

2021-06

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL EVAPORADOR DE UN PROTOTIPO DE DESALINIZACIÓN SOLAR

ANABALON BOHLE, SERGIO ALFONSO

<https://hdl.handle.net/11673/50621>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



**“ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL
EVAPORADOR DE UN PROTOTIPO DE
DESALINIZACIÓN SOLAR”**

SERGIO ALFONSO ANABALON BOHLE

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

PROFESOR GUÍA : DIPL. ING. UDO RHEINSCHMIDT

PROFESOR CORREFERENTE : PH.D ING. RODRIGO BARRAZA

JUNIO – 2021

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi madre Mónica su apoyo, esfuerzo y amor incondicional hicieron que fuera quien soy, le debo todo a ella.

Agradecer a mi hermana Carolina, si bien no somos los mejores amigos, siempre ha estado para apoyarme.

Agradecer también a mis tíos: Andrés y Guido. Que siempre han estado presentes en este camino dispuestos a ayudar en lo que sea.

Agradecer a mis amigos y amigas. A Pichicatas, Quien almuerza?, Drink team, entre tantos. Algunos vínculos se mantienen hasta el día de hoy, otros cumplieron su tiempo, pero aún así gracias a todas esas personas que dejaron algo de ellas en mi ser.

Finalmente agradecer a Maria Joaquina quien me apoyo y motivo para no perder la esperanza en este duro camino además de hacerme feliz cada día.

Resumen

El presente trabajo se centra en el análisis de un concentrador cilindro parabólico de radiación solar, para alimentar de energía térmica un desalinizador por evaporación. Este trabajo nace para mejorar el prototipo “Walfisch” el cual se diseño y materializo durante el año 2019 en ayuda al trabajo de memoria de Gonzalo Garcia.

Para desarrollar el modelo en primer lugar se analizo la situación actual del prototipo. Luego de una revisión bibliográfica se considero que el prototipo produce vapor de forma directa, con un proceso de recirculación [1], este proceso de recirculación cuenta con un estanque de separación desde donde se extrae el vapor. Con el fin de cuantificar la entrada de energía del concentrador, se utilizo el modelo geocéntrico de heliotecnia solar [2] para analizar la trayectoria solar en función del tiempo y la ubicación geográfica, para la magnitud de la radiación se utilizaron mediciones de la pagina “explorador solar” [3] para días de referencia. El software Tonatiuh [4] fue utilizado para la evaluación óptica del colector. Mediante un balance de energía se determino la producción de vapor y también la eficiencia del prototipo.

Además del modelo para evaluar el prototipo, se realizo un modelo similar para evaluar mejoras que buscan aumentar la producción de vapor particularmente aumentando la radiación de entrada y disminuyendo las perdidas térmicas.

Finalmente con la información obtenida se plantean cambios de configuración o rediseño que establecen nuevas disposiciones de los módulos y incorporación de un fluido de trabajo, con el fin de mejorar las falencias encontradas en cuanto a la desalinización y posterior presurización del agua para ser transportada aguas arriba. Se espera que este estudio sirva de motivación para seguir el desarrollo del prototipo e innovar en nuevas tecnologías que involucren la energía solar. Considerando el gran potencial de energía solar disponible en Chile, la utilización de desalinización solar podría ser una alternativa viable para la producción de agua potable en el futuro.

Glosario

Listado de símbolos y siglas

ERNC	Energías renovables no convencionales
FPC	Colectores de placa plana
ACS	Agua caliente sanitaria
ETC	Colectores de tubo al vacío
CSP	Energía solar concentrada
CCP	Colector cilindro parabólico
LFC	Colectores lineales Fresnel
PDR	Colector Disco Parabólico
SPT	Torre solar
UTC	Tiempo Universal Coordinado
TLE	Tiempo Local Estándar
ET	Ecuación del tiempo
TSM	Tiempo solar medio
TSA	Tiempo solar aparente
DNI	Radiación solar directa
GDV	Generación directa de vapor

Índice

Introducción	X
Capítulo 1: Marco Teórico	1
1.1. Radiación	1
1.1.1. Radiación directa	2
1.1.2. Radiación difusa	2
1.1.3. Radiación reflejada	2
1.1.4. Radiación global	3
1.2. Energía solar	4
1.2.1. Energía solar fotovoltaica	4
1.2.2. Energía solar térmica	5
1.2.2.1. Energía solar no concentrada	5
1.2.2.2. Energía solar concentrada	7
1.3. Desalinización	13
1.3.1. Métodos de desalinización	13
1.4. Heliotecnia	15
1.4.1. Ubicación geográfica	15
1.4.2. Huso horario :	17
1.4.3. Hora civil UTC	17
1.4.4. Ecuación del tiempo (ET)	17
1.4.5. Tiempo solar medio y aparente	18
1.4.6. Ángulo solares	19
1.4.7. Ángulos de superficie	20
1.4.8. Radiación incidente en superficies inclinadas	22
1.5. Concentrador cilindro parabólico	24
1.6. Perdidas y rendimiento	27
1.6.1. Perdidas ópticas	27
1.6.2. Perdidas geométricas	28
1.6.3. Perdidas térmicas	30
1.7. Fluidos de trabajo para un CCP	31
1.8. Generación de vapor con CCP	33

1.8.1. Generación directa de vapor	35
1.9. Convección	38
1.9.1. Resistencias térmicas	39
1.9.2. Coeficiente de transferencia de calor	40
Capítulo 2: Cuantificación y análisis de operación del prototipo construido.	42
2.1. Localización para puesta en marcha	42
2.2. Prototipo	43
2.2.1. Concentrador cilindro parabólico	45
2.2.2. Sistema fluido-portador	46
2.2.3. Estructura	48
2.2.4. Estanque separador	50
2.3. Principio de funcionamiento y parámetros de operación	51
2.4. Consideraciones del modelo	51
2.5. Balance de energía	52
2.5.1. Calor útil	53
2.5.2. Perdidas de calor	56
2.6. Presión parcial de gases	58
2.7. Temperatura	58
2.8. Calidad de vapor	59
2.9. Eficiencia global (η_G)	59
2.10. Resultados	60
2.10.1. Equinoccio de otoño	60
2.10.2. Solsticio de invierno	61
2.10.3. Equinoccio de primavera	62
2.10.4. Solsticio de verano	63
2.10.5. Análisis de resultados	64
Capítulo 3: Proponer mejoras y evaluar técnicamente.	67
3.1. Seguimiento solar	68
3.1.1. Resultados	69
3.1.2. Análisis de resultados	76
3.2. Aislar sistema fluido-portador	77
3.3. Aislar tubería de recirculación	77

3.3.1. Resultados	78
3.4. Cubierta tubería receptora	80
3.4.1. Resultados	81
Capítulo 4: Rediseño conceptual basado en resultados obtenidos.	83
4.1. Propuesta 1: Reorganización de prototipo actual	83
4.2. Propuesta 2: Utilizar fluido de trabajo	84
Conclusiones	86
Bibliografía	88
Anexos	90

Índice de figuras

0.1. Cartografía de radiación solar mundial [6]	XI
0.2. Radiación normal directa presente en Chile [6]	XI
0.3. Primera planta de desalinización solar	XII
1.1. Espectro de radiación solar	1
1.2. Tipos de radiación	3
1.3. Energía solar	4
1.4. Colectores de placa plana	5
1.5. Colectores de tubo al vacío	6
1.6. Tipos de colectores concentrados	7
1.7. Colectores Cilindro Parabólicos	8
1.8. Colectores lineales Fresnel	9
1.9. Colector Disco Parabólico	10
1.10. Torre Solar	11
1.11. Tipos de colectores, ratio de concentración y rango de temperatura	12
1.12. Latitud y longitud del mundo	16
1.13. Husos horarios estándares	17
1.14. cuadro de valor de Albedo típico para cada tipo de suelo	23
1.15. Tipos de seguimiento solar	25
1.16. Parámetros involucrados en las pérdidas ópticas	27
1.17. Pérdidas geométricas	29
1.18. Pérdidas por filas de colectores	30
2.1. Ubicación prototipo	42
2.2. Características de Laguna Verde mediante explorador solar	43
2.3. Diseño 3D utilizado para generar planos y comprar materiales.	44
2.4. Prototipo ensamblado y pintado	44
2.5. Parábola	46
2.6. Corte sistema fluido-portador	46
2.7. Diseño 3D columpio.	48
2.8. Diseño 3D soporte.	49
2.9. Estanque	50
2.10. Valores de declinación durante un año	52
2.11. Eficiencia óptica	54

2.12. 0°, 2° y 4° de incidencia	55
2.13. Gráfico Eficiencia v/s Ángulo de incidencia	55
2.14. Gráfico de resultado prototipo Equinoccio Otoño	60
2.15. Gráfico de resultado prototipo Solsticio de invierno	61
2.16. Gráfico de resultado prototipo Equinoccio de primavera	62
2.17. Gráfico de resultado prototipo Solsticio de verano	63
3.1. Eje Polar Norte-Sur con seguimiento Este-Oeste	68
3.2. Gráfico de resultado prototipo Equinoccio Otoño	70
3.3. Gráfico de resultado prototipo Solsticio de invierno	71
3.4. Gráfico de resultado prototipo Equinoccio de primavera	72
3.5. Gráfico de resultado prototipo Solsticio de verano	74
3.6. Sección tubería receptora	77
3.7. Sección tubería de recirculación	77
3.8. Sección tubería receptora	80
3.9. Sección tubería de recirculación	80
4.1. Diseño 3D propuesta 1.	83
4.2. Diseño 3D, propuesta 2.	84
4.3. Diseño 3D estanque separador, propuesta 2.	85
6.1. Agua saturada. Tabla de temperaturas	90
6.2. Agua saturada. Tabla de temperaturas (continuación)	91
6.3. Agua saturada. Tabla de presiones	92
6.4. Agua saturada. Tabla de presiones (continuación)	93
6.5. Propiedades del aire a la presión de 1 [atm]	94
6.6. Propiedades de metales sólidos	95
6.7. Propiedades relativas a la radiación solar de los materiales	96

Índice de cuadros

1.1. Día del año por meses.	18
2.1. Mediciones utilizadas Equinoccio de otoño	60
2.2. Mediciones utilizadas Solsticio de invierno	61
2.3. Mediciones utilizadas Equinoccio de primavera	62
2.4. Mediciones utilizadas Solsticio de verano	63
2.5. Resumen de resultados del prototipo	64
2.6. Razón entre radiación directa normal e incidente	65
2.7. Razón entre radiación normal incidente y calor útil	65
2.8. Razón entre calor útil y pérdidas térmicas	66
3.1. Mediciones utilizadas Equinoccio de otoño	69
3.2. Mediciones utilizadas Solsticio de invierno	71
3.3. Mediciones utilizadas Equinoccio de primavera	72
3.4. Mediciones utilizadas Solsticio de verano	74
3.5. Resumen de resultados del prototipo con seguimiento solar	76
3.6. Razón entre radiación directa normal e incidente con seguimiento solar	76
3.7. Resumen de resultados del prototipo con aislante térmico	78
3.8. Razón entre calor útil y pérdidas térmicas, de mejora aislante	79
3.9. Resumen de resultados del prototipo con cubierta	81
3.10. Razón entre calor útil y pérdidas térmicas, de mejora cubierta policarbonato	82

Introducción

El cambio climático es un desafío y una gran amenaza de la actualidad, modificando los patrones de condensación, precipitación y evaporación en todo el mundo. A medida que el clima de la Tierra se calienta, las sequías son cada vez más severas y frecuentes en regiones con un clima seco, disminuyendo o incluso agotando el recurso hídrico.

Pese a que el agua cubre el 70 % de la superficie del planeta, el 97 % de ella es salada. Solo el 2,5 % del agua de la Tierra es dulce, pero con un problema extra que el 90 % de ella está congelada. En definitiva, la humanidad depende del 0,5 % de agua dulce de depósitos subterráneos y del minúsculo 0,01 % de ríos y lagos[5].

A nivel global, el uso del agua se ha ido incrementando un 1 % anual desde los años 80. Las razones se explican en el aumento de la población, el desarrollo económico y modificaciones en los modelos de consumo. En este contexto, y según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos "No dejar a nadie atrás", se proyecta que el incremento de un 1 % por año se mantendrá, al menos, hasta el 2050, lo que representa un aumento del 20 al 30 % por encima del nivel actual de uso y consumo del agua.

Por esto es necesario generar procesos o tecnologías que puedan suplir la creciente demanda del recurso vital pero utilizando energías renovables de baja huella de carbono, aportando así a la raíz del problema. Una alternativa, que ya se utiliza, es procesar agua de mar que contiene un 96,5 % de agua y un 3,5 % para que esta sea apta para el consumo humano.

Para afrontar el desafío, y bajo el contexto investigativo de utilizar las energías que la naturaleza nos ofrece, se tiene como objetivo principal el buen funcionamiento de un prototipo de desalinización por concentración solar. Este prototipo, busca evaporar y bombear agua de mar mediante energía solar, para luego ser condensada y obtener agua des-mineralizada. Por lo cual, es ideal para zonas costeras en altura que no cuentan con acceso al agua potable. Se analizará el funcionamiento de mejoras en el prototipo que lo lleven a aumentar su eficiencia y la cantidad de agua producida.

Este proyecto al estar alimentado por energía solar se vuelve particularmente interesante

y aplicable, ya que esta es un área en la cual Chile tiene un gran potencial de desarrollo. Nuestro país cuenta con los índices de radiación más altos del mundo, los que se pueden encontrar específicamente en el Desierto de Atacama.

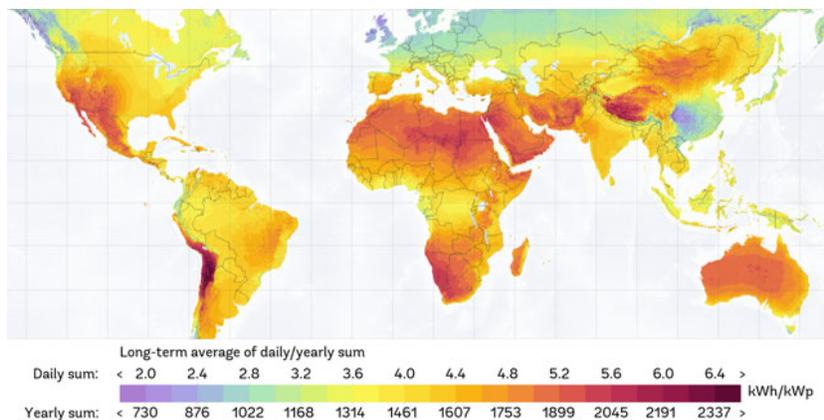


Figura 0.1: Cartografía de radiación solar mundial [6]



Figura 0.2: Radiación normal directa presente en Chile [6]

De hecho, uno de los hitos históricos más importantes de la energía solar, tomo lugar en este desierto, en donde el año 1872 se construyó una de las primeras planta desalinizadora

solar del mundo. Esta fue construida en la oficina salitrera Las Salinas por ingenieros británicos, y era capaz de producir hasta 5000 galones diarios de agua potable, la cual se obtenía a partir de agua existente en acuíferos subterráneos de la zona.[7]

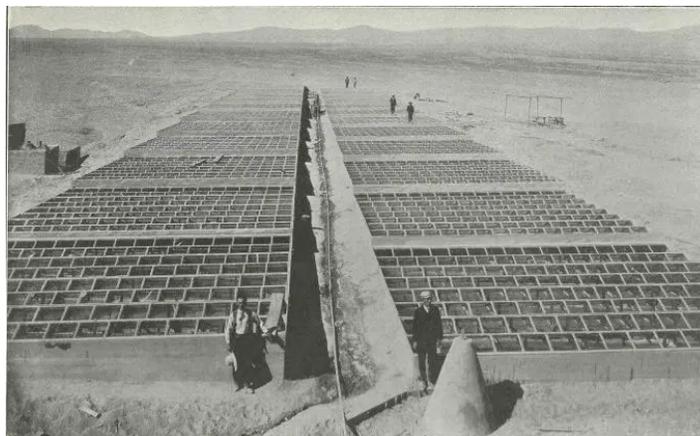


Figura 0.3: Primera planta de desalinización solar

Si bien en esa época ya se tenía una leve noción del potencial energético solar de nuestro país, hoy en día las expectativas son mucho mayores. Las energías renovables no convencionales (ERNC) están cada vez más presentes en la matriz energética chilena, constituyendo actualmente un 23 % de la red, porcentaje que se reparte principalmente en energía geotérmica, eólica, mareo-motriz, solar y pequeñas centrales hidráulicas. Y las energías con mayor desarrollo actualmente son la fotovoltaica y eólica [8]. Un ejemplo de este incesante crecimiento es el proyecto Cerro Dominador en la Región de Antofagasta, formado por una planta fotovoltaica con una capacidad de 100 [MW] y la recién inaugurada primera planta termo-solar de América Latina, con 110 [MW] de capacidad y 17,5 horas de almacenamiento térmico[9]. Esto refleja el enorme potencial e interés que existe hoy en día en nuestro país por desarrollar en la mayor medida posible la energía solar.

Marco de referencia.

Este trabajo nace para mejorar el prototipo “Walfisch” el cual se diseño y materializo durante el año 2019 en ayuda al trabajo de memoria de Gonzalo Garcia.

Objetivo general.

Evaluar y optimizar el funcionamiento del evaporador de un prototipo de concentración solar.

Objetivos específicos.

1. Analizar las tecnologías y funcionamiento de concentradores solares.
2. Cuantificar y analizar la operación del evaporador del prototipo construido.
3. Proponer mejoras y evaluar técnicamente.
4. Rediseño conceptual basado en resultados obtenidos.

Capítulo 1: Marco Teórico

En este capítulo se explican todos los conceptos básicos de aplicaciones y del estado del arte que se encuentran relacionados con la desalinización del agua, el uso de concentradores cilindro parabólicos y tecnologías solares afines.

1.1. Radiación

Para comprender de adecuadamente las tecnologías, aplicaciones y comportamiento de la energía solar, es necesario entender qué es lo que la compone, de dónde proviene y cuáles son sus características. Esta energía tiene su origen en el sol, estrella que posee una temperatura promedio de 5777 K, en la cual ocurren una serie de reacciones que culminan en la liberación de energía hacia el planeta tierra y cuerpos de la galaxia de forma isotrópica. Dicha energía liberada por el sol se considera se conoce como radiación solar, la cual se puede definir como la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas emitidas por el sol. Esta se puede presentar en tres tipos de ondas electromagnéticas según su longitud de onda: ultravioleta, visible e infrarroja.

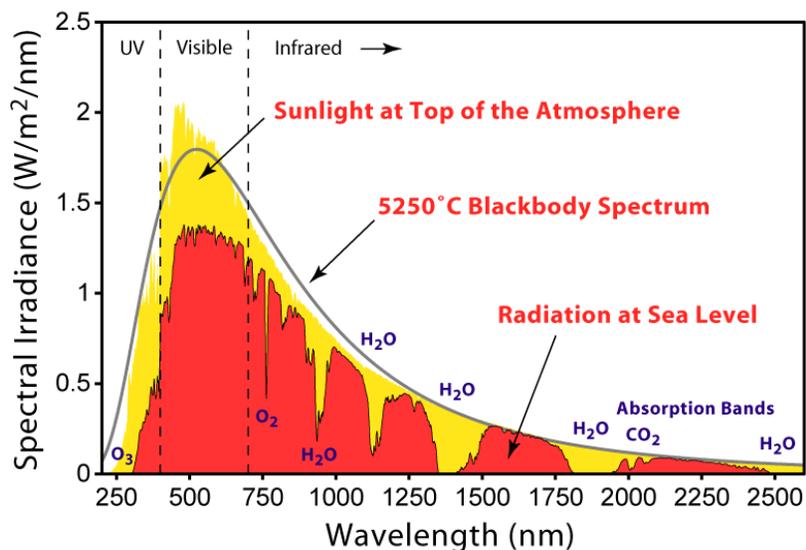


Figura 1.1: Espectro de radiación solar

Particularmente, en la tierra, la radiación debe atravesar la atmósfera, y al pasar a través de ésta sufre dispersión y absorción, lo que se conoce como atenuación atmosférica. Con esto la radiación se puede dividir en cuatro tipos diferentes de acuerdo a cómo sea la incidencia de sus rayos sobre la superficie.

1.1.1. Radiación directa

Radiación solar que no se ha dispersado atmosféricamente. Esta incide sobre una superficie en la dirección de los rayos solares.

1.1.2. Radiación difusa

También llamada radiación del cielo, corresponde a la componente de la radiación solar que ha cambiado su dirección debido a la interacción con la atmósfera. Incide sobre una superficie desde toda la bóveda celeste.

1.1.3. Radiación reflejada

Radiación solar que incide en el suelo u otro cuerpo sólido en la superficie terrestre y luego incide en la superficie de estudio. En la literatura también se le puede encontrar como radiación albedo.

1.1.4. Radiación global

Radiación total que incide sobre una superficie. Es la suma de la radiación directa, difusa y reflejada. La radiación extraterrestre es absorbida y dispersada a medida viaja a través de la atmósfera. En la siguiente imagen se representa como se descompone la radiación solar extraterrestre al entrar a la atmósfera.

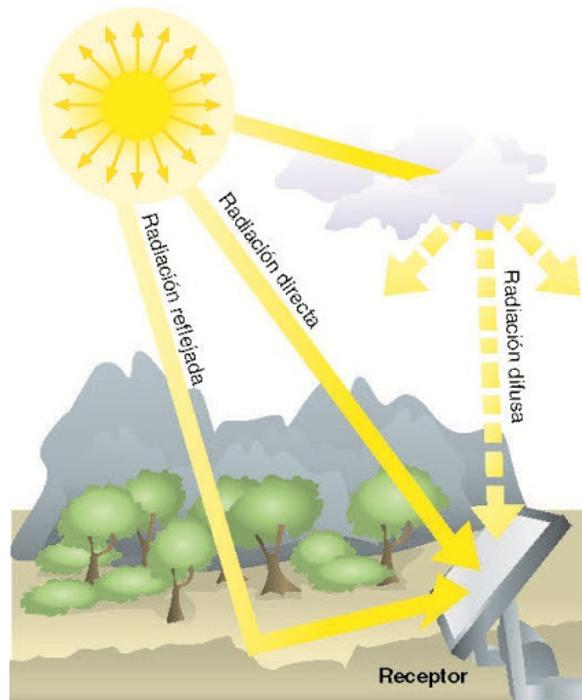


Figura 1.2: Tipos de radiación

La intensidad con que la radiación del sol llega a la tierra se denomina constante solar (G_{SC}), cuyo valor es:

$$G_{SC} = 1367 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

1.2. Energía solar

La energía solar es aprovechada actualmente de dos formas principales, las cuales se ven en la Figura 1.4, además de otras clasificaciones.

