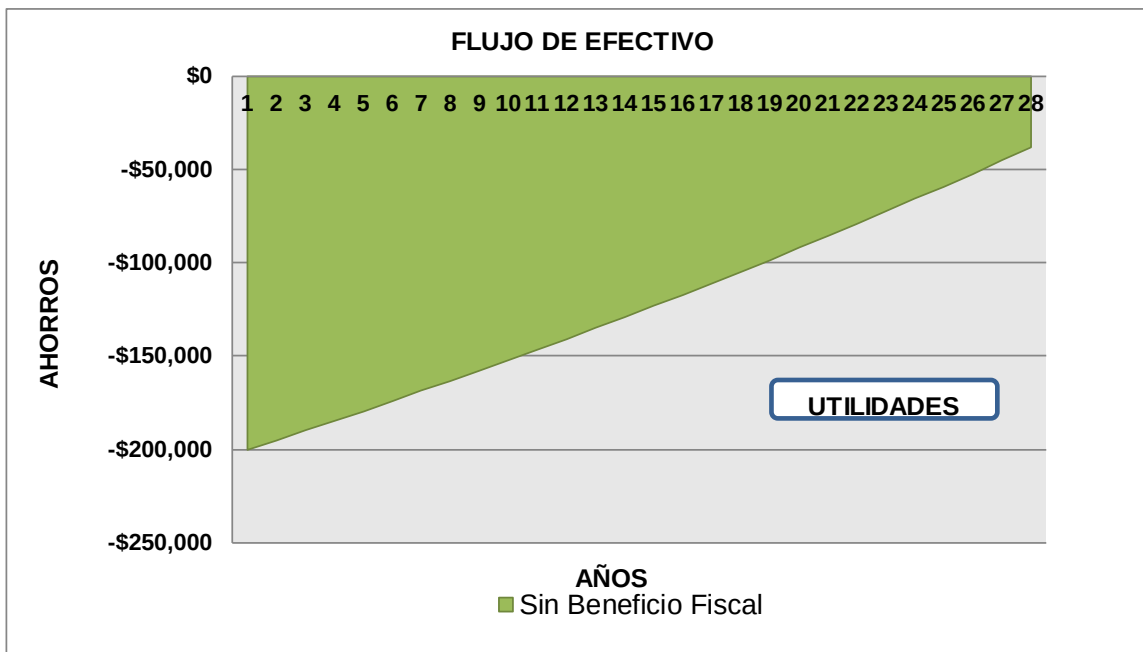


Figura 92. Retorno de inversión sin beneficio fiscal

Para la figura 93 se observa el flujo de efectivo, pero esta ocasión con un beneficio fiscal y que nos daría un retorno de inversión en el año 24.