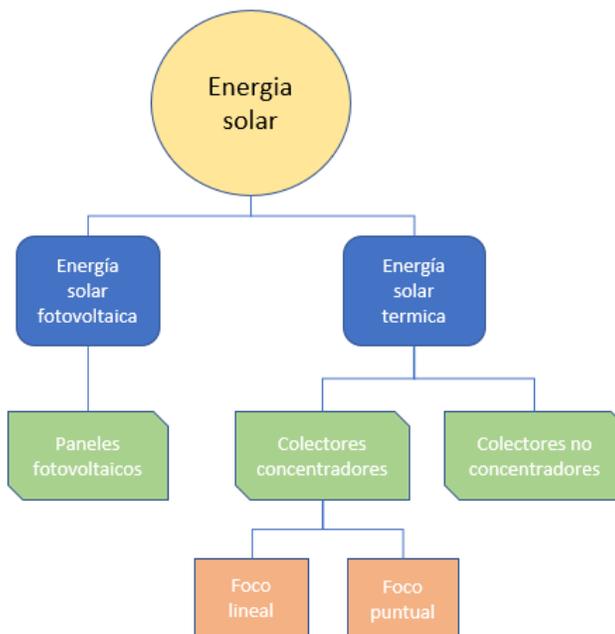


Figura 1.3: Energía solar

1.2.1. Energía solar fotovoltaica

En este caso la energía solar se utiliza para la producción de electricidad a partir de celdas fotovoltaicas, las cuales generan directamente corriente continua cuando la radiación incide sobre su superficie. La electricidad generada luego de ser invertida, puede ser consumida directamente o ingresada a redes de distribución. Sus aplicaciones incluyen: redes de autoconsumo, sistemas de bombeo, transporte, telecomunicaciones, y plantas de generación entre otras.

1.2.2. Energía solar térmica

Por otro lado la energía térmica utiliza la radiación incidente para suministrar calor a algún proceso. Este calor es absorbido por un fluido de trabajo. Los colectores pueden ser de baja o de alta temperatura. Sus aplicaciones incluyen: secado de alimentos, sistemas de agua caliente sanitaria, cocinas solares, hornos solares, centrales termoeléctricas, etc.

Esta energía se puede utilizar dos maneras: con concentración y sin concentración, cabe destacar cada una va asociada a diferentes equipos, procesos y aplicaciones.

1.2.2.1 Energía solar no concentrada

Este tipo de colectores no tienen ningún tipo de concentración solar, esto indica que el área de apertura es igual al área receptora de energía, por lo que su temperatura de operación normalmente no superan los 100° C. Al no tener concentración estos colectores son capaces de aprovechar la radiación global. Normalmente son fijos no utilizando mecanismos de seguimiento solar. En este campo de aplicaciones se pueden encontrar los siguientes colectores:

- **Colectores de placa plana (FPC):** Su nombre en inglés Flat Plate Collector. El dispositivo consta de una placa metálica que actúa como receptor y tubos (unidos a la placa) donde circula el fluido de trabajo. Generalmente usan una cubierta de vidrio. Tiene una temperatura de operación máxima de 80 °C. Y sus principales aplicaciones son: aire acondicionado, agua caliente sanitaria (ACS) y procesos de baja temperatura.

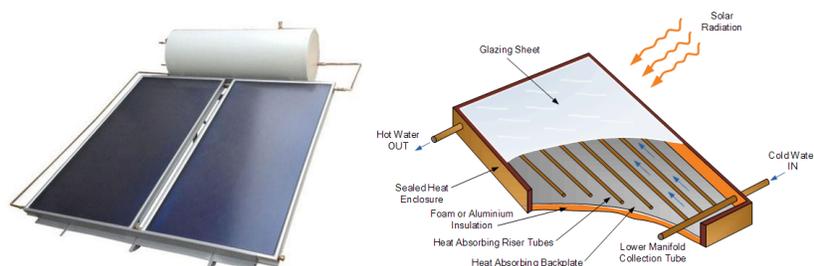


Figura 1.4: Colectores de placa plana

- Colectores de tubo al vacío (ETC):** El ETC o Evacuated Tube Collectors. Consisten en una serie de placas paralelas que reciben la radiación solar, estas placas están unidas a tubos de extracción de calor (“heat pipes”), conectados a un único manifold. Cada pareja placa-tubo esta rodeada por un tubo de vidrio, en cuyo interior se hace vacío con lo que se eliminan casi por completo las pérdidas por conducción y convección. Al interior de los tubos, la radiación es absorbida por un fluido con cambio de fase (metanol, por ejemplo). Posee 2 circuitos: Circuito evaporación-condensación (al interior de los tubos) y circuito principal de fluido calor-transportador (al interior del manifold). Estos son muy útiles para climas menos favorables. Suelen ser más eficientes debido a que tiene menos pérdidas térmicas, pero más costosos por el manteniendo constante que requieren los tubos al vacío. Además, las placas y tubos se manufacturan con un recubrimiento selectivo para reducir las pérdidas por radiación infrarroja.

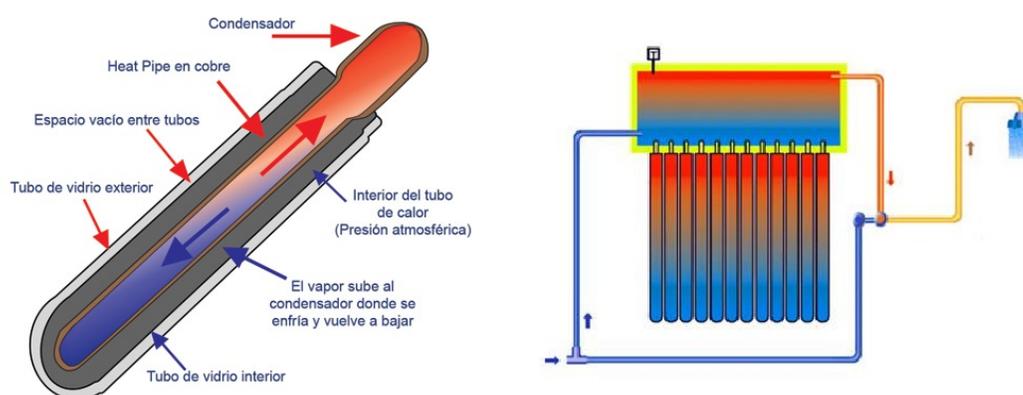


Figura 1.5: Colectores de tubo al vacío

1.2.2.2 Energía solar concentrada

Conocida como energía CSP (Concentrated Solar Power), como su nombre lo indica estos colectores concentran la radiación solar directa en un área reducida; esto generalmente se logra a través de un espejo o arreglo de espejos que reflejen la radiación solar incidente. Los parámetros por los cuales es atractivo concentrar la radiación, son [10]:

- Se logra mayor densidad energética ($\uparrow \frac{W}{m^2}$).
- Requiere una menor área de colección lo que disminuye las pérdidas ($\downarrow \dot{Q}_L$).
- Con lo anterior, se logra una mayor temperatura de operación.

Para comprender este tipo de colectores se debe aclarar 3 conceptos básicos:

1. Área de apertura: Superficie que recibe toda la radiación solar.
2. Área de recepción (o colección): Área donde se concentra la radiación. Dependiendo del tipo y tamaño de colector, ésta puede ser puntual o lineal.
3. Razón de concentración: Relación entre el área de apertura y de colección solar. Esta siempre es mayor a la unidad.

$$\text{Razón de concentración} = \frac{\text{Área de apertura}}{\text{Área de colección}}$$

En el mercado existen cuatro tipos de colectores concentradores, los cuales se categorizan según su tipo de foco (lineal o puntual) y su tipo de receptor (móvil o fijo).

Tipo Colector Concentrador		Tipo de Foco	
		Lineal	Puntual
Tipo de receptor	Fijo	Colector Lineal Fresnel (LFC)	Torre Central (HFC)
	Móvil	Colector Cilindro Parabólico (PTC)	Disco Solar (Solar Dish)

Figura 1.6: Tipos de colectores concentrados

En este campo de aplicaciones se pueden encontrar los siguientes colectores:

- Colector Cilindro Parabólico (CCP):** El CCP capta la radiación y la concentra sobre un receptor lineal colocado en el eje focal de la parábola. Estos colectores deben ser móviles y seguir al sol, para captar la radiación directa de forma perpendicular a lo largo del día. Hay dos sistemas de seguimiento solar, programados (movimiento establecido) o correctores de posición (sensores). Normalmente se utiliza una rotación programada del eje polar ($15 \frac{\circ}{hr}$). Constan de una placa reflectora, una tubería receptora (donde convergen los rayos reflejados) y una cubierta de vidrio (opcional).



Figura 1.7: Colectores Cilindro Parabólicos

- **Colectores lineales Fresnel (LFC):** Estos colectores son similares a los colectores cilindro parabólicos, la diferencia recae en utilizar varios espejos planos o ligeramente curvados en vez de un reflector único parabólico. Los espejos se ubican en la base del colector, inclinados a diferentes ángulos para reflejar la radiación hacia el receptor (tubería). La línea focal de los colectores Fresnel se encuentra distorsionada. Debido a este motivo, habitualmente se utiliza un reflector secundario en el receptor, de esta manera se puede reflejar la radiación no incidente hacia el receptor. También se suelen utilizar varios tubos en paralelo formando un arreglo multi-tubos. Con este tipo de receptor se puede capturar la mayor parte de la radiación sin utilizar espejos secundarios [12]. Algunas ventajas de un colector Fresnel son:

- Utilizan espejos planos, los cuales son de fácil producción.
- La estructura que soporta los espejos es ligera, por lo que requieren menos acero y concreto. Esto también facilita el proceso de ensamblaje e instalación.
- Las cargas de viento son menores, lo que mejora la estabilidad estructural, por lo que no requieren grandes fundaciones. Todas estas ventajas se deben comparar con su menor eficiencia óptica debido a su línea focal distorsionada.



Figura 1.8: Colectores lineales Fresnel

- Colector Disco Parabólico :** También conocido como Parabolic Dish Reflector (PDR), como su nombre indica, está compuesto por una superficie concentradora de forma parabólica que concentra la radiación solar en el foco geométrico de esta. En el foco se sitúa un elemento que convierte la energía térmica en energía mecánica a través de un motor Stirling, cuya salida es aprovechada por un alternador para generar energía eléctrica. Aunque ésta ha sido la principal aplicación, es posible aprovechar dicha energía térmica para otras aplicaciones como generar vapor directamente [5] o utilizarlo como calor de proceso para generar por ejemplo, hidrógeno. Requiere de seguimiento en dos ejes y alcanza temperaturas de trabajo de hasta 1500 °C.

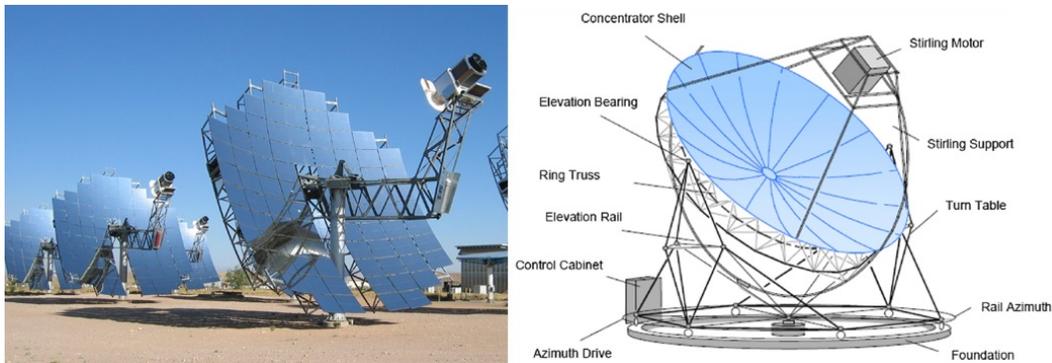


Figura 1.9: Colector Disco Parabólico

■ **Torre Solar (HFC):**

También llamado Heliostat Field Colector (HFC) o Solar Power Tower, consiste en un campo de helióstatos que redirigen la radiación solar hacia un foco puntual ubicado en lo alto de una torre. Entre sus características:

- Posee altas tasas de concentración [100 – 1500].
- Temperatura de salida del receptor: 550 °C - 565 °C.
- Eficiencia de transformación eléctrica anual varía entre el 15 % y 18 %.
- Capacidad de almacenamiento energético se encuentra entre el 0 % y el 90 % de su capacidad total.
- Requiere menor preparación de suelo.

Sus aplicaciones más comunes suelen ser la generación eléctrica y calor para procesos a muy alta temperatura.

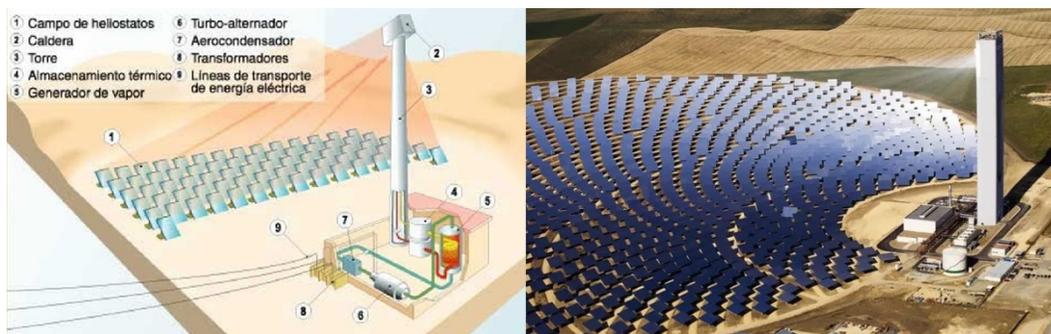


Figura 1.10: Torre Solar

Finalmente, en la figura 1.11 se muestra un resumen de los colectores mencionados, el tipo de receptor que poseen, su razón de concentración y su rango de temperatura.

Motion	Collector Type	Absorber Type	Concentration Ratio	Indicative Temperature Range (°C)
Stationary	Flat-plate collector (FPC)	Flat	1	30–80
	Evacuated tube collector (ETC)	Flat	1	50–200
	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	1–5	60–240
Single-axis tracking	Linear Fresnel reflector (LFR)	Tubular	10–40	60–250
	Parabolic trough collector (PTC)	Tubular	15–45	60–300
	Cylindrical through collector (CTC)	Tubular	10–50	60–300
Two-axes tracking	Parabolic dish reflector (PDR)	Point	100–1000	100–500
	Heliostat field collector (HFC)	Point	100–1500	150–2000

Figura 1.11: Tipos de colectores, ratio de concentración y rango de temperatura

1.3. Desalinización

El 97 % del agua del planeta es salada, mayormente concentrada en los océanos. La cual es un recurso importante para el abastecimiento humano. Esta necesidad parte en respuesta a la escasez de agua potable. En particular el agua de mar contiene un 96,5 % de agua y un 3,5 % de sales por lo que es necesario someterla a un proceso para que sea apta para el consumo humano. La desalinización es un proceso que consiste en eliminar la sal del agua de mar, con el objetivo de obtener agua potable. Las plantas desaladoras son las instalaciones industriales encargadas del proceso de desalinización. Las plantas desaladoras si bien funcionan, aun pueden ser optimizadas. En el proceso de desalinización se producen residuos salinos y contaminantes en altas concentraciones lo que si no se vierte en varios focos puede perjudicar la flora y fauna. Además, presentan un elevado consumo eléctrico. Por lo que actualmente se encuentran en estudio plantas más competitivas, menos contaminantes y que utilicen energías renovables.[?]

1.3.1. Métodos de desalinización

Existen varios métodos de desalinización del agua dependiendo de la geografía, de los recursos disponibles y otros factores, por lo cual es necesario aplicar diferentes métodos o tecnologías para que el agua de mar o salada pueda ser apta para el consumo humano. Algunos de estos métodos son:[11]

- **Ósmosis inversa:** Este proceso separa el agua de la sal a través de presión (70 [atm] app. y depende de la cantidad de solidos) sobre el líquido el cual es previamente filtrado de objetos de mayor tamaño. En algunas plantas se transfiere la presión de salida de la salmuera a agua salada que será filtrada mejorando la eficiencia del proceso. Es el proceso más eficiente en términos de gasto energético su implantación supone más del 60 % respecto al resto de métodos.
- **Desalinización térmica o destilación:** Este método consiste en calentar el agua, hasta evaporarla, y luego condensarla obteniendo agua “dulce”. Este método consta de varias etapas, la temperatura y presión van disminuyendo en cada una hasta conseguir lo

deseado. El calor extraído al condensar es reutilizado en volver a calentar el agua.

- **Congelación** El agua salada es pulverizada en una cámara refrigerada y a baja presión. Los cristales de hielo se forman sobre la salmuera, lo que se separa y se obtiene agua dulce.
- **Evaporación relámpago** Este proceso es similar a la destilación, el agua salada se atomiza en una cámara con presión menor a la de saturación. Parte de las gotas se evaporan inmediatamente las cuales se condensan posteriormente. El resto del agua no evaporada pasa por una segunda cámara a presión menor que la anterior, repitiendo el proceso hasta alcanzar el rendimiento deseado.
- **Electro-diálisis** Consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de una solución iónica. De esta manera el agua se desaliniza obteniéndose agua dulce.

1.4. Heliotecnia

Para identificar de buena manera la radiación solar que incide sobre el colector es necesario conocer y comprender como se mueve el sol durante el día, con lo que también es posible diseñar un buen sistema de seguimiento. Para esto, a continuación se introducirán una serie de variables y conceptos necesarios para lograr determinar, por ejemplo:

- Conversión entre hora civil y hora solar.
- Duración del día solar.
- Hora de entrada y salida del sol.
- Altitud solar máxima.
- Ángulo de incidencia entre el rayo solar y una superficie.

1.4.1. Ubicación geográfica

Lo primero es que se debe saber, es la posición de la tierra en la cual se esta evaluando las ecuaciones.

Esta ubicación geográfica se define a través de 3 parámetros: latitud, longitud y altitud.

- **Latitud (φ):** “La latitud es la distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado del planeta medidas con respecto al centro de la Tierra”
 - Indica qué tan separado está un punto del ecuador.
 - Se mide en grados. Se considera 0 en el ecuador y 90 en los polos.
 - Se considera positivo en el hemisferio norte y negativo en el sur.
 - Todos los puntos con la misma latitud forman un paralelo.

Latitudes importantes:

- Línea ecuatorial: 0°

- Trópicos (Cáncer y Capricornio): $\pm 23^{\circ} 26'$.
 - Círculos polares (Ártico y Antártico): $\pm 66^{\circ} 33'$
- **Longitud (λ):** “La longitud es la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y un meridiano considerado como base, medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto”
- El meridiano base (de referencia) utilizado actualmente es el meridiano de Greenwich (meridiano 0°).
 - Se mide en grados, positivo hacia el este, negativos hacia el oeste. Varía entre 0° y 180° .
 - Los meridianos se utilizan para definir los husos horarios.

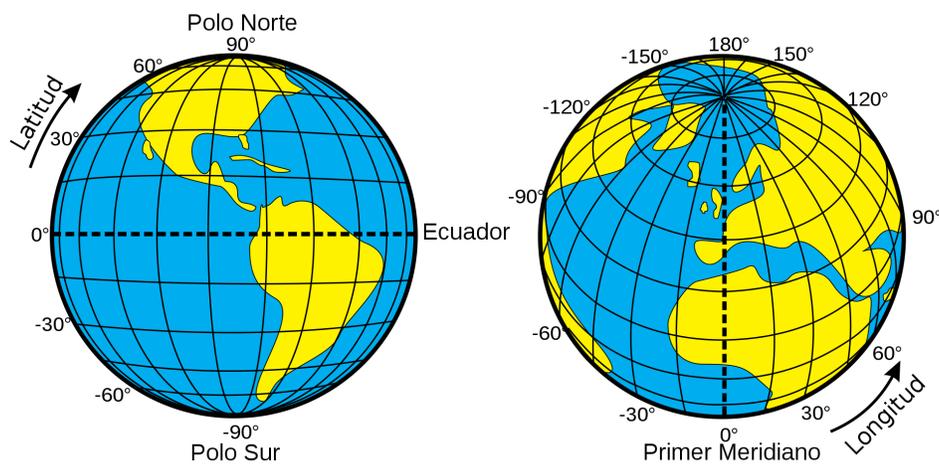


Figura 1.12: Latitud y longitud del mundo

- **Altitud (h):** “Altitud es la distancia vertical de un punto de la tierra con respecto a un origen determinado, considerado como nivel cero.”
- Se considera como nivel cero a la altura media del mar.
 - Se mide en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m).
 - Altitud negativa normalmente se denomina profundidad.

1.4.2. Huso horario :

Un huso horario es cada una de las 24 áreas en que se divide la Tierra. Se encuentran centrados en meridianos de una longitud que es un múltiplo de 15°

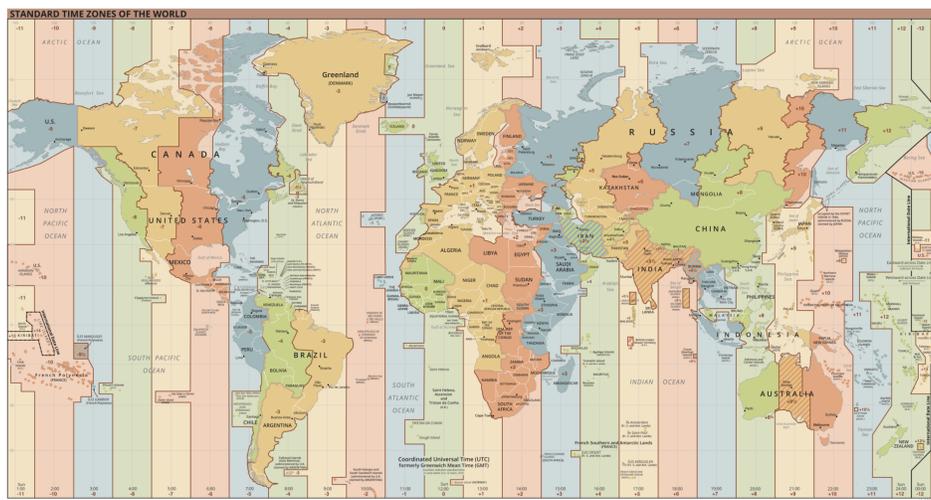


Figura 1.13: Husos horarios estándares

1.4.3. Hora civil UTC

- El estándar para la medición del tiempo en el planeta se denomina Tiempo Universal Coordinado (Coordinated Universal Time).
- Todos los husos horarios se definen como desviaciones positivas o negativas del UTC.
- Define la hora de uso civil: Tiempo Local Estándar (TLE).

1.4.4. Ecuación del tiempo (ET)

Muestra la diferencia entre el tiempo solar medio y el tiempo solar aparente, los cuales se definirán mas adelante.

$$ET = 9.87 \sin 2B - 7.58 \cos B - 1.5 \sin B \quad (1)$$

Para lo cual es necesario el parámetro B:

$$B = (N - 81) \cdot \frac{360}{364} \quad (2)$$

Donde:

- N: Corresponde al número del día en el año como muestra el cuadro 1.1.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
N	i	31 + i	59 + i	90 + i	120 + i	151 + i	181 + i	212 + i	243 + i	273 + i	304 + i	334 + i

Cuadro 1.1: Día del año por meses.

1.4.5. Tiempo solar medio y aparente

- “El Tiempo solar medio (TSM) está basado en un sol ficticio que se mueve a una velocidad constante a lo largo del año, y es la base para definir el día solar medio (24 horas u 86400 segundos). Se corresponde con el tiempo civil y se coordina mediante el Tiempo Medio de Greenwich”. Cada hora dura exactamente 15 de rotación terrestre.
- Por otro lado, el Tiempo solar aparente (TSA), es el que efectivamente refleja la posición del Sol. Se diferencia de TSM debido a la diferente velocidad de rotación del sol durante el año. Para calcular el TSA primero debemos calcular la longitud estándar:

$$\lambda_s = UTC \cdot 15 \quad (3)$$

Luego con los valores de λ_s encontrados en la ecuación 3 se conocen todos los parámetros para obtener el tiempo solar aparente:

$$TSA = TLE + \frac{ET}{60} - \left[\frac{4 \cdot (\lambda_s - \lambda_L)}{60} \right] \quad (4)$$

donde:

- TSA = Tiempo Solar Aparente [h]

- TLE = Tiempo Local Estándar (Hora Civil) [h]
- ET = Ecuación del Tiempo [min]
- λ_s = Longitud Estándar
- λ_L = Longitud Local

1.4.6. Ángulo solares

■ Declinación

- La declinación solar es la desviación angular de los rayos del sol con respecto al eje ecuatorial o se puede ver también como un ángulo de rotación respecto del vector normal al plano de tralación de la tierra.
- Varía en el año entre $\pm 23.45^\circ$ (siendo los solsticios los máximos)

$$\delta = 23.45 \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) \cdot (284 + N) \right] \quad (5)$$

- **Hora solar (ω):** La hora solar marca la posición relativa del sol respecto a cada lugar. Viéndolo de otra manera es el ángulo que debería rotar la Tierra para traer al meridiano del lugar directamente bajo el sol (mediodía solar).

$$\omega = (TSA - 12) \cdot 15[^\circ] \quad (6)$$

- **Altitud solar (α) y Zenit (Φ):** “La altitud solar es el ángulo entre el rayo solar y un plano horizontal a la superficie terrestre”

$$\alpha = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega)[^\circ] \quad (7)$$

El Zenit Solar es el complemento de la altitud.

$$\Phi = 90[^\circ] - \alpha \quad (8)$$

- **Ázimuth (γ_s):** Se define como el ángulo entre la proyección de los rayos del sol en el plano horizontal con respecto a una referencia. En el hemisferio sur éste se mide con respecto al norte y viceversa. El azimut se considera positivo hacia el oeste y negativo hacia el este. Se calcula de la siguiente manera.

$$\gamma_s = \frac{\omega}{|\omega|} \left(180 - \arccos \left(\frac{\cos \Phi \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \Phi \cdot \cos \varphi} \right) \right) \quad (9)$$

1.4.7. Ángulos de superficie

- **Inclinación (β):** Ángulo entre el plano de la superficie y el plano horizontal.
- **Azimuth de superficie (Z_s):** Ángulo entre la proyección horizontal de la normal de la superficie y la dirección sur.
- **Incidencia (θ):** Ángulo entre los rayos solares y la normal a una superficie. Este ángulo varía respecto a las disposiciones de la superficie. La ecuación general para una superficie fija es:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\varphi) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(\varphi) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(Z_s) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\beta) \\ & + \sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\beta) \cos(Z_s) + \cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\beta) \sin(Z_s) \end{aligned} \quad (10)$$

Para superficies particulares, se reduce la expresión anterior. Por ejemplo:

- Superficie Horizontal:

$$\beta = 0^\circ$$

$$\theta = 0^\circ$$

- Superficie vertical:

$$\beta = 90^\circ$$

$$\cos(\theta) = -\cos\varphi \cdot \sin\delta \cdot \cos Z_s + \sin\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \cdot \cos Z_s + \cos\delta \cdot \sin\omega \cdot \sin Z_s$$

- Superficie inclinada apuntando al norte (en el hemisferio sur):

$$Z_s = 180^\circ$$

$$\cos(\theta) = \sin(\varphi + \beta) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$$

- Superficie con Eje Polar Norte-Sur y seguimiento Este-Oeste La pendiente de la superficie varía continuamente y está dada por

$$\tan(\beta) \frac{\tan(L)}{\cos(Z_s)}$$

El ángulo de azimut de la superficie está dado por

$$Z_s = \tan^{-1} \frac{\sin(\phi) \sin(z)}{\cos(\theta') \sin(L)} + 180C_1C_2$$

Donde

$$\cos(\theta') = \cos(\phi) \cos(L) + \sin(\phi) \sin(L) \cos(z)$$

$$C_1 = \begin{cases} 0 & \text{si } \left(\tan^{-1} \frac{\sin(\phi) \sin(z)}{\cos(\theta') \sin(L)} \right) z \geq 0 \\ 1 & \text{si } \left(\tan^{-1} \frac{\sin(\phi) \sin(z)}{\cos(\theta') \sin(L)} \right) z < 0 \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} -1 & \text{si } z \geq 0^\circ \\ 1 & \text{si } z < 0^\circ \end{cases}$$

1.4.8. Radiación incidente en superficies inclinadas

Para lograr determinar la radiación en una superficie de plano inclinado es necesario conocer los valores de radiación directa (b), difusa (d) y reflejada (r). La radiación en plano inclinado se define como:

$$I_i = I_{b,i} + I_{d,i} + I_{r,i} \quad (11)$$

Con subíndices:

- i : Plano inclinado
- h : Superficie horizontal
- n : Radiación normal

Para determinar la radiación directa en plano inclinado, es necesario determinar un factor determinado R_b , el cual se define como la razón entre la radiación directa en plano inclinado y aquella en el plano horizontal:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\phi} \quad (12)$$

Por lo tanto la radiación directa inclinada ($I_{b,i}$) se puede obtener desde la radiación directa horizontal o desde radiación directa normal:

$$I_{b,i} = I_{b,h} \cdot R_b = DNI \cdot \cos\theta \quad (13)$$

Para la radiación difusa y reflejada de una superficie inclinada se utiliza el modelo isotrópico, el cual asume que la radiación proviene de igual intensidad desde todo el cielo.

La radiación difusa en una superficie inclinada ($I_{d,i}$), en un ángulo θ , se calcula de la siguiente manera:

$$I_{d,i} = I_{d,h} \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (14)$$

Para la radiación reflejada ($I_{r,i}$), el calculo se realiza como un porcentaje de la radiación global horizontal:

$$I_{r,i} = \rho_r \cdot (I_{b,h} + I_{d,h}) \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (15)$$

El término ρ_r se denomina albedo y corresponde al porcentaje de radiación reflejada. Es de difícil estimación y depende de las características del suelo.

Tipo de Suelo	Albedo Típico
Nieve reciente	0,85
Concreto Nuevo	0,55
Desierto	0,40
Pasto Verde	0,25
Suelo terrestre	0,18
Asfalto	0,12
Bosques	0,10
Océanos	0,05

Figura 1.14: cuadro de valor de Albedo típico para cada tipo de suelo

1.5. Concentrador cilindro parabólico

Este tipo de colectores ya fue definido anteriormente, lo que se busca es agregar mayor detalle. Recordando que los CCP son captadores solares de concentración, que transforman la radiación solar directa en energía térmica, calentando un fluido de trabajo. El CCP consiste en un concentrador que refleja la radiación solar directa sobre la línea focal de la parábola, en la que se sitúa el receptor: el tubo receptor. Desde el punto de vista estructural, este tipo de colectores se compone de cuatro elementos principales:

- **Sistema de seguimiento solar:**

El sistema de seguimiento más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores del colector alrededor de un eje. Aunque también se han fabricado CCP que pueden girar en dos ejes, se ha demostrado que estos colectores tienen un rendimiento menor que los de seguimiento en un único eje. Eso se debe a que los colectores con seguimiento en un eje tienen pérdidas térmicas menores, más rentables ya que son más sencillos mecánicamente, y son también más robustos resistiendo cargas de viento muy superiores. Normalmente, los CCP se instalan de forma que su eje de giro quede orientado en la dirección Este-Oeste o Norte-Sur. La rotación del colector se realiza mediante de un mecanismo eléctrico o hidráulico, que mueve el colector de acuerdo con la posición del Sol. Los mecanismos eléctricos son adecuados para colectores de tamaño pequeño o medio, mientras que para colectores grandes se requiere el uso de mecanismos hidráulicos. Con el fin de reducir los costos y simplificar la construcción, un solo mecanismo debe ser capaz de mover varios módulos concentradores conectados en serie.

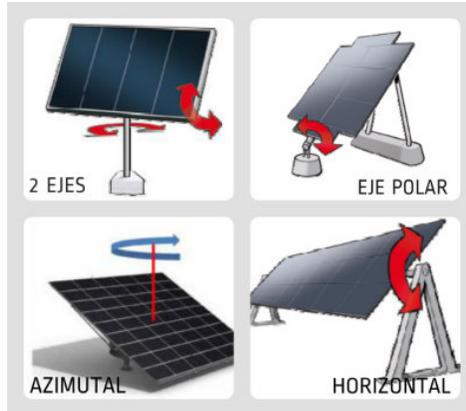


Figura 1.15: Tipos de seguimiento solar

■ **Receptor:**

El receptor lineal del CCP es el elemento que convierte la radiación solar concentrada en energía térmica que transporta el fluido calorífero o de trabajo. Se encuentra en la línea focal del concentrador cilindro parabólico, conectado a la estructura mediante unos soportes metálicos. Es uno de los elementos fundamentales de todo CCP, ya que afecta mucho el rendimiento global del colector. Consiste en un tubo receptor que a su vez está compuesto por dos tubos concéntricos: uno interior metálico, por el que circula el fluido calorífero, y otro exterior, de cristal. El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorptividad ($\sim 94\%$) y una baja emisividad en el espectro infrarrojo ($\sim 15\%$). La mayoría de los recubrimientos se degradan en contacto con el aire cuando están calientes, por lo que se requiere que exista un alto vacío en la cámara que queda entre el tubo metálico interior y la cubierta de cristal. El tubo de cristal que rodea al tubo interior metálico protege el recubrimiento selectivo de las incidencias meteorológicas y reduce las pérdidas térmicas por convección en el tubo receptor. Este tubo suele llevar un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmisividad y, en consecuencia, el rendimiento óptico del colector.

■ **Reflector:**

La misión del reflector cilindro parabólico es reflejar y proyectar la radiación solar de forma concentrada sobre el tubo receptor situado en la línea focal del reflector. Para llevar a cabo la reflexión, se utilizan películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da suficiente rigidez. Estos medios soporte pueden ser chapa metálica, plástico o cristal.

- En el caso de chapa metálica, el mismo material tiene la doble función de soporte y reflectante. Para ello se suelen usar chapas de aluminio con una reflectancia especular de 80 % aproximadamente. La principal ventaja de este sistema es su bajo costo.
- En el caso de plástico se trata de una película de plata o aluminio sobre una fina lámina de plástico. Como en el caso anterior, el principal problema de estas películas reflectoras es su baja durabilidad, ya que su reflectividad disminuye rápidamente.
- La opción que más se utiliza es emplear vidrio como medio soporte. En este caso, se deposita sobre el vidrio una fina película de plata protegida por una película de cobre y otra de pintura. Si se emplea vidrio grueso (espesor > 3 mm) como soporte, antes de depositar la película de plata, el vidrio es curvado en caliente, en hornos especiales, para que adopte la forma parabólica que debe tener, de modo que los espejos pueden ir colocados directamente sobre la estructura metálica del colector. Cuando el espesor del vidrio es pequeño (< 1.5 mm), los espejos pueden pegarse directamente sobre un soporte metálico, de fibra de vidrio o de otro material, que es el que asegura la adecuada curvatura del concentrador.

1.6. Pérdidas y rendimiento

En el proceso de aprovechamiento térmico de la radiación solar directa por parte del CCP, aparecen una serie de pérdidas. Estas pérdidas se pueden dividir en tres grupos:

- Pérdidas ópticas
- Pérdidas térmicas
- Pérdidas geométricas

1.6.1. Pérdidas ópticas

Desde que la radiación solar pasa a través del plano de apertura del concentrador, hasta que es absorbida en el tubo receptor, se producen una serie de pérdidas. Estas pérdidas se deben a que el espejo concentrador no es un reflector perfecto ni tiene una forma geométrica perfecta, ni la cubierta transparente (en caso de que exista) deja pasar toda la radiación solar, ni la superficie selectiva es un receptor perfecto. Estas pérdidas se conocen como pérdidas ópticas y se determinan por cuatro parámetros.

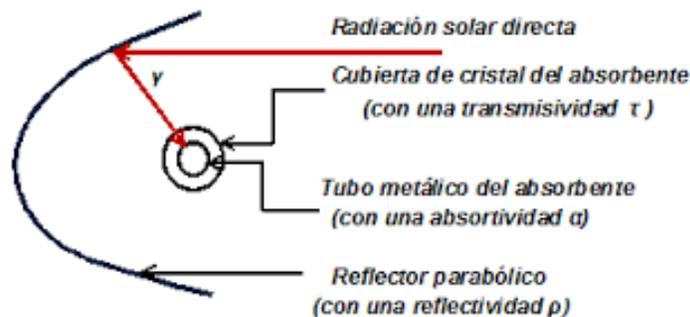


Figura 1.16: Parámetros involucrados en las pérdidas ópticas

- Las pérdidas que se producen en el proceso de reflexión son tanto más altas cuanto menor es la reflectividad del cristal, de ahí que uno de los factores más importantes en el mantenimiento del campo solar sea la limpieza de los espejos. La **reflectividad** ρ que presenta el espejo puede llegar a alcanzar el valor de 93.5 % .

- Parte de los rayos reflejados por el espejo concentrador no alcanzan el tubo receptor por causas de imperfecciones macroscópicas o microscópicas de las cubiertas, errores en el posicionamiento del colector o en la posición relativa del tubo receptor respecto al colector, etc. Todas estas pérdidas se cuantifican a través del **factor de interceptación** γ , cuyo valor máximo suele ser del 95 %, para colectores de muy buena calidad de fabricación y con un procedimiento de montaje muy cuidadoso.
- Aunque la cubierta de cristal deja pasar la mayor proporción de radiación solar a su través, una parte pequeña de la radiación se refleja o se absorbe, por lo que el cociente entre la radiación que pasa a través de la cubierta y la radiación que incide sobre ella nos da la **transmisividad**, τ , de la cubierta. El valor de la transmisividad varía entre 92 %-96 %.
- La **absortividad** de la superficie selectiva, α , cuantifica qué cantidad de la radiación incidente es finalmente absorbida por el tubo. Los valores típicos de absortividad varían entre 90 %-96 %.

El producto de los cuatro parámetros anteriores es el rendimiento óptico del CCP, lo cual depende solamente del ángulo de incidencia de la radiación y del grado de ensuciamiento del colector.

$$\eta_{opt} = \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \quad (16)$$

En los concentradores como la radiación debe ser directa la eficiencia óptica baja considerablemente cuando los rayos no están en el mismo plano con el receptor y el reflector. Existe un ángulo de aceptabilidad, el cual puede ser calculado con la razón de concentración, este ángulo indica cuanto se puede desfasar la superficie de la perpendicularidad con el sol sin afectar considerablemente su eficiencia.

1.6.2. Pérdidas geométricas

Las pérdidas geométricas provocan una disminución del área efectiva de captación de los colectores y se dividen en dos grupos:

- Pérdidas inherentes al colector
- Pérdidas debidas a la posición relativa entre filas de colectores

Las pérdidas geométricas inherentes al colector cilindro parabólico están causadas porque este tipo de colectores tienen seguimiento en un único eje y, por tanto, sólo poseen movimiento en elevación, lo que da lugar a la existencia de un ángulo de incidencia entre el vector solar y el vector normal a la apertura del concentrador. Para un ángulo de incidencia no nulo, existe una parte al final del tubo receptor que no está iluminada por los rayos reflejados procedentes del espejo concentrador.

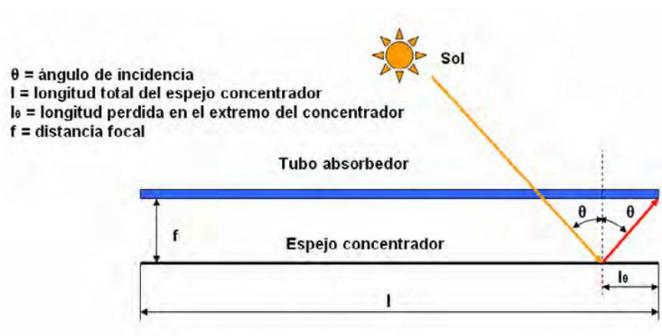


Figura 1.17: Pérdidas geométricas

$$A_e = W \cdot I_\theta = W \cdot f_m \cdot \tan(\theta)$$

Donde A_e es el área de espejo que se pierde por este fenómeno, W es el ancho de la parábola, y f_m es la distancia media entre la superficie de la parábola y el receptor, dentro de una misma sección transversal, cuyo valor se calcula, por geometría, de acuerdo con la ecuación:

$$f_m = f + \frac{f \cdot W^2}{48 \cdot f^2}$$

donde f es la distancia focal de la parábola.

Las pérdidas debidas a la posición relativa entre filas de colectores están causadas por la sombra parcial que algunos colectores pueden proyectar sobre otros. Cuanta mayor distancia exista entre las filas paralelas de colectores, menor es el sombreado que aparece. Sin embargo,

un aumento del área necesaria para el campo solar implica un aumento en las pérdidas de bombeo y pérdidas térmicas que pueden producirse en el sistema de tuberías.

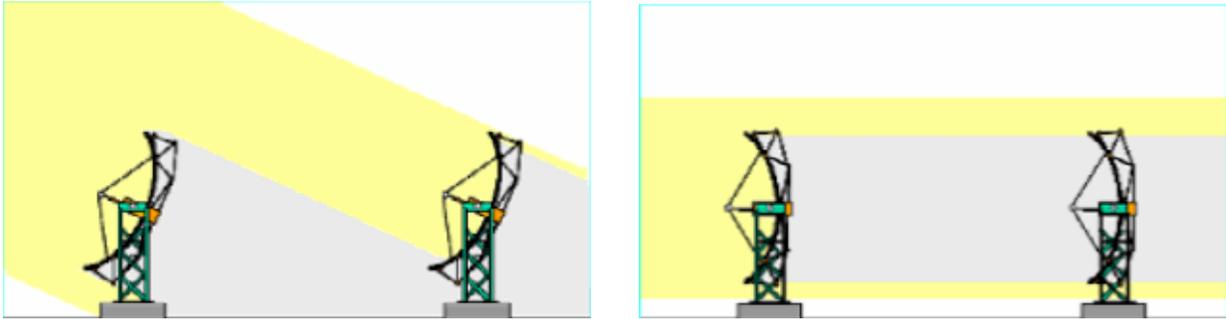


Figura 1.18: Pérdidas por filas de colectores

1.6.3. Pérdidas térmicas

Las pérdidas térmicas se producen principalmente en dos lugares: en el tubo receptor y en las tuberías de fluido térmico, siendo bastante más importantes las del tubo receptor. Las pérdidas térmicas asociadas al tubo receptor están formadas por: pérdidas de calor por conducción a través de los soportes de los tubos receptores, pérdidas por radiación, convección y conducción desde el tubo receptor hacia la cubierta de cristal, y pérdidas por convección y radiación desde el tubo de cristal al ambiente. En aquellos tubos receptores en los que entre el tubo metálico y el de cristal hay vacío, las pérdidas térmicas por conducción y convección desde el tubo metálico hacia la cubierta de vidrio quedan eliminadas, y solo hay entre el tubo metálico y la cubierta de cristal pérdidas por radiación.

Aunque cada una de las pérdidas térmicas anteriormente mencionadas podría calcularse analíticamente, aplicando las ecuaciones que rigen los procesos de transferencia de calor por radiación, convección y conducción, las pérdidas térmicas globales, en un CCP, se calculan mediante la ecuación:

$$\dot{Q}_{L_{\text{colector-ambiente}}} \left[\frac{W}{m} \right] = a_2 \cdot \Delta T^2 + a_1 \cdot \Delta T + a_0 + \left[(b_2 \cdot \Delta T^2 + b_1 \cdot \Delta T + b_0) \frac{DNI}{900} \cdot \cos(\theta) \right]$$

Donde $DNI \left[\frac{W}{m^2} \right]$ es la radiación solar directa, θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar, ΔT ($^{\circ}C$) es la diferencia de temperatura entre la del fluido de trabajo y la ambiente, a_i y b_i son coeficientes facilitados por el fabricante del colector y se determinan experimentalmente sometiendo al colector a diferentes ensayos de pérdidas térmicas en el rango de temperaturas para el cual el colector ha sido diseñado.