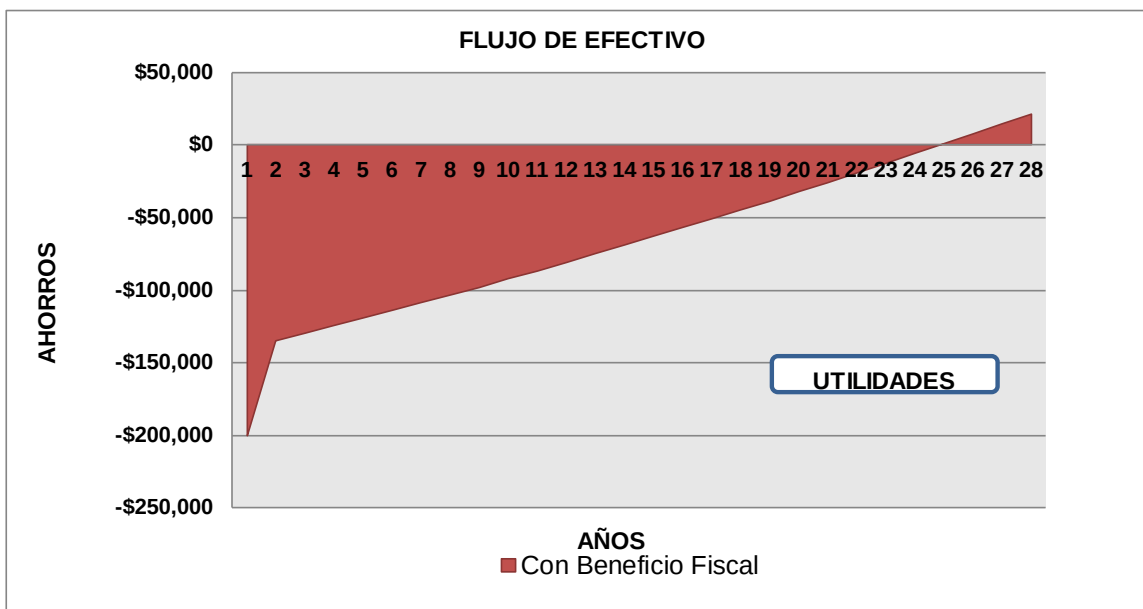


Figura 93. Retorno de inversión con beneficio fiscal

Referente a los beneficios fiscales el artículo 34 fracción XIII que se puede ver en el Anexo 5 referente a “Porcentajes de deducción de activos fijos” de la legislación mexicana la cual permite

la deducción total del costo de los equipos destinados a la generación de energía renovable o sistemas de cogeneración de electricidad eficiente.

Existiendo dos métodos principales para deducir impuestos al invertir en energía solar:

1. Arrendamiento puro del Activo:

Mediante un contrato de arrendamiento puro, se puede deducir el 100% de la factura mensual, considerada como la renta de un activo para el uso de la empresa.

2. Compra del Activo:

Al adquirir el sistema solar y pagar el costo total del proyecto, se puede deducir el 100 % de este gasto, como lo establece claramente el artículo 34 de la ley del ISR, debido a su condición de generador de energía limpia.

Conclusiones

En el diseño y simulación del concentrador solar para suministrar calor de proceso a un laminador de paneles solares, se establecieron los cálculos necesarios para llegar a una primera fase de prototipado que cumpla con los requisitos mínimos para el precalentamiento de nuestro fluido caloportador siendo un aceite térmico que por parte de nuestro colector solar con microconcentradores ayuda a que éste eleve su temperatura de 83°C a 100°C lo que permite consumir menos electricidad para el ensamble de los paneles solares, con lo cual se logra uno de los objetivos planteados.

Los cálculos realizados para el colector concentrador diseñado tienen eficiencias térmicas y ópticas aproximadas al 70%, los colectores solares que se encuentran en el mercado trabajan entre los rangos de 70% a 80% de eficiencia, lo cual nos indica un buen resultado.

El funcionamiento óptimo de esta máquina híbrida obedece a variables como el tiempo de uso en el cual el laminador híbrido funcionará con energía solar térmica aportando poco más del 60% del calor total para elevar la placa de cobre de 2 mm a una temperatura mayor a 80°C por medio del fluido caloportador del campo de colectores, así se puede establecer que el horario de trabajo sea en las horas de más irradiación por ejemplo entre 10:00 y 15:00 horas cumpliendo un turno de 8 horas en las cuales se necesite menos aporte eléctrico cumpliendo el objetivo fundamental que la fabricación del panel fotovoltaico sea más amigable al ambiente.

Dicha máquina podría producir 2,544 paneles solares al año con al menos 60% de energía renovable de concentración proveniente del sol; además se evitarían anualmente 1.187 tCO₂.

En el balance económico, los resultados parecieran no ser tan atractivos por el momento, ya que la inversión se recuperaría en 24 años con beneficio fiscal y en 27 años sin dicho beneficio, lo cual sería complicado por el momento invertir en esta tecnología, aunque el costo de ello promete su viabilidad en un futuro no muy lejano.