1.7. Fluidos de trabajo para un CCP

El rango de temperatura ideal para trabajar con colectores cilindro parabólicos es $150^{\circ}C$ - $400^{\circ}C$. Para temperaturas superiores las pérdidas térmicas de éste tipo de colectores son altas y reducen su rendimiento. Para temperaturas inferiores a $150^{\circ}C$ hay otros colectores más económicos. El tipo de fluido de trabajo que se utiliza en los CCP depende de la temperatura que se desea alcanzar. Existe una amplia variedad de fluidos térmicos para canales parabólicos, siendo los principales:

- Aceites o siliconas sintéticos
- Aceites minerales
- Sales fundidas
- Agua
- Líquidos iónicos
- Aire u otro gas

Si las temperaturas que se desean son moderadas ($< 150^{\circ}C$) la utilización de agua desmineralizada como fluido de trabajo no conlleva grandes problemas ya que la presión de trabajo no es excesiva. En cambio, se utiliza aceite sintético en aquellas aplicaciones donde se desean temperaturas más altas ($125^{\circ}C < T < 400^{\circ}C$). La explicación de esta clasificación consiste en que para temperaturas altas las tuberías estarían sometidas a elevadas presiones si el fluido de trabajo fuera agua, porque para evitar que se evapore el agua es necesario mantenerla en todo momento a una presión superior a la de saturación correspondiente a la

temperatura máxima que alcance el agua en los colectores solares. Esto significa, por ejemplo, que si se desea tener agua caliente a 317°C a la salida de los colectores, la presión en el circuito tendrá que ser superior a 10 [MPa]. En cambio, puesto que la presión de vapor del aceite para estas temperaturas es mucho menor que la del agua, se puede calentar aceite a 317°C sin tener que mantener el circuito a más de 1,5[MPa]. Trabajar a menores presiones hace posible usar materiales más económicos para las tuberías y simplifica la instalación y sus medidas de seguridad.

Existen diversos tipos de aceite y la elección de uno u otro se hace en función de la temperatura máxima de trabajo deseada. Así, por ejemplo:

- **Santotherm 55** (ó Therminol 55) se puede elegir para una temperatura máxima de 300°C, es un aceite con buenas propiedades térmicas y un precio bastante económico.
- **Monsanto VP-1** es un aceite sintético que puede trabajar bien a 400°C, aunque tiene el problema de que su punto de congelación es de 12°C, lo que obliga a mantener todo el circuito de aceite permanentemente a una temperatura superior a éste valor. Para ello se suele utilizar una disposición de resistencias eléctricas exteriores de las tuberías del circuito de aceite, o una caldera auxiliar que mantiene el circuito de aceite por encima de los 12°C durante la noche y en días nublados cuando la temperatura ambiental es baja. En cualquier caso, generalmente, la energía auxiliar necesaria para mantener la temperatura del aceite un poco por encima del punto de congelación es pequeña.
- **Syltherm 800** es un aceite con buenas propiedades térmicas hasta 425°C y con una temperatura de congelación de -40°C. El único problema es que su precio resulta mucho más elevado que el del Monsanto VP-1.

El empleo de este tipo de aceites lleva consigo la limitación de la temperatura máxima de operación porque a partir de aproximadamente 400°C los aceites sintéticos mencionados se degradan, perdiendo sus propiedades.

Los líquidos iónicos poseen características muy interesantes, pero su aplicación está aún lejos de ser viable.

Las pobres propiedades del aire como fluido térmico limitan su uso a aplicaciones muy específicas de calor de proceso.

Finalmente, el empleo de sales fundidas es muy atractivo, ya que entre otras ventajas frente a los aceites y siliconas sintéticas, puede emplearse también como fluido en un sistema de almacenamiento, reduciendo así la necesidad de costosos intercambiadores de calor aceite-sales. No obstante, presenta graves inconvenientes como la necesidad de instalar los mecanismos necesarios para garantizar que en ningún caso se produzca la congelación de las sales en los tubos. Por tanto, las opciones disponibles para una planta comercial se reducen a los aceites y siliconas sintéticas. Entre estos, los más conocidos y empleados son el óxido de bifenil-difenil (Therminol VP-1 de Solutia, Dowtherm A de Dow Chemical).

A pesar de las elevadas presiones que conlleva el uso de agua directamente en los CCP para temperaturas altas, la utilización de agua para estos escenarios se ha contemplado siempre como una opción atractiva ya que permite aumentar la eficiencia global del sistema solar y disminuir la pérdidas térmicas en el campo de colectores. Esto ha motivado el desarrollo de diversos proyectos durante las últimas décadas para investigar ésta tecnología conocida como Generación Directa de Vapor (GDV).

1.8. Generación de vapor con CCP

La gran mayoría de las aplicaciones comerciales de los canales parabólicos están destinadas a la producción de vapor. Según los requerimientos impuestos por el proceso a alimentar térmicamente, el vapor puede ser saturado o sobre-calentado. Éste vapor puede producirse en las tres formas siguientes:

- Empleando en los colectores solares un fluido de trabajo que, una vez calentado en ellos, transmite la energía térmica a un intercambiador de calor donde se produce el vapor que alimenta el proceso industrial. El aceite es un fluido de trabajo muy común para éste tipo de sistemas porque se comporta como un buen medio de transferencia de

calor y tiene una presión de vapor moderada, lo que simplifica el diseño de las tuberías del campo solar.

- Circulando agua presurizada en los colectores y convirtiéndolo parcialmente en vapor en un tanque de expansión súbita (flashing). Éste método se usa para producir vapor a temperaturas no demasiado altas (menos de 200°C), debido a la alta presión necesaria en los tubos receptores de los CCP y en las tuberías si la temperatura del vapor es más alta.
- Evaporando agua directamente en los tubos receptores de los CCP (Generación Directa de Vapor).

Cuando el vapor se produce mediante un intercambiador de calor, un líquido con baja presión de vapor y buenas propiedades térmicas circula a través del campo de colectores y se calienta manteniéndose en fase líquida, para que, mediante un intercambiador de calor, transferir posteriormente a un circuito agua/vapor la energía térmica que ha ganado en el campo solar. Ésta tecnología es la más común en los sistemas con CCP que existen. Como fluido de trabajo en el campo solar se suele utilizar un aceite sintético adecuado, a la temperatura máxima de trabajo que se desea. Utilizando aceite como medio de transferencia de calor entre el campo solar y el circuito agua/vapor se superan los inconvenientes asociados al uso directo del agua en los propios colectores solares (alta presión y riesgo de congelación en las tuberías), pero el uso del aceite tiene también algunos inconvenientes (riesgo de incendio, peligro de fugas contaminantes, mayor costo, etc.). Además, los aceites tienen peores propiedades de transferencia de calor que el agua y son demasiado viscosos cuando están fríos. En estos sistemas, el intercambiador de calor es en realidad un generador de vapor o caldera sin llama. Éste intercambiador de calor aceite/agua es un equipo costoso porque requiere tubos de aleación anticorrosivos. Además, la existencia del intercambiador impone que la temperatura del aceite a la salida del campo de colectores sea algo superior que la temperatura del vapor producido, para compensar las pérdidas térmicas y las irreversibilidades del intercambio de calor. La temperatura del aceite a la salida del campo solar puede mantenerse constante variando el caudal de aceite a través de los colectores para adecuarlo a la radiación solar di-

recta que haya disponible en cada momento. De éste modo, el vapor se produce a temperatura constante, variando solamente el caudal de vapor de acuerdo con la energía térmica que el campo solar suministra al intercambiador de calor en cada instante. El esquema del generador de vapor depende del tipo de vapor que se desee producir (sobre-calentado o saturado). En el caso más genérico (vapor sobre-calentado), el generador de vapor usado en éste tipo de sistemas consta de tres cuerpos:

- Pre-calentador, donde el agua se pre-calienta hasta una temperatura próxima a la de evaporación.
- Evaporador, donde el agua se evapora y pasa al último cuerpo del intercambiador de calor.
- Sobre-calentador, donde el vapor se sobre-calienta hasta la temperatura demandada por el proceso industrial que se alimenta térmicamente.

Por otro lado, la generación directa de vapor en los propios tubos receptores de los captadores solares es una opción muy atractiva porque la temperatura media de operación del colector es inferior a la temperatura del vapor de salida, y porque el cambio de fase reduce el caudal de agua necesario por la bomba de circulación. Esto quiere decir que las pérdidas térmicas en los colectores son menores en éste caso y que los consumos eléctricos de las bombas que alimentan al campo solar son también menores.

1.8.1. Generación directa de vapor

La GDV en los tubos receptores de CCP puede llevarse a cabo mediante tres procesos básicos, cada uno de los cuales demanda una configuración diferente del campo solar. Todos estos procesos tienen en común que requieren un campo solar compuesto por largas filas de CCP para llevar a cabo el proceso de GDV completo (precalentamiento del agua, evaporación y sobrecalentamiento del vapor). Dichos procesos son los siguientes:

- **Un solo paso:** En este proceso toda el agua de alimentación se introduce al principio de la fila de colectores, de modo que el agua se pre-calienta, evapora y convierte en vapor

sobre-calentado en un proceso sin interrupción, desde la entrada hasta la salida de la fila. De este modo se tiene que el caudal másico de vapor sobre-calentado que se produce se corresponde completamente con el caudal de agua que se introduce al comienzo de la fila. Desde el punto de vista de la ingeniería y de la inversión inicial, éste proceso es el de menor costo y mayor simplicidad, ya que no requiere elementos auxiliares. También tiene un rendimiento global alto porque quedan reducidas las cargas parásitas. Pero el proceso de un solo paso presenta ciertos inconvenientes en cuanto al control y la estabilidad del flujo bifásico en el interior de los tubos receptores, ya que requiere un sistema de control muy eficiente que permita mantener constantes la presión y temperatura del vapor a la salida del campo solar aunque haya transitorios importantes en la radiación solar directa disponible o cambios en la temperatura de agua de alimentación. Además, este problema se penaliza por el elevado tiempo de respuesta del sistema solar en este caso, ya que la gran longitud que deben tener las filas de colectores impone un tiempo de residencia alto. Puesto que un cambio en las condiciones del vapor puede suponer un grave peligro para la durabilidad de la turbina, la fiabilidad y la precisión del sistema de control del campo solar debe estar garantizada.

- **Inyección:** En este proceso solo una parte del agua de alimentación es introducida al principio de la fila de colectores, porque el resto se inyecta en pequeñas cantidades a lo largo de la fila de colectores. Con la existencia de diversos inyectores de agua se consigue un excelente control del proceso y una buena estabilidad de los parámetros del vapor producido, incluso con fuertes transitorios de la radiación solar. Los inconvenientes principales del proceso de inyección son su mayor costo de inversión y la mayor complejidad del sistema debido a la necesidad de implementar un sistema de inyección de agua en paralelo a cada una de las filas de colectores. Este proceso también tiene unas restricciones en cuanto al caudal mínimo de operación, ya que este se ha de mantener en todos los puntos por encima de unos valores límites para evitar el peligro de gradientes de temperatura demasiado altos en los tubos receptores.
- **Recirculación:** Este proceso se considera como el más conservador. En este caso se instala un separador agua-vapor situado al final de la zona de evaporación de la fi-

la de colectores. El caudal de agua de alimentación es superior al caudal de vapor sobre-calentado que se desea producir en la fila de colectores, de manera que solo una fracción del agua de alimentación es convertida en vapor conforme circula a través de los colectores de la zona de evaporación. El vapor es separado del agua en el separador, de forma que el agua sobrante es recirculada a la entrada de la fila de los canales parabólicos por una bomba de recirculación. El exceso de agua existente en el tramo de precalentamiento y evaporación garantiza unas adecuadas velocidades dentro de los tubos receptores, lo que les proporciona una buena refrigeración. Su buen control es la principal ventaja de esta opción, pero la necesidad de una bomba de recirculación y el exceso de agua que tiene que ser recirculada aumenta las cargas parásitas del sistema, penalizando el rendimiento global de la planta.

Entre las ventajas principales de la GDV se pueden nombrar las siguientes:

- Se elimina tanto el riesgo de fugas contaminantes como el de incendio debido al aceite térmico.
- Se puede aumentar la temperatura máxima del ciclo de potencia por encima de los 400°C en las centrales eléctricas termo-solares con ciclo Rankine.
- El límite actual de los 400°C está impuesto por los aceites sintéticos disponibles para trabajar como medio de transferencia entre el campo solar y el bloque de potencia, porque se degradan a temperaturas superiores.
- Permite reducir el tamaño del campo solar para una misma capacidad de generación.
- Al eliminar el intercambiador de calor aceite/agua se aumenta el rendimiento global de la planta, lo que permite reducir el tamaño del campo solar y con ello la inversión requerida
- Se simplifica la configuración de la planta, ya que no solo se elimina el intercambiador de calor, sino que también se eliminan todos los sistemas auxiliares del circuito de aceite (sistema antiincendios, piscina de recogida del aceite en caso de fugas, sistema

de purga, de incondensables de aceite y el sistema de inertización del circuito de aceite). Ésta simplificación y ahorro de componentes tiene un claro impacto beneficioso en la inversión inicial necesaria para la implementación de una planta termo-solar.

- Reducción de los costos de operación y mantenimiento, ya que los sistemas basados en aceite térmico implican un costo que puede llegar hasta un 4 % anual, debido a la reposición del aceite. Requieren también una protección anticongelante para temperaturas ambientales bajas.

La existencia de un flujo bifásico agua líquida/vapor a alta presión en los tubos receptores de los colectores conlleva también algunos inconvenientes como:

- Necesidad de tuberías, válvulas y accesorios metálicos del campo solar más fuertes, con paredes más gruesas que sean capaces de soportar unas mayores presiones de trabajo. Este aumento de la presión de trabajo en el campo solar aumenta el costo de estos componentes.
- Debido al flujo bifásico existente en el campo solar y las diferentes propiedades termodinámicas del agua líquida y del vapor, los sistemas de control necesarios en un sistema de este tipo son más complicados y costosos que los usados en los sistemas que emplean otros fluidos de trabajo.

A pesar de los inconvenientes se ha comprobado mediante estudios anteriores que el balance final económico entre el conjunto de las ventajas y los inconvenientes mencionados es bastante positivo.

1.9. Convección

La convección es un mecanismo de transferencia de calor que se da en relaciones fluido-fluido o fluido-sólido la convección puede ser natural o forzada. En la convección natural, cualquier movimiento del fluido se debe a medios naturales, como por ejemplo el efecto de flotación que se manifiesta como la subida de un fluido cálido (más ligero) y la caída del más frío (más denso). En la convección forzada, un fluido es impulsado a desplazarse sobre

una superficie o dentro de un tubo por medios externos, como una bomba o un ventilador. La razón de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se puede expresar por la ley de enfriamiento de Newton como [16]:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (17)$$

donde:

- h = coeficiente de transferencia de calor por convección, $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$
- A_s = área superficial de transferencia de calor, m^2
- T_s = temperatura de la superficie, $^\circ C$
- T_∞ = temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, $^\circ C$

1.9.1. Resistencias térmicas

En transferencia de calor ya sea conducción o convección se realiza una analogía de el flujo de calor con el flujo de corriente, la diferencia de tensiones con la diferencia de temperatura y la resistencia eléctrica con la resistencia térmica.

$$\dot{Q}_{cilindro} = \frac{T_1 - T_2}{R} [W] \quad (18)$$

Para un cilindro. la resistencia térmica (R) para conducción seria:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} \quad (19)$$

Y para convección,

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r L h} [W] \quad (20)$$

Al igual que las resistencias eléctricas se pueden sumar en serie:

$$R_{Total} = R_1 + R_2 + \dots + R_N \quad (21)$$

y en paralelo:

$$\frac{1}{R_{Total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} \quad (22)$$

1.9.2. Coeficiente de transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor por convección (h) se puede definir como la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido, por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura.

Determinar h es el real desafío de las transferencias de calor por convección ya que depende de muchas variables y no solo de las propiedades de los materiales en interacción. Es muy común encontrar este parámetro experimentalmente. Para determinar h es importante introducir algunos números adimensionales

- Número de Reynolds: La razón de las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el fluido. [13]

$$Re = \frac{VL_c}{\nu} \quad (23)$$

- V = velocidad del fluido
- L_c = Longitud característica
- ν = viscosidad cinemática del fluido

- Número de Prandtl: Este parámetro describe de buena manera los espesores relativos de las capas límites de velocidad y térmica. Es la razón entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor. Las cuales varían con la temperatura. Normalmente esta tabulado para los fluidos mas utilizados. [14]

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (24)$$

- k = conductividad térmica del fluido

- Número de Nusselt: Relaciona el factor de transferencia de calor por convección con la conductividad térmica. [15]

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (25)$$

Finalmente, el número de Nusselt para convección forzada exterior, se puede calcular utilizando Prandtl y Reynolds:

- Flujo laminar:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

- Flujo turbulento:

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

Capítulo 2: Cuantificación y análisis de operación del prototipo construido.

2.1. Localización para puesta en marcha

El proyecto nace de la exposición de los anteriores proyectos del Prof. Udo Rheinschmidt. Actualmente, junto a la Universidad Técnica Federico Santa María, se están llevando a cabo diferentes proyectos tanto de desalinizar como de bombear agua de mar, ambos haciendo uso de los recursos naturales, sol y undimotriz, respectivamente. Estos proyectos se desean implementar en la costa de Chile, concretamente en Laguna Verde, Valparaíso, V Región.

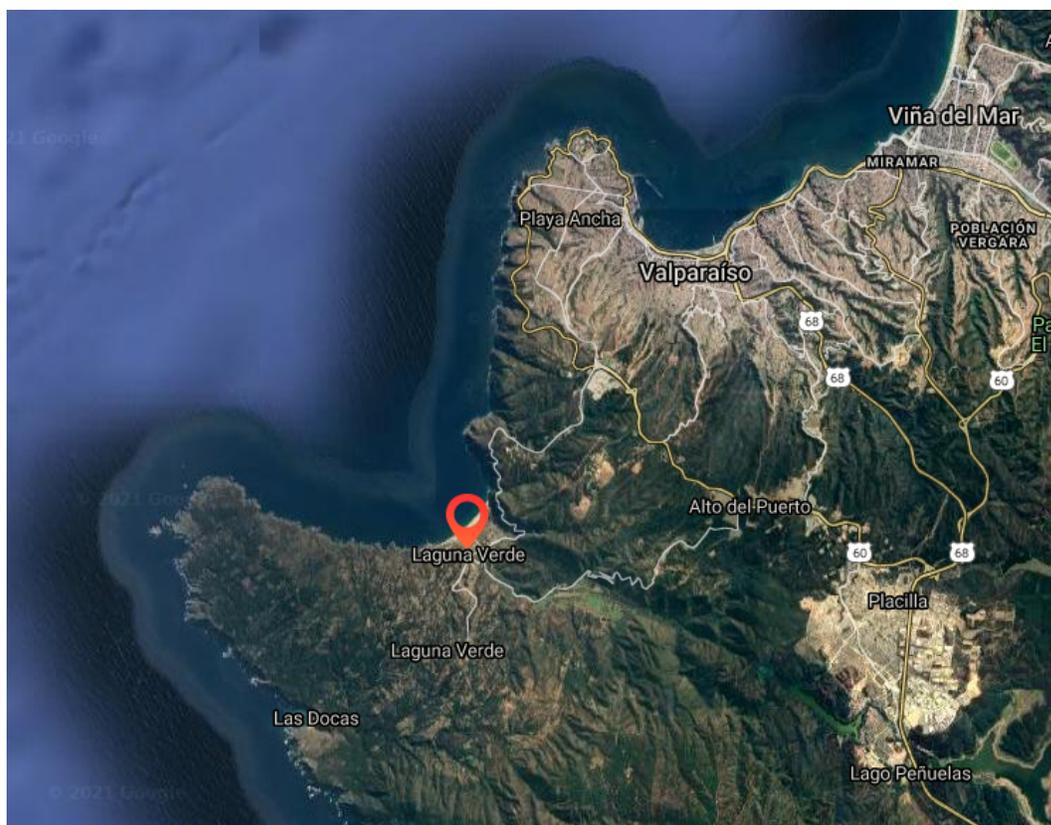


Figura 2.1: Ubicación prototipo

En primera instancia, se accede al explorador solar en la pagina del ministerio de energía. [3] En el cual se obtienen valores promedio de las diferentes radiaciones en la localización indicada. Para luego descargar datos de un año solar medio y generar un análisis de mayor detalle.



Figura 2.2: Características de Laguna Verde mediante explorador solar

2.2. Prototipo

En esta sección se presentara el prototipo construido, sus elementos, los materiales utilizados y sus propiedades, su principio de funcionamiento, cálculos incurridos en el diseño, etc. Lo que entregara la información necesaria y las consideraciones utilizadas para poder interpretar y modelar su operación. El prototipo fue diseñado en conjunto por Gonzalo Garcia, Martin Leal y Sergio Anabalón y construido en el laboratorio de energías renovables. Este consta de 4 partes fundamentales,

- Concentrador cilindro parabólico
- Estructura

- Sistema fluido-portador
- Estanque separador

A continuación se observan imágenes de su diseño 3D (Figura 2.3), mediante inventor y las fotos del prototipo luego de ser construido (Figura 2.4).

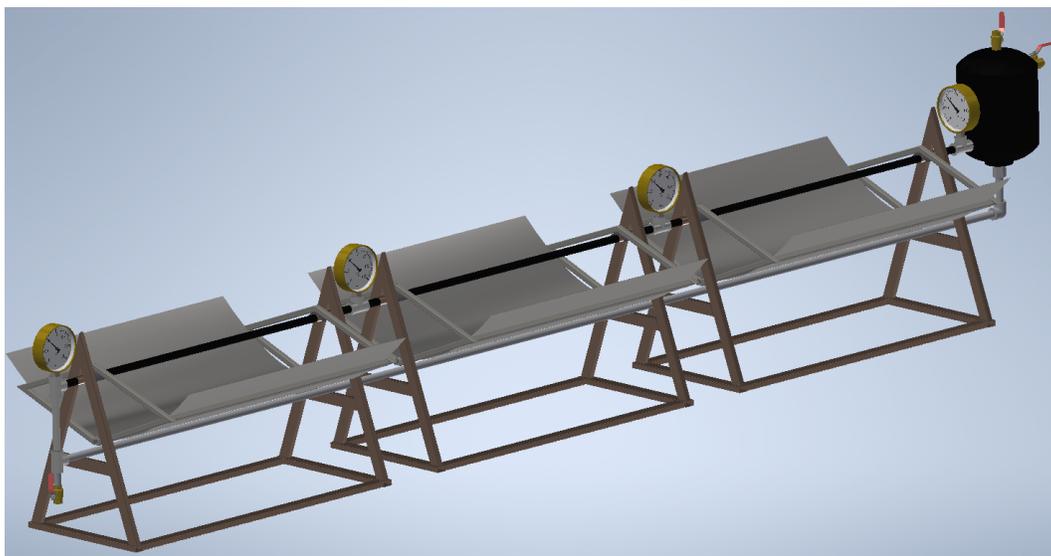


Figura 2.3: Diseño 3D utilizado para generar planos y comprar materiales.