Recomendaciones

En el caso del Colector Concentrador

- Proponer un sistema de seguimiento de un eje o dos ejes para el concentrador solar y se aproveche más la energía del sol.
- En su diseño se le podrían incorporar unas parábolas transversales al colector para tener mayor concentración.
- El elegir materiales que contribuyan a una eficiencia óptica mayor puede contribuir a aumentar la eficiencia total del sistema colector concentrador.

En el caso del Laminador

- El laminador tiene capacidad para ensamblar módulos pequeños en comparación a los que se fabrican en la actualidad, esto puede modificarse aumentando el área de la plancha, modificando varios elementos como el intercambiador de calor, número de colectores con microconcentradores, debido a que se requeriría un flujo de aceite mayor. Esto también nos llevaría a un sistema más robusto con más espacio y mayor inversión.
- El sistema de control puede ayudar a optimizar el sistema, agregando puntos de medición de temperatura y poder controlar en secciones de T1 hasta T4 por ejemplo, con controladores PID.
- El diseño del laminador puede tener múltiples variantes como integrarle un sistema con cilindros hidráulicos para ascenso y descenso. Y con esto integrarse un panel solar de las dimensiones de la máquina para suministrarle energía solar fotovoltaica a las resistencias calefactoras y así cada vez depender menos de la electricidad.
- En el balance económico se podría buscar un fideicomiso para poder impulsar este tipo de proyectos de energía renovable que lo haga viable a nivel industrial como el de “Eficiencia Energética en empresas para la optimización de procesos” del FIDE.

Bibliografía

IMP, 2018: , (IMP, 2018),
S, The potential of solar industrial process heat applications, Applied energy., 2003: , (S, The potential of solar industrial process heat applications, Applied energy., 2003),
(ONU, 2024: , (ONU, 2024),
(NASA, 2024: , (NASA, 2024),
(POWER DAVe, 2024: , (POWER DAVe, 2024),
SENER, Prospectiva de energías renovables 2020-2036, 2020: , (SENER, Prospectiva de energías renovables 2020-2036, 2020),
(SENER, Prospectiva de energías renovables 2020-2036, 2020: , (SENER, Prospectiva de energías renovables 2020-2036, 2020),
(Ortega, 2018: , (Ortega, 2018),
(AI, 2024: , (AI, 2024),
(Valladares & Figueroa, 2017: , (Valladares & Figueroa, 2017),
Valladares & Figueroa, 2017: , (Valladares & Figueroa, 2017),
(Lavati, 2018: , (Lavati, 2018),
(Heliosfera, 2021: , (Heliosfera, 2021),
(TECPA, 2019: , (TECPA, 2019),
(APPA Renovables, 2022: , (APPA Renovables, 2022),
(APPA Renovables, 2022: , (APPA Renovables, 2022),
(IMP, 2018: , (IMP, 2018),
(Proméxico, GIZ, & IER, 2017: , (Proméxico, GIZ, & IER, 2017),
(Spencer, 2023: , (Spencer, 2023),
(Priestley, 1776: , (Priestley, 1776),
Lavoisier, 1865: , (Lavoisier, 1865),
(Montigny, 1774: , (Montigny, 1774),
(Cazar, 1982: , (Cazar, 1982),
(Lavoisier, 1865: , (Lavoisier, 1865),
(The history of using solar energy, 2017: , (The history of using solar energy, 2017),
(Solar cookers international, s.f.: , (Solar cookers international, s.f.),
(B. Sorensen, 2009: , (B. Sorensen, 2009),