Figura 2.4: Prototipo ensamblado y pintado

A continuación se describirán cada una de las partes que componen el prototipo.

2.2.1. Concentrador cilindro parabólico

Estos dispositivos son los encargados de concentrar la radiación directa hacia el receptor, para que luego sea absorbida y transferida al agua de mar. Para el prototipo se construyeron tres unidades idénticas para poder, con ayuda de 3 termómetros, estudiar que ocurre a lo largo de cada una de ellas.

- **Características:** Todas están hechas de una lámina de acero inoxidable con acabado pulido con un índice de reflectividad $\rho = 0,59$ lo que disminuye al aumentar la suciedad en la superficie. Cada una de las láminas de acero tiene inicialmente un área de $1[m^2]$ y un grosor de $0,4[mm]$.
- **Parábola utilizada:** Para la obtención de la curvatura correcta se ha utilizado el ancho que tiene la lámina. Conociendo que esta mide $1[m]$ de ancho, podemos obtener la ubicación del foco aplicando la siguiente ecuación:

$$f = \frac{L}{2(\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2}))} = 0,2178[m] \quad (26)$$

Donde:

- f: Distancia entre el foco y el vértice de la parábola.
- L: Ancho de la lamina.

Obtenida la distancia del foco, se pueden calcular los puntos cartesianos de la curvatura aplicando la fórmula de obtención de parábola:

$$y = \frac{x^2}{4 \cdot f} \quad (27)$$

Calculando los límites para que el arco total de la parábola sea igual al ancho de la lamina se obtienen los siguientes puntos:

x	-0,436	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,436
y	0,21781	0,10330	0,04591	0,01148	0	0,01148	0,04591	0,10330	0,21781

Graficando los puntos:

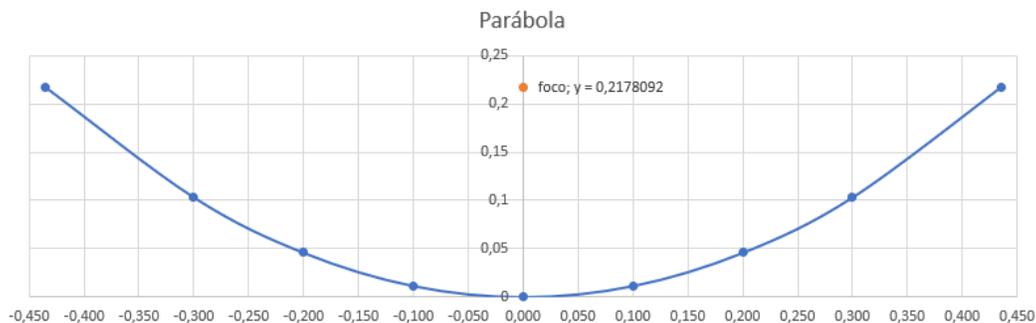


Figura 2.5: Parábola

Con los límites de la parábola multiplicado por el largo total de los 3 módulos (3[m]) se obtiene el área de apertura (A_c) que mas adelante se utilizara para obtener el calor útil.

$$A_c = 3 \cdot 2 \cdot 0,436[m] = 2,616[m^2]$$

2.2.2. Sistema fluido-portador

Este conjunto de tuberías forma parte del volumen de control que se estudiara, en el cual se ingresara agua salada al inicio de un ciclo y cuando se obtenga la cantidad deseada de vapor y presión se extraerá; por una parte el vapor y por otra la salmuera generada. Para poder apreciar de mejor manera las partes que aquí se trataran se adjunta corte del diseño 3D del prototipo.

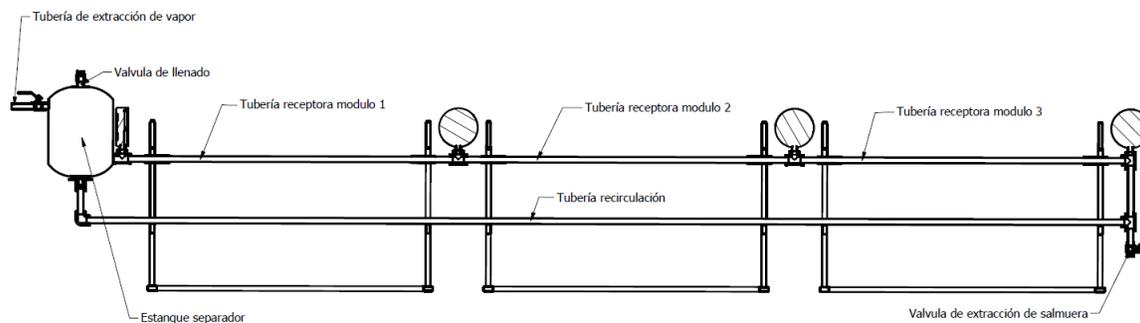


Figura 2.6: Corte sistema fluido-portador

- **Tuberías:** El conjunto de tuberías estará sometido a condiciones extremas de operación las cuales no son compatibles con cualquier material. Por un lado, se expondrán a altas temperaturas, concretamente la tubería receptora debe ser de un material que sea buen conductor de calor. Calor que debe trasladar de la radiación absorbida al fluido. Y por otro lado, el fluido que va a circular por su interior es agua salada, la cual es altamente corrosiva por lo que la resistencia a la corrosión es importante para no contaminar el agua que posteriormente sera de consumo humano. Estas razones llevaron a elegir acero inoxidable ya que el sistema además tendrá que contener presión. El acero inoxidable tiene una conductividad térmica de $13,4 \frac{W}{mK}$ y el volumen interior total del conjunto de tuberías es de 2,517 [L]. Las tuberías que componen este conjunto son:

 - **Tuberías receptoras:** Las tuberías receptoras tienen un diámetro de 1 [in], 2 [mm] de espesor y tienen acabado con rosca NPT para poder enroscarse de manera fácil a las uniones. Su finalidad, además de transportar el agua es recibir la radiación y transmitirla al agua. Por ello tiene un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorpsividad ($\alpha = 0,95$) y una baja emisividad en el espectro infrarrojo.
 - **Tuberías de alimentación:** Las tuberías de alimentación y realimentación también tienen un diámetro de 1 [in], 2 [mm] de espesor y tienen acabado con rosca NPT. Estas se encargan de que exista la circulación natural entre el estanque y las tuberías receptoras. En su parte mas baja existe una válvula con el fin de extraer la salmuera.
 - **Tuberías de extracción:** Están conectadas a la parte lateral superior del estanque separador y su función es la extracción de vapor. Por su interior circula mayoritariamente vapor saturado con la posibilidad de existencia de condensado.
- **Válvulas:** Las válvulas son las que se encargan de que el sistema funcione. Las válvulas son de bola y se activan de forma manual. En un futuro, cuando el prototipo tenga cierta consistencia, se podría poner otro tipo de válvulas, como por ejemplo electroválvulas o válvulas taradas a una cierta presión.

■ **Uniones:**

- **Unión de 90°:** Ambas conexiones son de rosca NPT interior de 1 [in]. Acero inoxidable.
- **Unión en T:** Las 3 conexiones son de rosca NPT interior de 1 [in]. Acero inoxidable.

2.2.3. Estructura

Se diferencian 2 tipos de estructuras, la que es móvil y sostiene los CCP, llamada columpio, y la que es fija que sujeta el columpio, llamada soporte. Ambas son de acero al carbono pero de distinto perfil y grosor dependiendo las prestaciones que deba tener.

- **Columpio:** Esta parte de la estructura mantiene fija la lámina de acero inoxidable reflectante con la forma de parábola, como se ha calculado, para el máximo aprovechamiento del punto focal. Este perfil no debe soportar mucha fuerza. Se trata de un perfil cuadrado de 20 x 20 x 1,5 [mm] de acero al carbono. Para cada columpio se colocarán 3 barras de 1 metro por el exterior de la lámina donde esta va colocada y remachada. Por el lateral se colocan dos rombos haciendo de tope al columpio. Finalmente, en la parte superior de los rombos se suelda una pletina que hace de articulación móvil del columpio permitiendo a este rotar sobre el soporte. Lo cual se puede ver con mayor detalle en la siguiente imagen.

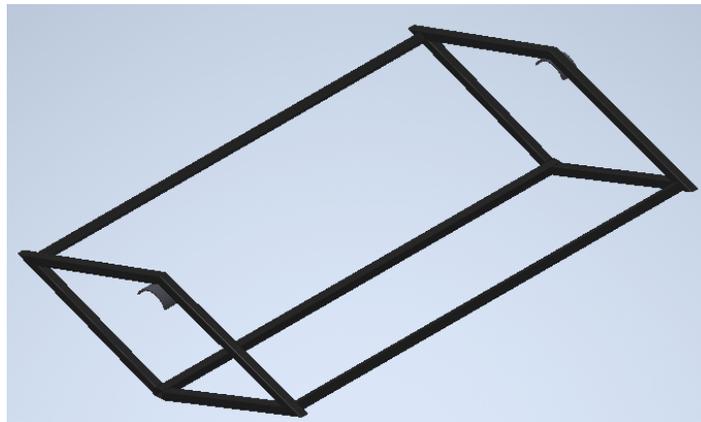


Figura 2.7: Diseño 3D columpio.

- **Soporte:** Esta estructura está fija. Su principal función es hacer de soporte a la parte móvil del dispositivo. Pese a que la parte móvil no tiene un gran peso y no es mucho el esfuerzo que debe hacer, se ha escogido un perfil rectangular de 40 x 20 x 2 [mm]. Como el resto de la estructura, es de acero y va soldada. Tiene forma de triángulo para optimizar material y tener estabilidad (centro de masa bajo). En la parte superior tiene un perfil tubular soldado sobre el cual se apoya la pletina móvil del columpio creando la articulación. Por el interior de dicho tubo van las tuberías receptoras. Además, el triángulo tiene un soporte a la altura ideal para que la tubería de recirculación esté apoyada y no se flecte debido a su gran longitud. Se construyen 3 soportes idénticos pero separados entre ellos para poder manipular cada modulo por separado.

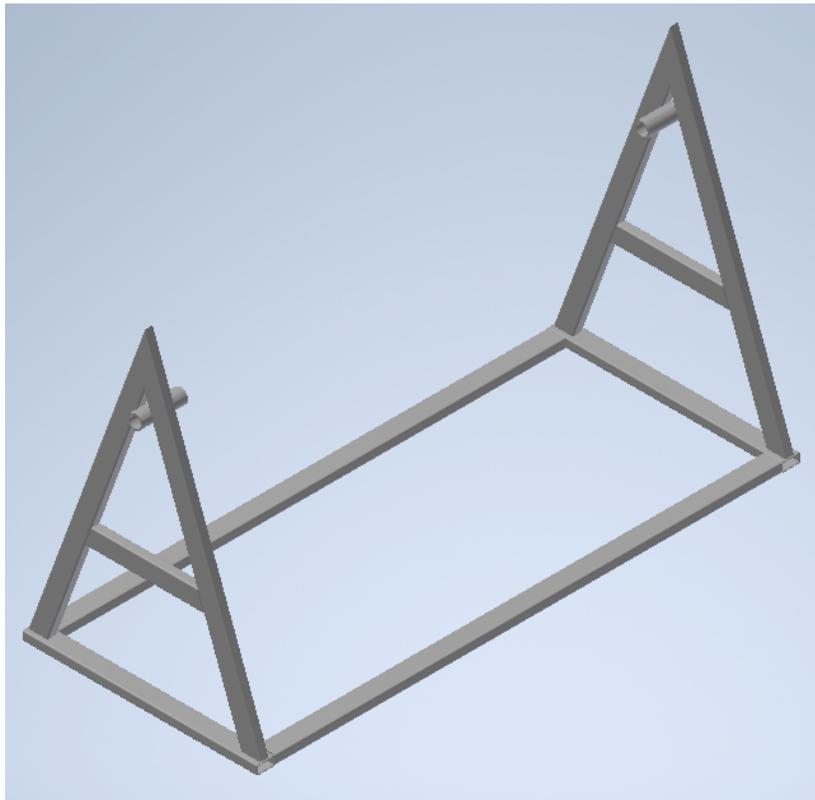


Figura 2.8: Diseño 3D soporte.

2.2.4. Estanque separador

Se utiliza como tanque separador un antiguo vaso de expansión. Originalmente tiene una abertura en la parte inferior utilizada para la recirculación (también se puede manipular para la extracción de la sal remanente). Para poder realizar el prototipo se debió mecanizar y hacerle otras 3 entradas. Una abertura en la parte superior la cual es utilizada para llenar el prototipo, una abertura lateral utilizada para la extracción de vapor y otra abertura lateral, opuesta a la anterior, para la tubería receptora. Es de acero inoxidable, tiene un volumen de 18 [L] y está tarado para una presión máxima de 10 bar.



Figura 2.9: Estanque

2.3. Principio de funcionamiento y parámetros de operación

El prototipo utiliza como fuente de energía la radiación del sol. Esta, mediante un CCP, se concentra en un tubo receptor de acero inoxidable pintado. El fluido interior es agua de mar la cual absorbe energía del receptor, se calienta y se mueve mediante circulación natural debido al cambio de densidad dentro del sistema fluido-portador. Cuando el agua llega al punto de saturación comienza a evaporarse, este vapor se acumula en el tanque separador ya que es el lugar mas alto dentro del volumen de control. Luego al evaporar la cantidad de agua establecida se procederá a extraer el vapor y la sal disuelta en agua (salmuera), evitando que se incruste en el prototipo. Finalmente, dicho vapor condensa en la cota deseada.

2.4. Consideraciones del modelo

El prototipo cuenta con un volumen de control que corresponde a 20,5 [L] incluyendo el estanque y las tuberías. Para las pruebas se considera una masa de agua de 15 [kg]. El punto de descarga de vapor se efectuara cuando se haya evaporado el 70 % del agua (controlado por un nivel), esto con el fin de evacuar también la salmuera evitando así concentraciones excesivas o precipitaciones de sales. Una vez hechas ambas descargas, se inicia un nuevo ciclo de evaporación con agua a temperatura ambiente. La cantidad de ciclos que se realicen dependerá de la radiación presente y por otra parte de las condiciones ambientales tales como temperatura del aire y velocidad del viento los cuales absorberán energía del prototipo.

Como el prototipo sera evaluado con mediciones de radiación obtenidas del explorador solar para la ubicación de Laguna Verde, por lo que el calor útil sera variable en el tiempo. Para el análisis se tomaran 4 días de referencia, estos serán días representativos de un año, los solsticios y equinoccios ya que estos días tienen valores importantes de declinación de la tierra.



Figura 2.10: Valores de declinación durante un año

2.5. Balance de energía

De acuerdo a la realidad nacional y mundial por la pandemia, no se logro operar el prototipo por lo que no se conocen la capacidad del mismo. Por esto se busca encontrar la temperatura que podría alcanzar el agua, la cantidad de vapor que podría generar y los ciclos que podría realizar. En términos simples este desafío se abordara con varios balances de energía de forma estacionaria con periodo de tiempo de 1 hora, por lo que, dependiendo de la duración del día solar se realizaran mas o menos balances acumulativos. Esto debido a que las mediciones de radiación solar que provee el ministerio de energía con el “explorador solar” son realizadas cada 1 hora. El prototipo utiliza directamente el agua salada como fluido de trabajo.

El balance de energía de forma conceptual seria el siguiente:

$$\text{Energía final} = \text{Energía inicial} + \text{Calor útil} - \text{Perdidas de calor} \quad (28)$$

Lo que matemáticamente a grandes rasgos seria:

$$m_{vc} \cdot \overline{C_p} \cdot T_f = m_{vc} \cdot \overline{C_p} \cdot T_i + \dot{Q}_u \cdot \Delta t - \dot{Q}_p \cdot \Delta t \quad (29)$$

Donde:

- m_{vc} = Masa de agua en el volumen de control

- $\overline{C_p}$ = Capacidad calorífica específica media
- T_f = Temperatura final
- T_i = Temperatura inicial
- \dot{Q}_u = Flujo de Calor útil o Potencia útil
- \dot{Q}_p = Flujo de perdidas de calor
- Δt = Periodo de tiempo

2.5.1. Calor útil

El calor útil o calor de entrada es la energía proviene del sol que es aprovechada por el prototipo. Por lo tanto del total de la potencia de la radiación global, solo una parte sera radiación directa y de esta solo una fracción sera absorbida en el tubo receptor. Esta fracción es producto de los factores de eficiencia.

Para calcular la eficiencia óptica se involucran 4 factores definidos en el capítulo 1,

$$\eta_{opt} = \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \quad (30)$$

de los cuales ρ y α son propiedades de los materiales definidos en este capítulo sección prototipo, por otro lado τ no tiene relevancia ya que no hay recubrimiento translúcido en el receptor.

Finalmente juntando los factores:

$$\eta_{opt} = 0,59 \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 0,95 = 0,532475 \quad (31)$$

Para verificar estos datos y además obtener ángulos de aceptabilidad se simulo el prototipo en el software “Tonatiuh” el cual arrojo datos similares o incluso mayores. Esto debido a que parte de la radiación impacta directamente en el receptor y no en el espejo.

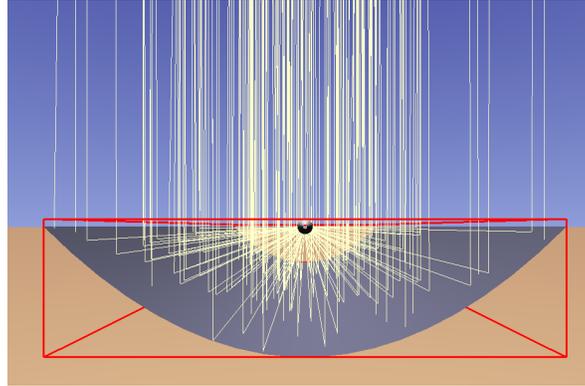


Figura 2.11: Eficiencia óptica

En primera instancia y como se vio anteriormente solo la radiación directa es captada por dispositivos concentradores, ya que la reflejada impacta por el lado convexo del reflector y la difusa no tendrá la misma dirección que la normal de la superficie. Para encontrar la radiación directa que impacta con la superficie del prototipo se utilizan herramientas de heliotecnía considerando azimut de superficie 180° (dirección norte) y una inclinación de 6° las cuales son características actuales del prototipo. Con estos 2 parámetros incluidas a las coordenadas del lugar a evaluar, se pueden calcular todos los ángulos solares necesarios hasta obtener el ángulo de incidencia (θ). Con el ángulo de incidencia y la radiación directa normal (DNI) se puede calcular la radiación directa inclinada ($I_{b,i}$).

$$I_{b,i} = DNI \cdot \cos \theta \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (32)$$

Hay que tener especial cuidado cuando los ángulos de incidencia se alejan de significativamente de 0. El ángulo de aceptabilidad es un parámetro que nos permite saber cuanto se puede desfasar el vector normal de la superficie con respecto a los rayos solares. El ángulo de aceptabilidad θ' se puede calcular con el área de apertura (A_c) y el área receptora (A_r) o factor de concentración [12]:

$$\theta' = \arccos \left(\frac{A_r}{A_c} \right) = 1,75^\circ \quad (33)$$

Este ángulo se comprueba con ayuda del software “Tonatiuh” variando la posición del sol

sobre la superficie .

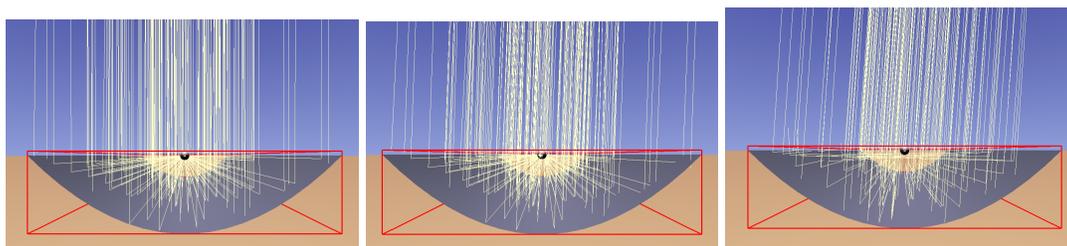


Figura 2.12: 0°, 2° y 4° de incidencia

Con estas pruebas se analiza el cambio en la eficiencia del colector con variaciones de 0, 1° del ángulo de incidencia lo se observa en el siguiente gráfico.



Figura 2.13: Gráfico Eficiencia v/s Ángulo de incidencia

El gráfico confirma lo calculado anteriormente con el factor de concentración, por lo que el ángulo de incidencia máximo recomendado es de 1, 8°

Habiendo calculado la radiación directa sobre la superficie inclinada y parámetros de eficiencia, se introducen área de colección e intervalo de tiempo para obtener el calor útil.

$$Q_u = I_{b,i} \cdot A_c \cdot \eta_{opt} \cdot \Delta t \text{ [J]} \quad (34)$$

Finalmente tenemos la energía que ingresa por el área de colección o apertura e ingresa al

fluido de trabajo. Una consideración importante que se tomo fue considerar que el calor útil entra directamente al fluido.

2.5.2. Pérdidas de calor

La transferencia de calor se produce por un gradiente térmico, en este caso, el prototipo al tener una temperatura igual o superior a la temperatura ambiente la transferencia de calor sera desde el prototipo hacia el exterior. Particularmente el análisis se concentrara en el volumen de control considerado (sistema fluido-portador).