(Perlín, 2017: , (Perlín, 2017),
(Land art generator, 2012: , (Land art generator, 2012),
(Howard, 2013: , (Howard, 2013),
(Álvarez, 2016: , (Álvarez, 2016),
Catalán, 2023: , (Catalán, 2023),
(Gómez, 2019: , (Gómez, 2019),
Rocha, 2016: , (Rocha, 2016),
(Rocha, 2016: , (Rocha, 2016),
(Loureiro, 2019: , (Loureiro, 2019),
Loureiro, 2019: , (Loureiro, 2019),
(IER, 2015: , (IER, 2015),
(Torresolarenergy, 2020: , (Torresolarenergy, 2020),
Mejia & Mora, 2018: , (Mejia & Mora, 2018),
Mejía, Rincón, & Rubio, 2021: , (Mejía, Rincón, & Rubio, 2021),
(Mejía, Rincón, & Rubio, 2021: , (Mejía, Rincón, & Rubio, 2021),
(S, The potential of solar industrial process heat applications, Applied energy., 2003: , (S, The
potential of solar industrial process heat applications, Applied energy., 2003),
Weis Werner, 2005: , (Weis Werner, 2005),
(Ortega H. , 2018: , (Ortega H. , 2018),
Mora & Mejía, 2023: , (Mora & Mejía, 2023),
(Mejia & Mora, 2018: , (Mejia & Mora, 2018),
(E., E.A, & D., 2020: , (E., E.A, & D., 2020),
(Sánchez & Torres, 2020: , (Sánchez & Torres, 2020),
(Jiménez, 2022: , (Jiménez, 2022),
Jiménez, 2022: , (Jiménez, 2022),
(labat, 2018: , (labat, 2018),
Cuytronic, 2017: , (Cuytronic, 2017),
(Dk solarenergy, 2022: , (Dk solarenergy, 2022),
(Dk solarenergy, 2022: , (Dk solarenergy, 2022),
(DS NEW ENERGY, 2019: , (DS NEW ENERGY, 2019),
Dk solarenergy, 2022: , (Dk solarenergy, 2022),
Dk solarenergy, 2022: , (Dk solarenergy, 2022),

(S.C, 2020: , (S.C, 2020),
S.C, 2020: , (S.C, 2020),
Larrey, 2016: , (Larrey, 2016),
(Larrey, 2016: , (Larrey, 2016),
Mejía E. A., 2010: , (Mejía E. A., 2010),
(Incropera & Dewitt, 1999: , (Incropera & Dewitt, 1999),
(Ansys, 2024: , (Ansys, 2024),
(Solidworks, 2023: , (Solidworks, 2023),
Ansys, 2024: , (Ansys, 2024),
Solidworks, 2023: , (Solidworks, 2023),
(A. Lentz, 2009: , (A. Lentz, 2009),
(Mejia & Mora, 2018: , (Mejia & Mora, 2018),
(P. Energy, 2024: , (P. Energy, 2024),
(Technologies, 2019: , (Technologies, 2019),
NASA, 2024: , (NASA, 2024),

Anexos

Anexo 1. Ficha técnica EVA



Technical Data

PHOTOCAP® 15580P

PHOTOCAP® 15580P is an ultra fast cure and PID resistant EVA (ethylene vinyl acetate copolymer) photovoltaic encapsulating film.

PHOTOCAP 15580P can be used for all crystalline silicon photovoltaic module constructions, and for many thin film photovoltaic designs. PHOTOCAP 15580P is provided as rolled film ready for use in thermal lamination processes. The material is self-priming for adhesion to glass. The same process equipment and conditions used for other ultra-fast cure PHOTOCAP EVA encapsulant can be used for this product.

Properties	Test Method ASTM	Units	Condition	Results
Physical Mechanical				
Tensile Strength	D638	MPa	23 °C, 250 mm/min elongation rate	15
Ultimate Elongation	D638	%	23 °C, 250 mm/min elongation rate	530
10% Secant Modulus	D638	MPa	23 °C, 250 mm/min elongation rate	24
Hardness	D2240	Shore A/D	23 °C	80 / 25
Adhesion to Glass	STR	N/cm	23 °C	130
MVTR	F1249	g/m ² /day	25 °C/100sccm flow, 100%RH	18
Water Absorption	D570	wt%	23 °C	< 0.1
Optical				
Optical Transmission	E424	%	23 °C, 0.46 mm thickness	91
UV Cutoff Wavelength	E424	nm	23 °C, 0.46 mm thickness	360
Refractive Index	D542	-	23 °C, 0.46 mm thickness	1.48
Electrical				
Volume Resistivity	D257	ohm cm	23 °C/50%RH	>1 x 10 ¹⁵
Dielectric Strength	D149	kV/mm	23 °C/50% RH, 500V/sec	>20

Tests are made in accordance with the current issue of the ASTM, or other cited test method. Test data reported here are nominal values measured on extruded films, 0.5 mm thick, or compression molded sheets and test bars, which have been cured at 150 °C for 7 minutes with a laboratory press. Optical measurements made with glass-EVA coupons with high transmission solar glass.

STR Locations

Email: sales@STRSolar.com
Tel: 1 860 272 4235

STR – United States of America
10 Water Street
Enfield, CT, USA 06082

STR – Malaysia
Plot D20, Jalan Tanjung A/3
Port of Tanjung Pelepas
Gelang Patah, Johor, Malaysia 81560

STR - Spain
Parque Tech de Asturias, Parcela
36
Llanera, Asturias, España
33428

STR – China
Changkun Ind. Park No.26
Nanxin Road, Sha Jiabang
Changshu, Suzhou, China 215542

WWW.STRSOLAR.COM

2015-01 SAF



Technical Data
page 2

PHOTOCAP® 15580P

AGENCY APPROVALS:

PHOTOCAP 15580P is a UL listed product in category QIHE2 Photovoltaic Polymeric Materials. Please refer to UL file number E310488.

PRODUCT VARIATIONS:

Suffix	Release Paper	Shrinkage	Notes
15580P/UF	Yes	Zero	STR's User Friendly (UF) technology allows sheets to be cut closer to size, resulting in less voids and shifting of ribbon and cells
15580P/UFP	No	Minimal	Paperless UF option, resulting in minimal shrinkage
15580P/PL	No	Higher than UF or UFP	Possesses a greater tendency to shrink but perfectly acceptable for use in most applications

PROCESS GUIDELINES:

Vacuum Lamination Step		Heat Cure Cycle	
Nominal Temperature	145 - 150°C	Platen Temperature	145 - 150°C
Vacuum Range	< 60 mbar	Cure Time	8 min
Evacuation Time	4 min	Applied Bladder Pressure	910 mbar
EVA Melting Range Via DSC	65 - 75°C	Target Temperature within the Encapsulant	140°C
		Time Above the Target Temperature	> 3 min

Processing conditions shown here are a recommended starting point for a crystalline silicon photovoltaic module processed with a typical 2-step vacuum lamination system. Actual values required to achieve desired cure levels will depend on the specific PV module design and the lamination process used.

The temperature of the encapsulant should be at or above the EVA melting range before pressure is applied for the cure cycle. The encapsulant should reach the target temperature during the cure cycle, and should remain above that target temperature for the time shown. Temperatures within encapsulant should be periodically measured with embedded thermocouples to assess temperature uniformity of the laminator heating plate and the rate of heat transfer to the PV module. More information about how to laminate PV modules with PHOTOCAP encapsulants is available from STR.

All PHOTOCAP grades are based upon over 30 years of STR's commercial experience in the photovoltaic market.

For further information, please contact the nearest Specialized Technology Resources office or agent.

PHOTOCAP® is a registered trademark of Specialized Technology Resources, Inc. The data set forth above is believed to be accurate. It is for informational purposes only and is not to be used for specification purposes. Neither Specialized Technology Resources, Inc., nor any of its affiliates, makes any representation or warranty as to, and disclaims all liability for, the information herein. PHOTOCAP is to be used by technically skilled persons at their own discretion and risk.