Normalmente los coeficientes para las perdidas son determinados experimentalmente sometiendo al colector a diferentes ensayos de perdidas térmicas en el rango de temperaturas de diseño, como estos ensayos no han sido efectuados, se consideraran las perdidas mediante convección forzada por acción del viento. Las perdidas por radiación no serán consideradas ya que se utilizo recubrimiento selectivo el cual produce una baja emisividad en el espectro infrarrojo (< 30 %).

Básicamente la convección con resistencias térmicas:

$$\dot{Q}_{cilindro} = \frac{T_s - T_\infty}{R} [W] \quad (35)$$

Para la temperatura de la superficie (T_s), se considera un promedio entre el valor que tiene al comienzo del intervalo de tiempo y el valor final, este valor final se ve afectado por las perdidas por lo cual se itera hasta encontrar el equilibrio. La temperatura ambiente corresponde al valor obtenido del explorador solar del respectivo instante de tiempo. La resistencia térmica (R) resulta de la suma de dos resistencias en paralelo, para la tubería receptora (R_1) y para la tubería de recirculación (R_2) esta separación es para facilitar la visualización del efecto de aislantes. Para este caso ambas resistencias serán por convección ya que se tiene la temperatura exterior de las tuberías y estas no están cubiertas.

$$R_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,0127 \cdot 3 \cdot h} \quad R_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,0127 \cdot 4 \cdot h}$$

Sumando en paralelo

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = 7 \cdot 2\pi \cdot 0,0127 \cdot h \quad (36)$$

Finalmente

$$\dot{Q}_{perd} = (T_s - T_\infty) \cdot (7 \cdot 2\pi \cdot 0,0127 \cdot h)[W] \quad (37)$$

Para hacer el balance de energía se aplica el intervalo de tiempo:

$$Q_{perd} = (T_s - T_\infty) \cdot (7 \cdot 2\pi \cdot 0,0127 \cdot h) \cdot \Delta t[J] \quad (38)$$

Para el calculo del coeficiente de transferencia de calor (h) se utilizan números adimensionales, primero se analiza el tipo de flujo exterior con el numero de Reynolds. Utilizando la velocidad (V) y viscosidad cinemática (ν) del viento a la temperatura ambiente que se encuentra como también el largo característico de la tubería.

$$Re = \frac{VL_c}{\nu} \quad (39)$$

Luego ya sea laminar o turbulento se calcula el numero de Nusselt utilizando Reynolds ya calculado y Prandtl que se obtiene de tablas de propiedad del aire según su temperatura (Anexo 1 Figura 6.5).

- Flujo laminar:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

- Flujo turbulento:

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

Luego este numero de Nusselt relaciona la conductividad térmica (k) con coeficiente de transferencia de calor (h).

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{L_c} \quad (40)$$

Finalmente habiendo añadido detalles del calor útil y perdidas de calor el balance con

mayor detalle seria:

$$m_{vc} \cdot \overline{C_p} \cdot T_f = m_{vc} \cdot \overline{C_p} \cdot T_i + \dot{I}_{b,i} \cdot A_c \cdot \eta_{opt} \cdot \Delta t - (T_s - T_\infty) \cdot (L_c \cdot 2\pi \cdot r \cdot h) \cdot \Delta t \quad (41)$$

2.6. Presión parcial de gases

Los gases al interior del volumen de control cambian su presión en el transcurso del tiempo. Lo que afecta directamente en la temperatura de saturación del agua, por lo que en cada intervalo de tiempo se calcula la presión de la mezcla de gases. Con esta presión se obtiene, desde tablas de propiedades del agua (Anexo 1 Figura 6.3), la nueva temperatura de saturación o de cambio de fase del agua. Los gases presentes son aire y vapor de agua. El aire ingresa junto con el agua en el proceso de llenado y el vapor de agua es producto de la vaporización que se busca con el prototipo. El análisis de la presión se llevan a cabo por separado como presiones parciales y luego se suman para obtener la presión del volumen de control.

2.7. Temperatura

Para obtener la temperatura del fluido en cada intervalo de tiempo se utiliza el balance de energía planteado anteriormente y se despeja la temperatura, iterando el balance para buscar el equilibrio de energía con las variables dependientes de la temperatura.

$$T_f = \frac{m_{vc} \cdot C_p \cdot T_i + \dot{I}_{b,i} \cdot A_c \cdot \eta_{opt} \cdot \Delta t - (T_s - T_\infty) \cdot (L_c \cdot 2\pi \cdot r \cdot h) \cdot \Delta t}{m_{vc} \cdot C_p} \quad (42)$$

El valor de Capacidad calorífica específica media es valido entre 0 ° C y 100 ° C lo que es suficiente ya que esta ecuación se utiliza solo hasta la temperatura de saturación.

Luego en la fase de saturación la temperatura permanece constante, el agua comienza a evaporarse y se genera una mezcla agua-vapor, para cuantificar el porcentaje de vapor de esta mezcla se utiliza el concepto de calidad de vapor.

2.8. Calidad de vapor

En la fase de saturación la energía del agua (h_x) se aborda de manera específica (por unidad de masa) y se compara con valores de entalpía de líquido saturado (h_f) y vapor saturado (h_g) a la temperatura de saturación del intervalo de tiempo, para conocer la proporción de vapor en la mezcla.

$$x = \frac{h_x - h_f}{h_g - h_f} \quad (43)$$

De otra forma la calidad de vapor (x) es la cantidad de masa de vapor que hay en la masa total de mezcla.

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{vapor} + m_{agua}} \quad (44)$$

Finalmente para saber la cantidad de vapor que contiene esta mezcla solo basta con multiplicar la masa inicial de agua con la calidad de vapor.

$$m_v = x \cdot m_{vc} \quad (45)$$

2.9. Eficiencia global (η_G)

Un parámetro para evaluar el desempeño del prototipo será la eficiencia global, la cual incorpora todas las eficiencias y pérdidas mencionadas anteriormente. Se obtiene de la razón entre la energía que absorbe el agua y la radiación directa normal (DNI) presente en el intervalo estudiado. Cabe destacar que en algunos días de análisis es posible efectuar más de 1 ciclo de llenado por lo que la energía extraída con la salmuera es incorporada al cálculo de la eficiencia global como energía “parásita”.

$$\eta_G = \frac{Q_u - Q_{perd} - E_{parasita}}{DNI} \quad (46)$$

2.10. Resultados

2.10.1. Equinoccio de otoño

El primer día a considerar es el equinoccio de otoño que corresponde al día 20 de marzo para el año de las mediciones utilizadas, las que se pueden ver a continuación.

Hora	I(b,i) [$\frac{W}{m^2}$]	T. ambiente [°C]	Velocidad viento [$\frac{m}{s}$]
9:00	208,2	16,49	0,95
10:00	420,3	17,96	1,68
11:00	610,3	19,52	2,73
12:00	755,6	20,39	2,52
13:00	839,9	20,83	2,52
14:00	855,4	20,52	2,35
15:00	799,4	20,44	1,67
16:00	71,2	20,14	1,15
17:00	21,6	19,63	1,15
18:00	244,8	19	2,43

Cuadro 2.1: Mediciones utilizadas Equinoccio de otoño

Con los parámetros de el cuadro 2.1, los resultados fueron:

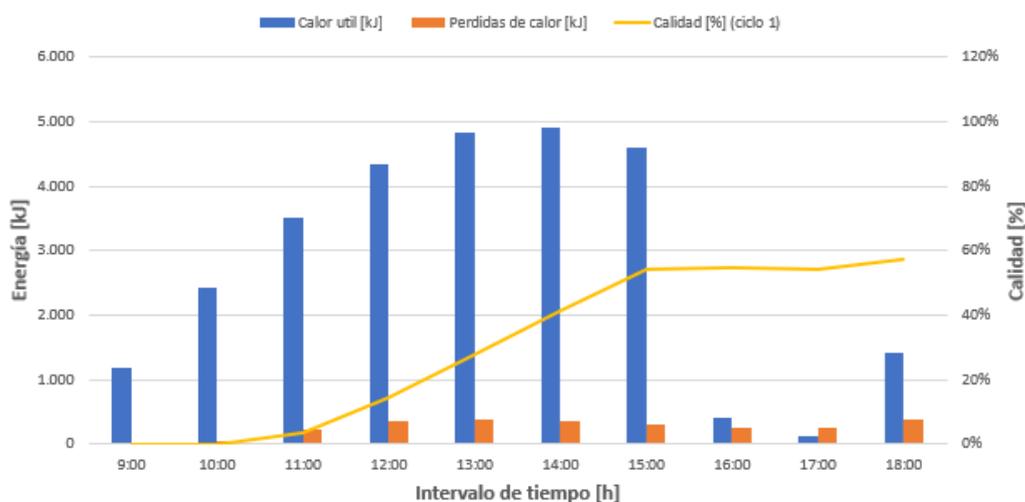


Figura 2.14: Gráfico de resultado prototipo Equinoccio Otoño

En este caso observamos caídas repentinas de la radiación por efectos climáticos. Se logra evaporar 8,6 [kg] de agua con una eficiencia global de 32,3 %.

2.10.2. Solsticio de invierno

El segundo día a considerar es el Solsticio de invierno que corresponde al día 20 de Junio para el año de las mediciones utilizadas, las que se pueden ver a continuación.

Hora	I(b,i) [$\frac{W}{m^2}$]	T. ambiente [°C]	Velocidad viento [$\frac{m}{s}$]
10:00	185,5	12,03	0,34
11:00	331,2	13,77	1,15
12:00	443,0	14,71	0,75
13:00	505,1	15,5	1,04
14:00	508,2	16,18	1,24
15:00	448,9	15,72	0,97
16:00	328,4	15,15	0,77
17:00	148,1	14,51	0,77

Cuadro 2.2: Mediciones utilizadas Solsticio de invierno

Con los parámetros de el cuadro 2.2, los resultados fueron:

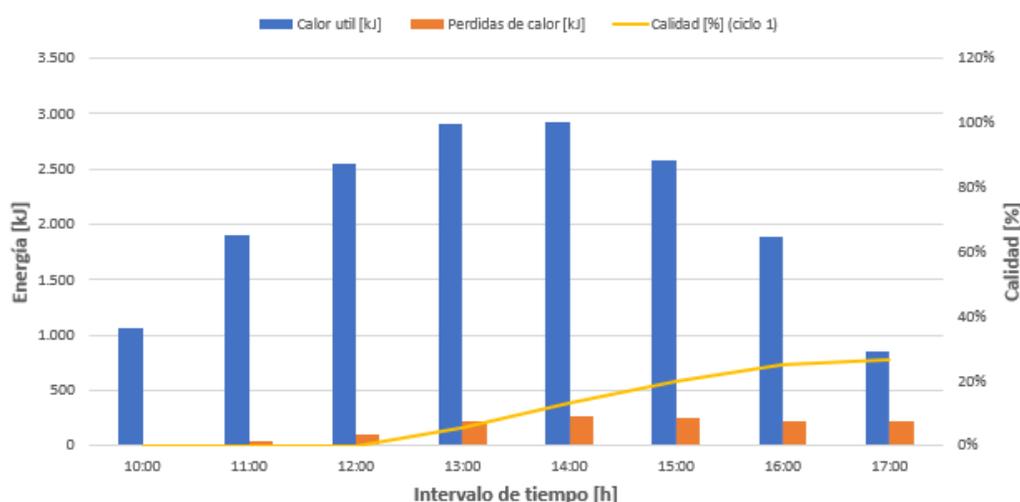


Figura 2.15: Gráfico de resultado prototipo Solsticio de invierno

En este caso, el calor útil no supera los $3000[\frac{kJ}{h}]$ esto debido a una baja radiación directa y a las pocas horas que hay radiación presente. Por otra parte las pérdidas son bajas, debido primero a la baja temperatura del prototipo y segundo por una baja velocidad del viento. Solo se logra evaporar 4 [kg] de agua con una eficiencia global de 24,8 %.

2.10.3. Equinoccio de primavera

El tercer día a considerar es el Equinoccio de primavera que corresponde al día 22 de Septiembre para el año de las mediciones utilizadas, las que se pueden ver a continuación.

Hora	I(b,i) [$\frac{W}{m^2}$]	T. ambiente [°C]	Velocidad viento [$\frac{m}{s}$]
8:00	55,0	9,93	4,17
9:00	251,5	11,48	4,03
10:00	455,8	12,98	4,25
11:00	633,0	14,37	4,77
12:00	761,9	15,16	7,63
13:00	828,9	15,96	8,16
14:00	826,6	16,62	8,61
15:00	754,0	16,18	8,42
16:00	614,3	15,59	8,13
17:00	415,7	14,88	7,76
18:00	165,1	13,62	4,19

Cuadro 2.3: Mediciones utilizadas Equinoccio de primavera

Con los parámetros de el cuadro 2.3, los resultados fueron:

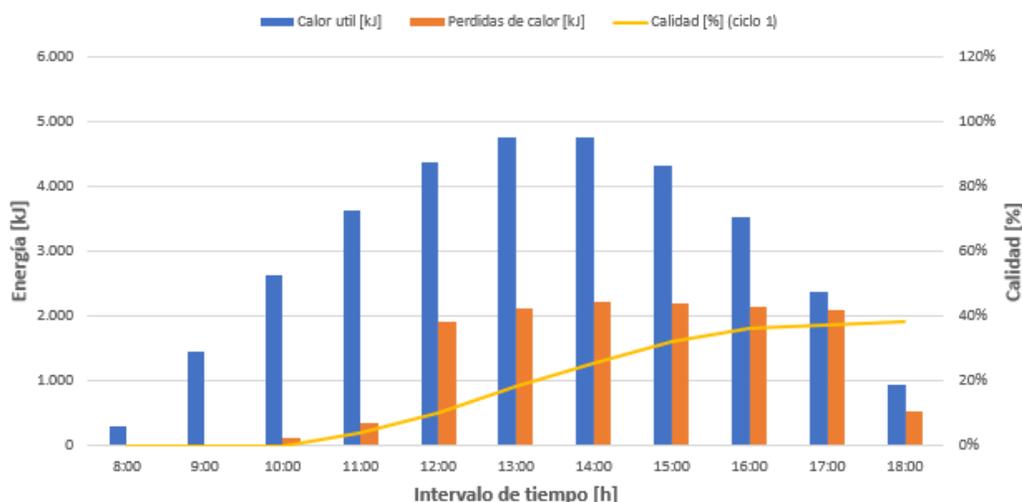


Figura 2.16: Gráfico de resultado prototipo Equinoccio de primavera

En este caso, el calor útil aumenta en comparación al invierno además de un aumento de horas de radiación. Por otra parte las pérdidas son considerables, debido a velocidades de viento que llegan a los 8 [$\frac{m}{s}$] lo que frena considerablemente la evaporación y baja la eficiencia. Solo se logra evaporar 5,8 [kg] de agua con una eficiencia global de 19,9 %.

2.10.4. Solsticio de verano

El cuarto día a considerar es el Solsticio de verano que corresponde al día 21 de Diciembre para el año de las mediciones utilizadas, las que se pueden ver a continuación.

Hora	I(b,i) [$\frac{W}{m^2}$]	T. ambiente [°C]	Velocidad viento [$\frac{m}{s}$]
7:00	14,3	9,59	3,28
8:00	197,5	11,7	3,6
9:00	412,0	13,42	3,82
10:00	621,3	14,99	4,32
11:00	801,6	16,33	4,88
12:00	935,8	17,68	5,14
13:00	1007,7	18,4	5,46
14:00	1013,8	19,04	5,71
15:00	952,9	18,78	6,1
16:00	828,6	18,45	6,43
17:00	649,9	18,05	6,7
18:00	429,9	17,02	5,59
19:00	186,5	16,03	5

Cuadro 2.4: Mediciones utilizadas Solsticio de verano

Con los parámetros de el cuadro 2.4, los resultados fueron:

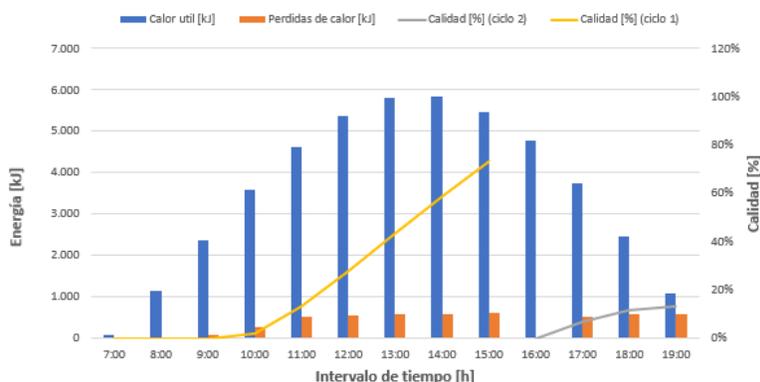


Figura 2.17: Gráfico de resultado prototipo Solsticio de verano

En este día de verano se observa que aumenta la radiación directa, así como también la duración del día. Se obtiene un ciclo de evaporación completo (amarillo) al alcanzar el 74 % de evaporación, con lo que se extrae el vapor y la salmuera procediendo a iniciar un segundo ciclo (gris). Con el retiro de la salmuera se pierde 1682,7 [kJ] de energía. Considerando ambos ciclos, se logra evaporar 13 [kg] de agua con una eficiencia global de 31,4 %.

2.10.5. Análisis de resultados

Con el objetivo de visualizar los resultados obtenidos de manera global, a continuación se presenta un resumen con los parámetros importantes.

Días representativos	Masa vapor [kg]	DNI	I(b,i)	Q_u	Q_p	Eficiencia global [%]
Equinoccio de otoño	8,6	77.929	52.128	27.757	2.602	32,3 %
Solsticio de invierno	4	61.821	31.303	16.668	1.331	24,8 %
Equinoccio de primavera	5,8	97.258	62.229	33.135	13.764	19,9 %
Solsticio de verano	13	126.474	86.959	46.303	4.872	31,4 %

Cuadro 2.5: Resumen de resultados del prototipo

En la primera columna encontramos la masa de vapor que es el parámetro mas importante, ya que es producto que buscamos obtener. En las condiciones estudiadas se observo que el prototipo, es capaz de evaporar un mínimo de 4 [kg] de agua hasta un máximo de 13[kg].

Resulta interesante observar como la energía total de la radiación directa normal (DNI) va disminuyendo, primero por perdidas debidas al ángulo de incidencia, con lo que obtenemos la radiación directa inclinada (I(b,i)), luego a esta se le aplican eficiencias ópticas y geométricas para obtener el calor útil (Q_u) el que entra al fluido y es aquí donde se generan las perdidas térmicas (Q_p). Todas estas eficiencias y perdidas se ven plasmadas en la eficiencia global (η_G). Para analizar de mejor manera cada disminución de energía se hará un desglose de el cuadro anterior (siguiente pagina).

- Razón entre radiación directa normal e incidente:** Con esta relación se representa la radiación que es aprovechada del total, debido a que los rayos solares no son perpendiculares a la superficie. En el peor de los casos solo se aprovecha el 50 % de la radiación y en el mejor el 68,8 %. Para mejorar estos números se necesita que la superficie cambie su posición y encuentre la perpendicularidad con el sol.

Días representativos	DNI	I(b,i)	Razón $\frac{I(b,i)}{DNI}$
Equinoccio de otoño	77.929	52.128	66,9 %
Solsticio de invierno	61.821	31.303	50,6 %
Equinoccio de primavera	97.258	62.229	64,0 %
Solsticio de verano	126.474	86.959	68,8 %

Cuadro 2.6: Razón entre radiación directa normal e incidente

- Razón entre radiación normal incidente y calor útil:** Con esta relación se representa la energía que es aprovechada, del total de radiación que entra por el área de apertura. Estas perdidas son se categorizaron anteriormente, corresponden a la eficiencia óptica ($\eta_{opt} = 0,532$), por lo que depende de las propiedades de los materiales utilizados en el prototipo.

Días representativos	I(b,i)	Q_u	$\frac{Q_u}{I(b,i)}$
Equinoccio de otoño	52.128	27.757	53,2 %
Solsticio de invierno	31.303	16.668	53,2 %
Equinoccio de primavera	62.229	33.135	53,2 %
Solsticio de verano	86.959	46.303	53,2 %

Cuadro 2.7: Razón entre radiación normal incidente y calor útil

- Razón entre calor útil y pérdidas térmicas:** Con esta relación se representa la energía que se disipa al ambiente, debido a que el prototipo esta a mayor temperatura. En el peor de los casos se pierde el 41,5 % de la energía que ingresa al sistema y en el mejor caso solo se pierde un 8 %. Para mejorar estos números se puede aumentar la resistencia térmica del prototipo, lo que seria agregar material con un factor de conductividad bajo.

Días representativos	Q_u	Q_p	$\frac{Q_p}{Q_u}$
Equinoccio de otoño	27.757	2.602	9,4 %
Solsticio de invierno	16.668	1.331	8,0 %
Equinoccio de primavera	33.135	13.764	41,5 %
Solsticio de verano	46.303	4.872	10,5 %

Cuadro 2.8: Razón entre calor útil y pérdidas térmicas

Capítulo 3: Proponer mejoras y evaluar técnicamente.

Respecto al análisis de los resultados obtenidos en la sección anterior se busca generar mejoras, ya sea de funcionamiento o estructurales, para lograr aumentar la eficiencia del prototipo y lograr con esto aumentar la cantidad de agua producida o al menos lograr producir una fracción bajo los peores escenarios. Mejoras a evaluar:

- La primera mejora que se evaluara, sera implementar seguimiento solar en el prototipo lo que es muy importante para sistemas de concentración solar. Con esto se busca aumentar la razón entre radiación directa normal e incidente, lo que implica un mejor aprovechamiento de la radiación total.
- La segunda mejora que se evaluara, sera aislar el sistema fluido portador. Con esto se busca disminuir la razón entre las perdidas y el calor útil, basado en disminuir las perdidas.

3.1. Seguimiento solar

El seguimiento solar busca encontrar la perpendicularidad del sol, para este caso se utilizara seguimiento solar en el eje polar. para simular este seguimiento se utiliza el siguiente arreglo.