Anexo 2. Ficha técnica para tubo absorbedor 1” diámetro



FICHA TÉCNICA

LÍNEA CONDUCCIÓN INSTALACIONES DE GAS

CONDUCCIÓN DE FLUIDOS ASTM A-53 (NTC-3470) ERW
 CONDUCCIÓN DE FLUIDOS A PRESIÓN POCO CORROSIVOS
 ACEITE - AGUA - AIRE - GAS - VAPOR



ASTM A-53 (NTC-3470) ERW SCHEDULE 40 GRADO A

Cuando usted especifica un tubo marca COLMENA, cuenta con el respaldo y la garantía de calidad de la empresa líder en la fabricación de tuberías de acero, con 65 años de experiencia, atendiendo exitosamente los mercados nacionales e internacionales.

La tubería de acero ASTM A - 53 NTC-3470 es recomendada para instalaciones de Gas y Conducción de Fluidos poco corrosivos como aceite, aire, agua, gas y vapor a las y medias presiones.

MATERIALES DE FABRICACIÓN

Los tubos de acmamiento son fabricados con acero laminado en caliente según las normas AISI/SAE 1008, 1010, 1015 ASTM A 1011, JIS G 3113 SPHT o cualquier otro acero equivalente que cumpla la norma ASTM A53 (NTC - 3470) y que tenga la siguiente composición química:

COMPOSICIÓN QUÍMICA

ELMENTO	GRADO A	GRADO B
Carbono	0.25% máximo	0,30%
Manganeso	0.95% máximo	1,20%
Fósforo	0.050% máximo	0,05%
Azufre	0.045% máximo	0,045%

Los tubos especificados como grado B cuentan con tratamiento térmico a 540° C.

PROCESOS DE FABRICACIÓN

Los tubos COLMENA se fabrican con aceros e insumos cuidadosamente seleccionados, aplicando los procesos de conformado en frío y electrofusión (ERW).

La calidad de los tubos ASTM A - 53 está respaldada por el Sistema de Gestión de Calidad de COLMENA, el cual se ha establecido según los lineamientos de ISO 9001 : 2015 y certificado por Bureau Veritas Certification. Adicionalmente, esta línea de producto cuenta con la certificación de conformidad con la norma NTC - 3470.

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO

	GRADO A	GRADO B
Esfuerzo de fluencia psi (Min):	30.000	35.000
Esfuerzo de tensión psi (Min):	48.000	60.000
Porcentaje de Elongación:	20% en promedio	26% en promedio

TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN

TOLERANCIAS	
Longitud:	+1", - 0.5"
Diámetro Exterior:	
a. Para el tubo igual e inferior a 1 1/2 NPS:	+1/64" (0.4 mm)
b. Para el tubo igual o superior a 2" NPS:	+/- 1%
Sobre el espesor:	+/- 12.5% del espesor nominal de pared

www.tuboscolmenacom



Tel: (60+1) 724 4655 - PBX: (60+1) 728 0211 / 724 0171
 Calle 45 A Sur N° 60 - 57 - Sevillana - Bogotá / Colombia



Díámetro Nominal NPS Pulg	Díámetro Exterior Pulg	SCH	Espesor de Pared Pulg	Peso tubo 6 m Negro Kg	Peso Tubo 6 m Galvanizado Kg	Grado	Presión de Prueba psi
1/2"	0.840"	40	0.109"	7,62	7,89	A	700
3/4"	1.050"	40	0.113"	6,78	10,48	A	700
1"	1.315"	40	0.133"	15,00	15,48	A	700
1 1/4"	1.660"	40	0.140"	20,34	20,94	A	1200
1 1/2"	1.900"	40	0.149"	24,30	25,02	A	1200
2"	2.375"	40	0.154"	32,64	33,58	A	2300
2 1/2"	2.875"	40	0.203"	51,78	52,08	A	2500
3"	3.500"	40	0.216"	67,74	69,08	A	2220
4"	4.500"	40	0.237"	96,42	98,23	A	1900
6"	6.625"	40	0.280"	169,56	172,27	A	1520
8"	8.625"	40	0.322"	255,30	258,72	B	1570
10"	10.750"	40	0.369"	361,74	366,22	B	1430
12"	12.750"	40	0.406"	478,20	483,59	B	1340
16"	16.000"	40	0.500"	739,80	746,24	B	1310
20"	20.000"	30	0.500"	930,72	938,87	B	1050
24"	24.000"	XS	0.500"	1121,64	1131,51	B	880