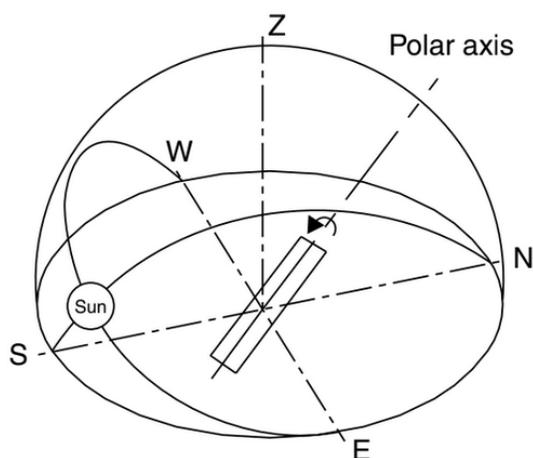


Figura 3.1: Eje Polar Norte-Sur con seguimiento Este-Oeste

Para un plano que gira alrededor de un eje norte-sur, con ajuste continuo, θ es igual a

$$\cos(\theta) = \cos(\delta)$$

. Como puede verse en la Figura 3.1, el eje del colector está inclinado igual a la latitud local. Para esta disposición, el sol es normal al colector en los equinoccios ($\delta = 0$).

La pendiente de la superficie varía continuamente y está dada por

$$\tan(\beta) \frac{\tan(L)}{\cos(Z_s)}$$

El ángulo de azimut de la superficie está dado por

$$Z_s = \tan^{-1} \frac{\sin(\phi) \sin(z)}{\cos(\theta') \sin(L)} + 180C_1C_2$$

3.1.1. Resultados

Con los el nuevo ángulo de incidencia, haciendo el mismo análisis de la sección anterior se obtienen los siguientes datos:

■ Equinoccio de otoño

El primer día a considerar es el equinoccio de otoño que corresponde al día 20 de marzo para el año de las mediciones utilizadas, las que se pueden ver a continuación.

Hora	I(b,i) [$\frac{W}{m^2}$]	T. ambiente [°C]	Velocidad viento [$\frac{m}{s}$]
9:00	826,1	16,49	0,95
10:00	905,0	17,96	1,68
11:00	946,0	19,52	2,73
12:00	966,4	20,39	2,52
13:00	970,5	20,83	2,52
14:00	961,2	20,52	2,35
15:00	936,3	20,44	1,67
16:00	93,7	20,14	1,15
17:00	35,2	19,63	1,15
18:00	575,3	19	2,43

Cuadro 3.1: Mediciones utilizadas Equinoccio de otoño

Con los parámetros de el cuadro 3.1, los resultados fueron:

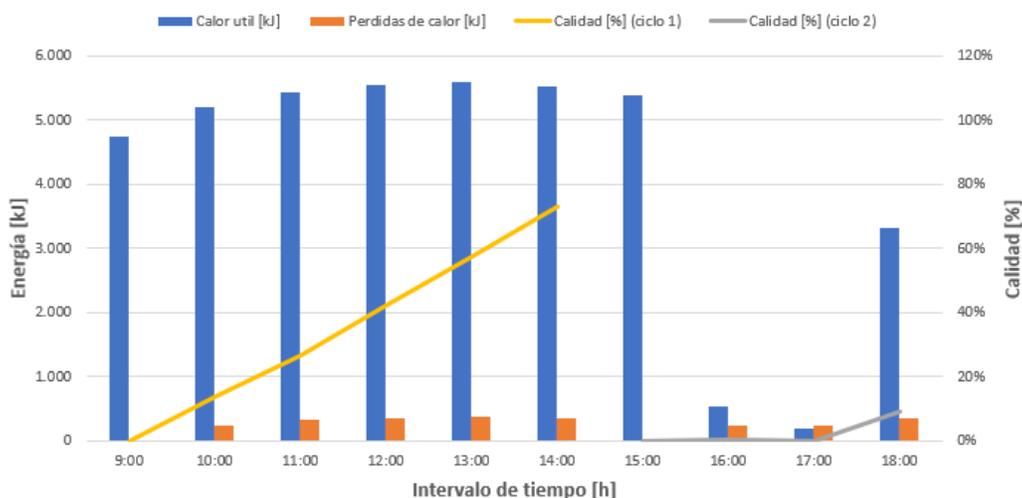


Figura 3.2: Gráfico de resultado prototipo Equinoccio Otoño

En este caso observamos caídas repentinas de la radiación por efectos climáticos, pero debido al seguimiento solar se observa una mayor radiación en los extremos del día. Se obtiene un ciclo de evaporación completo (amarillo) al alcanzar el 73 % de evaporación, con lo que se extrae el vapor y la salmuera procediendo a iniciar un segundo ciclo (gris). Con el retiro de la salmuera se pierde 1645,1 [kJ] de energía. Se logra evaporar 12,3 [kg] de agua con una eficiencia global de 47,9 %.

■ Solsticio de invierno

El segundo día a considerar es el Solsticio de invierno que corresponde al día 20 de Junio para el año de las mediciones utilizadas, las que se pueden ver a continuación.

Hora	I(b,i) [$\frac{W}{m^2}$]	T. ambiente [°C]	Velocidad viento [$\frac{m}{s}$]
10:00	646,5	12,03	0,34
11:00	714,2	13,77	1,15
12:00	744,0	14,71	0,75
13:00	750,4	15,5	1,04
14:00	735,0	16,18	1,24
15:00	691,6	15,72	0,97
16:00	598,0	15,15	0,77
17:00	371,7	14,51	0,77

Cuadro 3.2: Mediciones utilizadas Solsticio de invierno

Con los parámetros de el cuadro 3.2, los resultados fueron:

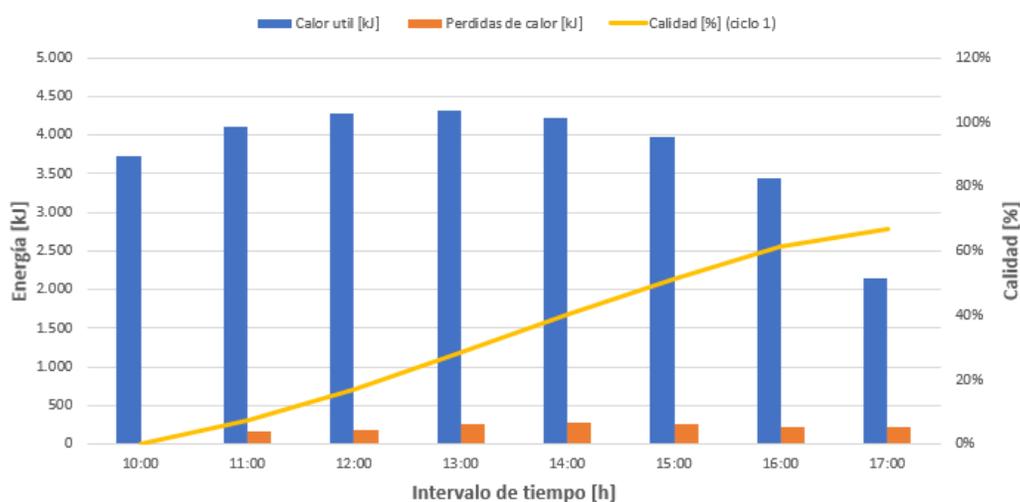


Figura 3.3: Gráfico de resultado prototipo Solsticio de invierno

Se logra superar los $3000[\frac{kJ}{h}]$ que se lograban sin la mejora, pero por la escasa cantidad de horas que hay radiación presente no se logra completar 1 ciclo. Se evaporan 10 [kg] de agua con una eficiencia global de 46,3 %.

■ Equinoccio de primavera

El tercer día a considerar es el Equinoccio de primavera que corresponde al día 22 de Septiembre para el año de las mediciones utilizadas, las que se pueden ver a continuación.

Hora	I(b,i) [$\frac{W}{m^2}$]	T. ambiente [°C]	Velocidad viento [$\frac{m}{s}$]
8:00	659,2	9,93	4,17
9:00	811,0	11,48	4,03
10:00	883,9	12,98	4,25
11:00	922,2	14,37	4,77
12:00	940,4	15,16	7,63
13:00	943,0	15,96	8,16
14:00	930,8	16,62	8,61
15:00	901,2	16,18	8,42
16:00	843,4	15,59	8,13
17:00	728,7	14,88	7,76
18:00	441,6	13,62	4,19

Cuadro 3.3: Mediciones utilizadas Equinoccio de primavera

Con los parámetros de el cuadro 3.3, los resultados fueron:

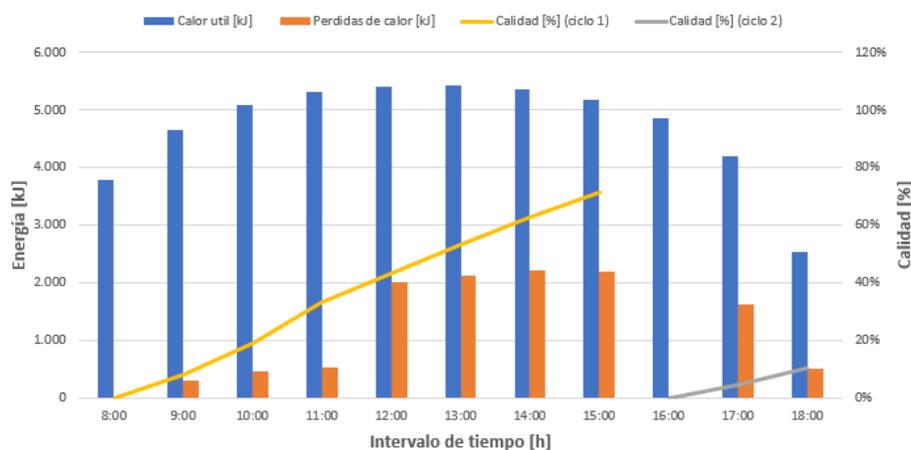


Figura 3.4: Gráfico de resultado prototipo Equinoccio de primavera

En este caso, el calor útil aumenta en comparación al invierno además de un aumento de horas de radiación. Por otra parte las pérdidas son considerables, debido a velocidades de viento que llegan a los $8 \frac{m}{s}$. Se obtiene un ciclo de evaporación completo

(amarillo) al alcanzar el 72 % de evaporación, con lo que se extrae el vapor y la salmuera procediendo a iniciar un segundo ciclo (gris). Con el retiro de la salmuera se pierde 1853,3 [kJ] de energía. Se logra evaporar 12,3 [kg] de agua con una eficiencia global de 39,0 %.

■ Solsticio de verano

El cuarto día a considerar es el Solsticio de verano que corresponde al día 21 de Diciembre para el año de las mediciones utilizadas, las que se pueden ver a continuación.

Hora	DNI [$\frac{W}{m^2}$]	T. ambiente [°C]	Velocidad viento [$\frac{m}{s}$]
7:00	623,0	9,59	3,28
8:00	775,1	11,7	3,6
9:00	853,5	13,42	3,82
10:00	898,7	14,99	4,32
11:00	925,4	16,33	4,88
12:00	940,0	17,68	5,14
13:00	941,4	18,4	5,46
14:00	933,5	19,04	5,71
15:00	915,4	18,78	6,1
16:00	883,0	18,45	6,43
17:00	827,5	18,05	6,7
18:00	725,9	17,02	5,59
19:00	500,8	16,03	5

Cuadro 3.4: Mediciones utilizadas Solsticio de verano

Con los parámetros de el cuadro 3.4, los resultados fueron:

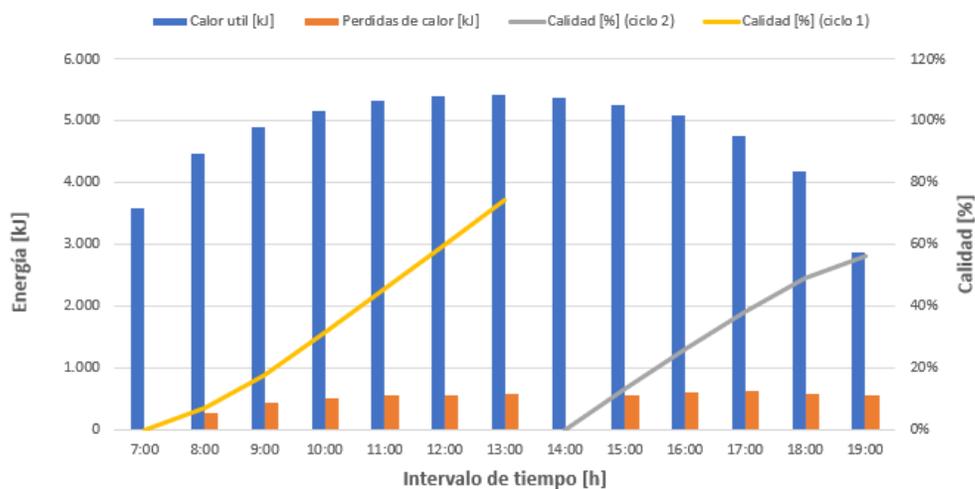


Figura 3.5: Gráfico de resultado prototipo Solsticio de verano

En este día de verano se observa que aumenta la radiación directa, así como también la duración del día. Se obtiene un ciclo de evaporación completo (amarillo) al alcanzar el 74 % de evaporación, con lo que se extrae el vapor y la salmuera procediendo a iniciar un segundo ciclo (gris). Con el retiro de la salmuera se pierde 1616,2 [kJ] de energía. Considerando ambos ciclos, se logra evaporar 19,6 [kg] de agua con una eficiencia global de 42,9 %.

3.1.2. Análisis de resultados

Con el objetivo de visualizar los resultados obtenidos de manera global, a continuación se presenta un resumen con los parámetros importantes.

Días representativos	Masa vapor [kg]	DNI	I(b,i)	Q_u	Q_p	Eficiencia global [%]
Equinoccio de otoño	12,3	77.929	77.929	41.495	2.550	47,9 %
Solsticio de invierno	10,0	61.821	56.715	30.199	1.575	46,3 %
Equinoccio de primavera	12,3	97.258	97.258	51.787	12.003	39,0 %
Solsticio de verano	19,6	126.474	116.028	61.782	5.868	42,9 %

Cuadro 3.5: Resumen de resultados del prototipo con seguimiento solar

En la primera columna encontramos la masa de vapor que es el parámetro mas importante, ya que es producto que buscamos obtener. En las nuevas condiciones estudiadas se observo que el prototipo, es capaz de evaporar un mínimo de 10 [kg] de agua, mucho mayor que los 4 [kg] del mismo periodo sin seguimiento hasta un máximo de 19,6[kg] también mayor a los 13[kg] sin seguimiento.

Para analizar de mejor manera cada disminución de energía se hará un desglose de el cuadro anterior.

- Razón entre radiación directa normal e incidente:** Con esta relación se representa la radiación que es aprovechada del total, debido a que los rayos solares no son perpendiculares a la superficie. El caso mas desfavorable corresponde a los solsticios donde solo se aprovecha el 91,7 % de la radiación, en el caso de los equinoccios se aprovecha la totalidad de la energía disponible. Se adjunta columna “Referencia” en la cual están los valores de la razón para el prototipo sin la mejora evaluada.

Días representativos	Q_u	Q_p	$\frac{I(b,i)}{DNI}$	Referencia
Equinoccio de otoño	77.929	77.929	100,0 %	66,9 %
Solsticio de invierno	61.821	56.715	91,7 %	50,6 %
Equinoccio de primavera	97.258	97.258	100,0 %	64,0 %
Solsticio de verano	126.474	116.028	91,7 %	68,8 %

Cuadro 3.6: Razón entre radiación directa normal e incidente con seguimiento solar

3.2. Aislar sistema fluido-portador

Para disminuir las pérdidas de calor en el sistema fluido-portador se analizarán por separado 2 partes fundamentales de este:

- Tubería receptora
- Tubería de recirculación

En las cuales se aplicarán los respectivos parámetros incorporados y se revisarán los resultados que se obtienen

3.3. Aislar tubería de recirculación

Se agregará en toda la tubería que no recibe radiación una espuma aislante de forma tubular o cañuela. Al momento de utilizar aislantes es importante analizar si estos mejoran realmente la condición inicial, ya que la capa aislante aumenta el área de manto exterior, aumentando con esto el área de transferencia de calor. El material utilizado tiene una conductividad térmica $k_{aislante} = 0,039 \left[\frac{W}{m^{\circ}K} \right]$ y un espesor de 30 [mm] lo que resulta en un radio exterior del aislante $r_a = 42,7 [mm]$. Con estos parámetros se recalculan las resistencias térmicas y luego las pérdidas de calor.

Para visualizar de mejor manera a continuación se muestran las secciones transversales de las tuberías de recirculación y receptora:

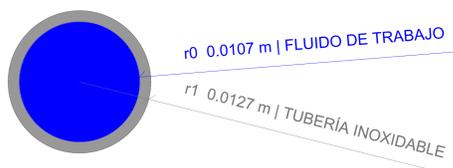


Figura 3.6: Sección tubería receptora

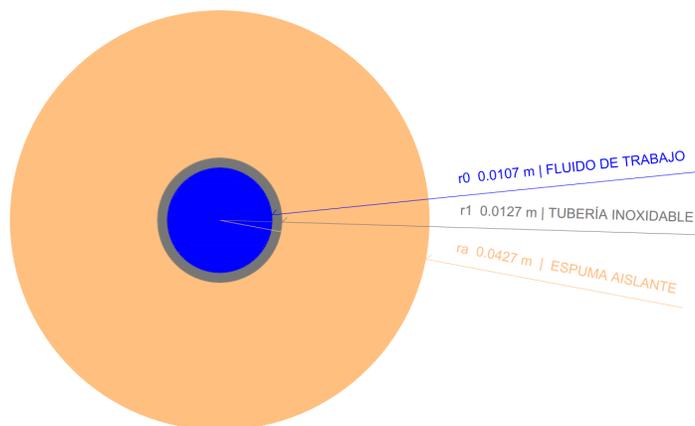


Figura 3.7: Sección tubería de recirculación

■ Resistencia térmica

Como se planteo anteriormente en la presentación del modelo, las perdidas de calor se evalúan con ayuda de la resistencia térmica (R) resulta de la suma de dos resistencias en paralelo, para la tubería receptora (R_1) que permanece sin cambios

$$R_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,0127 \cdot 3 \cdot h} \tag{47}$$

y para la tubería de recirculación R_2 cambia al agregarse la capa aislante. Se suma en serie la resistencia por conducción del aislante con la convección exterior.

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{0,0427}{0,0127}\right)}{2\pi \cdot 4 \cdot k_{aislante}} + \frac{1}{2\pi \cdot 0,0427 \cdot 4 \cdot h} \tag{48}$$

Finalmente se suman en paralelo para luego evaluar las perdidas de calor. El resto de parámetros se evalúan de igual manera que el prototipo sin mejoras.

3.3.1. Resultados

Días representativos	Masa vapor [kg]	Referencia[kg]	I(b,i)	Q_u	Q_p	Eficiencia global [%]
Equinoccio de otoño	8,6	8,6	52.128	27.757	2.580	32,3 %
Solsticio de invierno	4	4	31.303	16.668	1.531	24,5 %
Equinoccio de primavera	8,4	5,8	62.229	33.135	7.934	25,9 %
Solsticio de verano	13	13	86.959	46.303	3.966	32,2 %

Cuadro 3.7: Resumen de resultados del prototipo con aislante térmico

En la segunda columna encontramos la masa de vapor y en la tercera la referencia de masa evaporada sin mejora. En las nuevas condiciones estudiadas solo se observo cambios en el equinoccio de primavera, donde las velocidades de viento eran elevadas donde logro evaporar 8,4 [kg] de agua respecto a los 5,8 [kg] obtenidos anteriormente aislante. En cuanto a la eficiencia global solo hay pequeñas variaciones siendo la mas importante en el mismo tramo del equinoccio de primavera donde se opero con 25,9 % de eficiencia respecto a 19,9 % anterior.

Para analizar de mejor manera cada disminución de energía se hará un desglose de el cuadro anterior.

- **Razón entre calor útil y pérdidas térmicas:** Podemos ver con mayor detalle como vario la eficiencia térmica, solo siendo considerable la baja en el equinoccio de primavera. En cambio se que que en el solsticio de invierno incluso aumentan las pérdidas, esto es debido a un bajo coeficiente de convección y una capa de aislante insuficiente hicieron el efecto contrario, aumentando la transferencia de calor.

Días representativos	Q_u	Q_p	Razón $\frac{Q_p}{Q_u}$	Referencia
Equinoccio de otoño	27.757	2.580	9,3 %	9,4 %
Solsticio de invierno	16.668	1.531	9,2 %	8,0 %
Equinoccio de primavera	33.135	7.934	23,9 %	41,5 %
Solsticio de verano	46.303	3.966	8,6 %	10,5 %

Cuadro 3.8: Razón entre calor útil y pérdidas térmicas, de mejora aislante

3.4. Cubierta tubería receptora

Se agregara en toda la tubería receptora una cubierta de policarbonato y se sellaran los extremos. Esta cubierta tiene la doble misión de reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo metálico y de proteger su recubrimiento selectivo de las inclemencias meteorológicas. Este material tiene una conductividad térmica $k_{policarbonato} = 0,2 \left[\frac{W}{m^{\circ}K} \right]$ y una transmisividad $\tau = 0,92$. El formato es una tubería de diámetro exterior de 3[in] y un diámetro interior de $2\frac{3}{4}$ [in] lo que en sistema internacional da los siguientes radios, radio exterior $r_3 = 38,1[mm]$ y radio interior $r_2 = 34,925[mm]$. Estos parámetros se utilizaran para recalculer la eficiencia óptica, resistencias térmicas y con esto el calor útil y las perdidas de calor de la mejora. Para visualizar de mejor manera a continuación se muestran las secciones transversales de las tuberías de recirculación y receptora:

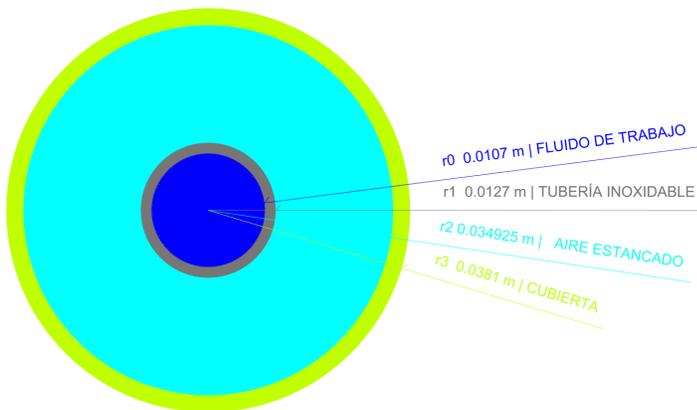


Figura 3.8: Sección tubería receptora

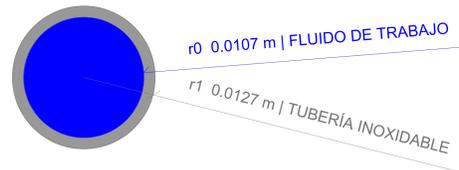


Figura 3.9: Sección tubería de recirculación

- Resistencia térmica** Como se planteo anteriormente en la presentación del modelo, las perdidas de calor se evalúan con ayuda de la resistencia térmica (R) resulta de la suma de dos resistencias en paralelo R_1 y R_2 , para la tubería receptora (R_1) donde se agrego la cubierta, se suma en serie: la resistencia por conducción del aire estancado, con la resistencia por conducción de la cubierta de policarbonato y la resistencia por convección exterior.