PRUEBAS

Prueba NDT:	Según norma ASTM A-53 (NTC-3470)
Prueba hidrostática:	Según norma ASTM A-53 (NTC-3470)
Prueba neumática:	A presión de 100 psi por tubos de Ø 2 1/2" e inferiores
Prueba de aplastamiento:	Según norma ASTM A-53 (NTC - 3470)
Prueba de abocardado:	Según norma NTC-103
Prueba de doblez:	Según norma ASTM A-53 (NTC-3470)

TERMINADO INTERIOR

Los tubos se burilan interiormente en diámetros mayores a 1", el acabado de la superficie interiores razonablemente liso.

GALVANIZACIÓN

Para tubos de NPS 6 e inferiores se realiza por inmersión en caliente según la norma ASTM A - 53, garantizando un recubrimiento uniforme de zinc tanto interior como exterior cuyo peso promedio es de 0,55 kg/m². La calidad del zinc para revestimiento se garantiza según norma ASTM B6 SHG (Special High Grade).

www.tuboscolmeniacom



Tel: (60+1) 724 4655 - PBX: (60+1) 728 0211 / 724 0171
Calle 45 A Sur Nº 60 - 57 - Sevilla - Bogotá / Colombia



IDENTIFICACIÓN

Los tubos son identificados según la norma ASTM A-53 (NTC-3470) con la leyenda "COLMENA COLOMBIA ASTM A-53 A o B E SCH 40 DIA. (X'')", 6.00m", estampada en bajo relieve o estendida.

La letra X'' corresponde al diámetro nominal NPS.

Para tubos NPS 2 1/2 e inferiores el sello del logotipo COLMENA va estampado en bajo relieve en la superficie exterior de los tubos.

ROSCADO

Los tubos son roscados según norma ANSI B1.20.1 tipo NPT. Las roscas son protegidas con un protector plástico de acuerdo con los datos de la siguiente tabla:

DIÁMETRO DEL TUBO (Pulg)	COLOR DEL TAPÓN
1/2, 1 1/2, 2 1/2	● Amarillo
1/4, 3/4, 1 1/4	● Verde
3/8, 1, 2, 3, 4, 6	● Naranja

Cuando se especifique tubería sin rosca, los tubos se entregan biselados en sus extremos para facilitar su unión por procesos de soldadura.



www.tuboscolmenacom



Tel: (60+1) 724 4655 - PBX: (60+1) 728 0211 / 724 0171
Calle 45 A Sur Nº 60 - 57 - Sevilla - Bogotá / Colombia

Anexo 3. Ficha técnica del Aceite Mineral

ACEITE LUZAR TÉRMICO MINERAL

Descripción y aplicaciones:

El aceite Luzar Térmico Mineral se formula a base de parafinas seleccionadas para garantizar una buena resistencia a la oxidación y a la descomposición térmica.

Temperatura (°C)	Densidad (Kg.m ⁻³)	Viscosidad (mm ² /s)	Calor Específico (Kcal/Kg.K)	Conductividad Térmica (W/m.K)	Nº de Prandtl
0	880	287,9	0,432	0,145	3168
50	847	20,38	0,477	0,140	246
100	814	5,31	0,522	0,136	69
150	781	2,39	0,567	0,131	34
200	748	1,41	0,612	0,126	21
250	715	0,98	0,657	0,122	16
300	682	0,75	0,702	0,117	13
340	655	0,63	0,738	0,113	11

Características	Valor
Claro y Brillante	0,877
	30
	5,3
	105
	-12
	1,00068

...ados en los circuitos.
...rado.

Anexo 4. Factor de Emisión



Ciudad de México, a 29 DE FEBRERO DE 2024

AVISO

FACTOR DE EMISIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL 2023

A todos los Establecimientos Sujetos a Reporte, (ESR), Organismos de Certificación, Validación y Verificación de Gases de Efecto Invernadero, OC-VV-GEI, público en general.

Por este medio, se hace de su conocimiento que la Comisión Reguladora de Energía ha notificado a esta Secretaría que el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional para el cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por consumo de electricidad correspondiente al año 2023, es:

0.438 tCO₂e / MWh

Dicho factor se deberá emplear para fines del reporte al Registro Nacional de Emisiones, tomando en cuenta que este factor considera la generación de las centrales eléctricas que entregan energía a la red eléctrica nacional, de acuerdo con lo estipulado en la fracción XLIV del Artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica.

ATENTAMENTE



Registro Nacional de Emisiones

Av. Ejército Nacional 223 Col. Anáhuac | Sección, CP.
11320, Alcaldía Miguel Hidalgo, Ciudad de México
Teléfono: (55) 54900 900 Ext. 12052

Subsecretaría de Política Ambiental y Recursos Naturales
Dirección General de Políticas para la Acción Climática
Dirección de Políticas de Mitigación del Cambio Climático
Consultas: rene@semarnat.gob.mx
Análisis de Conflicto de Interés: col/rene@semarnat.gob.mx
Verificación del reporte al RENE: verificacion.rene@semarnat.gob.mx

Av. Ejército Nacional No. 223, Col. Anáhuac | Sección, C.P. 11320, Alcaldía Miguel Hidalgo, CDMX.
Tel (55) 5490 0900 www.gob.mx/semarnat

Anexo 5. Artículo 34. Porcentajes de deducción de activos fijos de la Ley del impuesto sobre la renta (SAT)

XIII. 100% para maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables o de sistemas de cogeneración de electricidad eficiente.

Para los efectos del párrafo anterior, son fuentes renovables aquéllas que por su naturaleza o mediante un aprovechamiento adecuado se consideran inagotables, tales como la energía solar en todas sus formas; la energía eólica; la energía hidráulica tanto cinética como potencial, de cualquier cuerpo de agua natural o artificial; la energía de los océanos en sus distintas formas; la energía geotérmica, y la energía proveniente de la biomasa o de los residuos. Asimismo, se considera generación la conversión sucesiva de la energía de las fuentes renovables en otras formas de energía.

Lo dispuesto en esta fracción será aplicable siempre que la maquinaria y equipo se encuentren en operación o funcionamiento durante un periodo mínimo de 5 años inmediatos siguientes al ejercicio en el que se efectúe la deducción, salvo en los casos a que se refiere el artículo 37 de esta Ley. Los contribuyentes que incumplan con el plazo mínimo establecido en este párrafo, deberán cubrir, en su caso, el impuesto correspondiente por la diferencia que resulte entre el monto deducido conforme a esta fracción y el monto que se debió deducir en cada ejercicio en los términos de este artículo o del artículo 35 de esta Ley, de no haberse aplicado la deducción del 100%. Para estos efectos, el contribuyente deberá presentar declaraciones complementarias por cada uno de los ejercicios correspondientes, a más tardar dentro del mes siguiente a aquél en el que se incumpla con el plazo establecido en esta fracción, debiendo cubrir los recargos y la actualización correspondiente, desde la fecha en la que se efectuó la deducción y hasta el último día en el que operó o funcionó la maquinaria y equipo.