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{0,034925}{0,0127}\right)}{2\pi \cdot 3 \cdot k_{aire}} + \frac{\ln\left(\frac{0,0381}{0,0349}\right)}{2\pi \cdot 3 \cdot k_{policarbonato}} + \frac{1}{2\pi \cdot 0,0381 \cdot 3 \cdot h} \quad (49)$$

y para la tubería de recirculación R_2 que permanece sin cambios:

$$R_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,0127 \cdot 4 \cdot h} \quad (50)$$

Finalmente se suman en paralelo para luego evaluar las pérdidas de calor. El resto de parámetros se evalúan de igual manera que el prototipo sin mejoras.

- **Eficiencia óptica** Al incorporar una cubierta, parte de los rayos la que atraviesan son absorbidos o reflejados. Para esto se incorpora el parámetro de transmisividad (τ). Para calcular la eficiencia óptica se involucran 4 factores definidos en el capítulo 1,

$$\eta_{opt} = \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \quad (51)$$

de los cuales ρ y α son propiedades de los materiales definidos en este capítulo sección prototipo. Finalmente juntando los factores:

$$\eta_{opt} = 0,59 \cdot 0,95 \cdot 0,92 \cdot 0,95 = 0,4899 \quad (52)$$

Presentados los cambios respecto al modelo inicial se busca evaluar la mejora y ver si predomina la disminución de las pérdidas térmicas o la disminución de la radiación recibida.

3.4.1. Resultados

Días representativos	Masa vapor [kg]	Referencia	I(b,i)	Q_u	Q_p	Eficiencia global [%]
Equinoccio de otoño	7,7	8,6	52.128	25.536	2.342	29,8 %
Solsticio de invierno	3	4	31.303	15.335	1.245	22,8 %
Equinoccio de primavera	6,7	5,8	62.229	30.484	8.990	22,1 %
Solsticio de verano	12	13	86.959	42.599	3.904	28,9 %

Cuadro 3.9: Resumen de resultados del prototipo con cubierta

En la segunda columna encontramos la masa de vapor y en la tercera la referencia de masa evaporada por el prototipo sin mejoras. En las nuevas condiciones estudiadas se observó una disminución del agua evaporada en casi todos los días, salvo en el equinoccio de primavera,

donde logro evaporar 6,7 [kg] de agua respecto a los 5,8 [kg] obtenidos anteriormente sin cubierta. Estas disminuciones tienen directa relación con la transmisividad de la cubierta lo que disminuyo el calor útil, lo que no logro ser compensado con la baja en las pérdidas.

En cuanto a la eficiencia global solo hay pequeñas bajas (2 %) excepto en el equinoccio de primavera donde se opero con 22,1 % de eficiencia respecto a 19,9 % anterior.

Para analizar de mejor manera cada disminución de energía se hará un desglose de el cuadro anterior.

- **Razón entre calor útil y pérdidas térmicas:** Podemos ver con mayor detalle como vario la eficiencia térmica, solo siendo considerable la baja en el equinoccio de primavera.

Días representativos	Q_u	Q_p	Razón $\frac{Q_p}{Q_u}$	Referencia
Equinoccio de otoño	25.536	2.342	9,2 %	9,4 %
Solsticio de invierno	15.335	1.245	8,1 %	8,0 %
Equinoccio de primavera	30.484	8.990	29,5 %	41,5 %
Solsticio de verano	42.599	3.904	9,2 %	10,5 %

Cuadro 3.10: Razón entre calor útil y pérdidas térmicas, de mejora cubierta policarbonato

Realizado el análisis, para las escasas pérdidas que presenta el prototipo en las condiciones estudiadas no ayuda la incorporación de una cubierta ya que no se con-dice con la energía perdida por acción de la cubierta. Se requeriría utilizar un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmisividad y, en consecuencia, el rendimiento óptico del colector.

Capítulo 4: Rediseño conceptual basado en resultados obtenidos.

Este rediseño va orientado a mejorar la función desalinizadora del prototipo y el transporte de vapor, mas que su eficiencia en si. De forma de hacer el proceso de desalinización mas efectivo sin efectos no deseados como las incrustaciones de sal en las tuberías. Estas incrustaciones, se producen al evaporar toda el agua en el objetivo de sobre-calentar el vapor y lograr transportarlo aguas arriba.

4.1. Propuesta 1: Reorganización de prototipo actual

Esta primera propuesta es una reorganización de los 3 módulos existentes con el objetivo de generar la presión necesaria de vapor para que este sea transportado aguas arriba. En la figura 4.1 se observa la nueva disposición de los módulos y estanque.

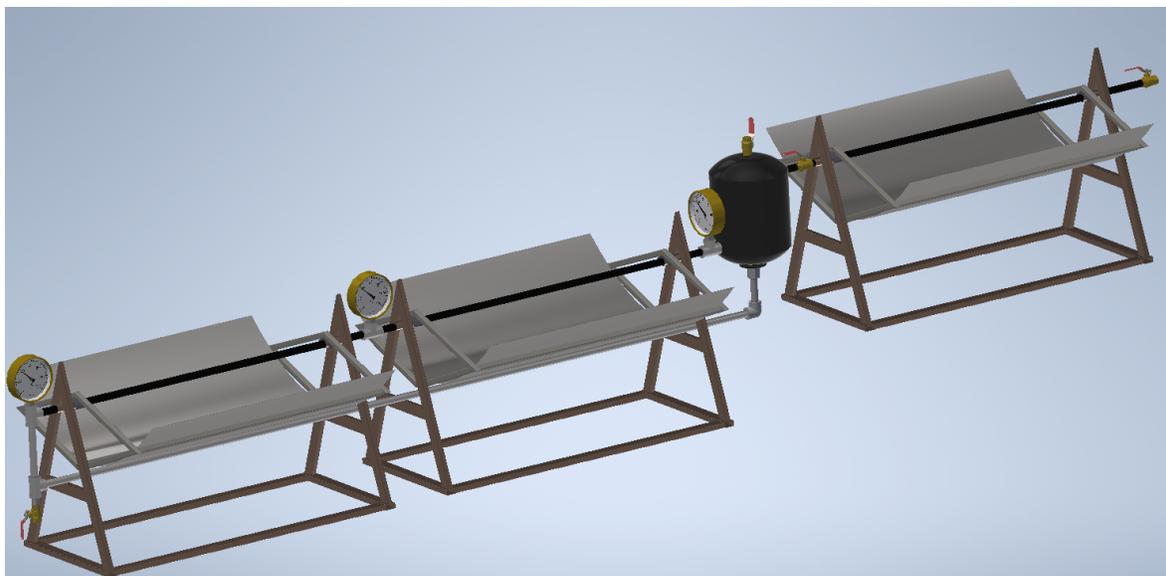


Figura 4.1: Diseño 3D propuesta 1.

Se observan 2 módulos a la izquierda del estanque, estos 2 módulos formaran parte de la etapa de desalinización. En esta etapa el agua salada recirculara por el prototipo hasta

evaporarse, cuando se haya alcanzado un 80 % de evaporación se deberá iniciar un nuevo ciclo de llenado, para evitar que las sales se adhieran excesivamente sobre las paredes de las tuberías. En la etapa de desalinización se separa la salmuera del vapor. El vapor se extrae en el estanque separador pasando al tercer y ultimo modulo donde se sobre-calentara para por ser impulsado aguas arriba por el sistema de transporte hasta el condensador. Básicamente esta reorganización busca lograr el objetivo de presurizar el vapor para ser transportado, pero no solucionando de manera efectiva las acumulaciones de sal sobre las tuberías, lugar de difícil acceso para mantener.

4.2. Propuesta 2: Utilizar fluido de trabajo

La segunda propuesta igual consta de 2 etapas, desalinización y sobrecalentamiento. En la figura 4.2 se observa la disposición de las componentes.

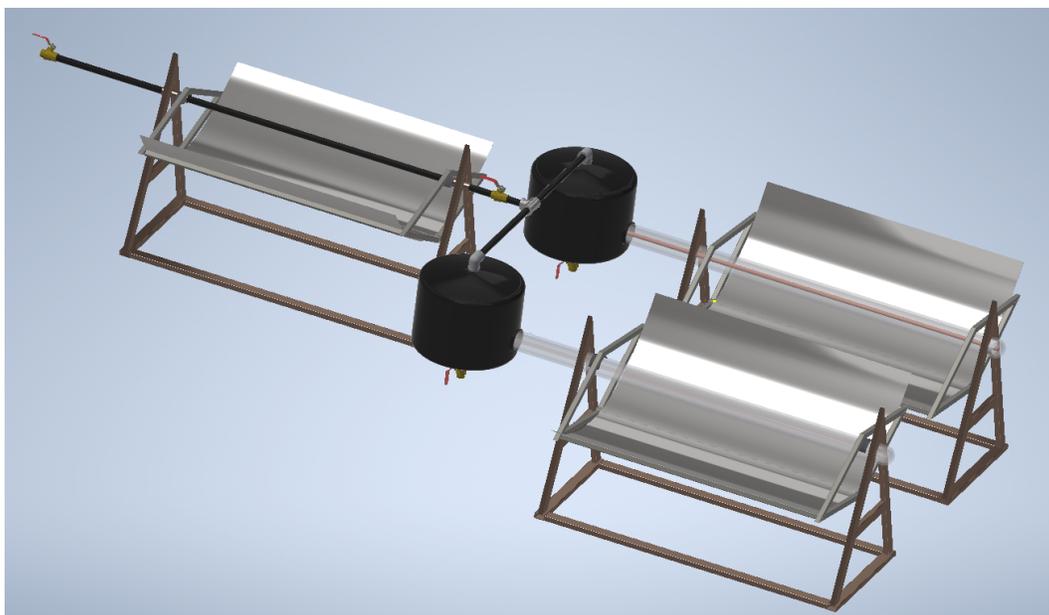


Figura 4.2: Diseño 3D, propuesta 2.

Los módulos en paralelo que se observan en la derecha junto con los estanques en negro pertenecen a la etapa de desalinización y el modulo de la izquierda a la etapa de sobrecalentamiento. Se utiliza un fluido de trabajo para la etapa de desalinización. Para esta aplicación al ser un prototipo de baja escala no se justifica la utilización de aceites sintéticos, ya que

sería muy difícil el sistema de bombeo y control, por lo que se propone utilización de heat pipes. Al interior del tubo receptor habría algún alcohol y entre el tubo receptor y la cubierta de cristal se buscaría mantener el vacío. Estos heat pipes transferirán el calor en 2 estanques (cilindros de gas mecanizados) los cuales contienen el agua de salada. Esto se aprecia en la figura 4.3

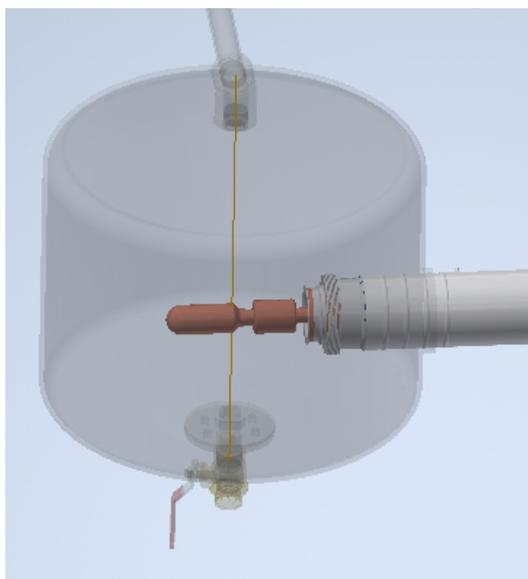


Figura 4.3: Diseño 3D estanque separador, propuesta 2.

Estos estanques cumplen varias funciones, primero como se explico anteriormente funcionan como intercambiadores de calor entre el fluido de trabajo y el agua salada, segundo aquí es donde se producirá la desalinización y tercero funcionan como separadores de vapor. Una vez separada la salmuera del vapor, el vapor es extraído por la parte superior a un ultimo modulo para sobre-calentar el vapor con el fin de presurizarlo y con esto poder ser transportado aguas arriba.

Un aspecto positivo es que el agua de mar no se evapora dentro de las tuberías sino en los estanques, lo que evita acumulaciones o incrustaciones de sal sobre las paredes de las tuberías y facilita la limpieza de las partes ya que estas solo son los estanques y cuentan con un mejor acceso. Otro punto importante de utilizar un fluido de trabajo, es que el agua solo se evaporara y sobre-calentara en la segunda etapa, lo que evita la preocupación de diseño de componentes para altas presiones en la primera parte.

Conclusiones

En base a los resultados finales obtenidos durante el análisis, y teniendo presente los objetivos planteados al comienzo de ese trabajo, es posible concluir que:

- Se logra evaluar el funcionamiento del evaporador del prototipo, encontrando la cantidad de vapor que genera y su eficiencia gracias al análisis del estado del prototipo construido y de las tecnologías de concentradores solares.
- Respecto a las mejoras evaluadas, no todas tuvieron resultados positivos. El seguimiento solar fue la mejora que aumento en mayor manera el desempeño del prototipo logrando aumentar, en algunos casos, la masa de vapor en un 150 %. Por otro lado respecto las mejoras que buscaban disminuir las pérdidas térmicas no fueron tan satisfactorias, el aislante solo mostró un pequeño aumento de masa evaporada salvo en la evaluación del equinoccio de primavera donde logro evitar las altas pérdidas producto del viento. En el caso de la cubierta agregada a la tubería receptora esta genero una disminución del vapor generado. Si bien hubo una merma en las pérdidas de calor, también se redujo la eficiencia óptica del prototipo lo que ocasiono que la energía de entrada sea menor. Cabe destacar que estos resultados van en directa relación de la ubicación utilizada para el análisis, por lo que en otras condiciones meteorológicas menos favorables, el aislante térmico si puede ser considerado una mejora efectiva.
- Tomando en cuenta que este sistema busca la desalinización de agua y generar vapor sobre-calentado para ser transportado aguas arriba al mismo tiempo, el prototipo no las efectúa de manera eficiente y su mantención no es fácil. Por lo surgieron ideas de rediseño plasmadas en el ultimo capítulo, con el fin de adecuar el prototipo actual a nuevas versiones que resuelvan los problemas actuales. Particularmente la propuesta 2, que incluye un fluido de trabajo, es particularmente atractiva por su facilidad de mantención, su mediana complejidad de construcción y que utiliza algunos elementos reutilizados. Eliminando el concepto de transporte del vapor generado y utilizando un condensador inmediatamente después de la generación de vapor saturado, los resultados serian mucho mejores si se busca la desalinización de agua. Por lo que se abren

nuevas posibilidades, que invitan a explorar la implementación de este tipo de sistemas en aplicaciones a mayor escala que requieran de energía térmica, tanto de alta como de baja entalpía, y con el valor agregado de operar de forma económica y ecológica.

- Finalmente se concluye que el proceso de diseño y evaluación técnica de un proyecto es una parte muy importante que debe exponer todos los posibles escenarios o requerimientos para poder representar de forma lo mas real posible el dispositivo o proceso diseñado.

Referencias

- [1] E.ZARZA, L. VALENZUELA, J. LEÓN, D. WEYERS, M. EICKHOFF, M.; ECK, M.; HENNECKE, K. The DISS Project: Direct Steam Generation in Parabolic Trough Systems - Operation and Maintenance Experience and Update on Project Status. Journal of Solar Energy Engineering. Vol.124:126-133. May. 2002.
- [2] Kalogirou, Soteris. Solar energy engineering : processes and systems . 1st ed. USA, 2009.
- [3] Explorador solar. [En línea] <<http://solar.minenergia.cl/exploracion> >. [Consulta: 27 - 03- 2021]
- [4] Software Tonatiuh y postprocesado de datos. [En línea] <https://github.com/iat-cener/tonatiuh?fbclid=IwAR3DCdVzEgX0QvMyNr8yGqGP-Ukg18hwi6AC_jufkOvTHuRY_AeAmlvbnQc >. [Consulta: 27 - 03- 2021]
- [5] El mundo se seca gota a gota. [En línea] <<https://www.greenpeace.org/chile/noticia/issues/climayenergia/el-mundo-se-seca-gota-a-gota/> >. [Consulta: 03 - 06- 2021]
- [6] Global solar atlas[En línea] <<https://globalsolaratlas.info/map?c=-22.268764,-89.912109,3s=-21.000218,-61.000656m=site> >. [Consulta: 04 - 06- 2021]
- [7] La desconocida historia de las primeras plantas desaladoras solares del mundo en el desierto de Atacama [En línea] <<https://piensachile.com/2017/04/09/la-desconocida-historia-las-primeras-plantas-desaladoras-solares-del-mundo-desierto-atacama/> >. [Consulta: 04 - 06- 2021]
- [8] El salto de las energías renovables en Chile bate todos los récords proyectados [En línea] <<https://acera.cl/el-salto-de-las-energias-renovables-en-chile-bate-todos-los-records-proyectados/> >. [Consulta: 04 - 06- 2021]
- [9] Para la historia; Chile inaugura la primera central termosolar de América Latina [En línea] <<https://www.infoenergetica.com/chile-inaugura-cerro-dominador> >. [Consulta: 09 - 06- 2021]

- [10] DUFFIE, John A. BECKMAN, William A. Solar Engineering of Thermal Processes . 4th ed. USA, John Wiley Sons, 2013. 322p.
- [11] Desalación de agua. [En línea] <<https://www.accion.com/es/tratamiento-de-agua/desalacion/>>. [Consulta: 09 - 06- 2021]
- [12] DUFFIE, John A. BECKMAN, William A. Solar Engineering of Thermal Processes . 4th ed. USA, John Wiley Sons, 2013. 338p.
- [13] YUNUS A. ÇENGEL. Transferencia de calor y masa. 3st ed. University of Nevada, Reno. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2007. 366p.
- [14] YUNUS A. ÇENGEL. Transferencia de calor y masa. 3st ed. University of Nevada, Reno. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2007. 365p.
- [15] YUNUS A. ÇENGEL. Transferencia de calor y masa. 3st ed. University of Nevada, Reno. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2007. 358p.
- [16] YUNUS A. ÇENGEL. Transferencia de calor y masa. 3st ed. University of Nevada, Reno. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2007. 356p.

Anexos

Anexo A: Tablas de propiedades de materiales y fluidos utilizados

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., <i>T</i> °C	Pres. sat., <i>P</i> _{sat} kPa	Volumen específico, <i>m</i> ³ /kg		Energía interna, <i>kJ</i> /kg			Entalpía, <i>kJ</i> /kg			Entropía, <i>kJ</i> /kg · <i>K</i>		
		Liq. sat., <i>v</i> _f	Vapor sat., <i>v</i> _g	Liq. sat., <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Vapor sat., <i>u</i> _g	Liq. sat., <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Vapor sat., <i>h</i> _g	Liq. sat., <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Vapor sat., <i>s</i> _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Figura 6.1: Agua saturada. Tabla de temperaturas

Agua saturada. Tabla de temperaturas (conclusión)

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Liq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Liq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Liq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Liq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
		205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Figura 6.2: Agua saturada. Tabla de temperaturas (continuación)

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., <i>P</i> kPa	Temp. sat., <i>T_{sat}</i> °C	Volumen específico, <i>m</i> ³ / <i>kg</i>		Energía interna, <i>kJ/kg</i>			Entalpía, <i>kJ/kg</i>			Entropía, <i>kJ/kg · K</i>		
		Líqu. sat., <i>v_f</i>	Vapor sat., <i>v_g</i>	Líqu. sat., <i>u_f</i>	Evap., <i>u_{fg}</i>	Vapor sat., <i>u_g</i>	Líqu. sat., <i>h_f</i>	Evap., <i>h_{fg}</i>	Vapor sat., <i>h_g</i>	Líqu. sat., <i>s_f</i>	Evap., <i>s_{fg}</i>	Vapor sat., <i>s_g</i>
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Figura 6.3: Agua saturada. Tabla de presiones

Agua saturada. Tabla de presiones (conclusión)

Pres., <i>P</i> kPa	Temp. sat., <i>T</i> _{sat} °C	Volumen específico, <i>m</i> ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., <i>v</i> _f	Vapor sat., <i>v</i> _g	Liq. sat., <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Vapor sat., <i>u</i> _g	Liq. sat., <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Vapor sat., <i>h</i> _g	Liq. sat., <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Vapor sat., <i>s</i> _g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Figura 6.4: Agua saturada. Tabla de presiones (continuación)

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Figura 6.5: Propiedades del aire a la presión de 1 [atm]

Propiedades de metales sólidos (continuación)

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), $k(\text{W/m} \cdot \text{K})/c_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$					
		ρ kg/m ³	c_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1 000
Al carbono-manganeso-silicio (1% < Mn < 1.65% 0.1% < Si < 0.6%)		8 131	434	41.0	11.6			42.2 487	39.7 559	35.0 685	27.6 1 090
Aceros al cromo (bajo): $\frac{1}{2}\text{Cr}-\frac{1}{4}\text{Mo-Si}$ (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)		7 822	444	37.7	10.9			38.2 492	36.7 575	33.3 688	26.9 969
1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)		7 858	442	42.3	12.2			42.0 492	39.1 575	34.5 688	27.4 969
1Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)		7 836	443	48.9	14.1			46.8 492	42.1 575	36.3 688	28.2 969
Aceros inoxidables:											
AISI 302		8 055	480	15.1	3.91			17.3 512	20.0 559	22.8 585	25.4 606
AISI 304	1 670	7 900	477	14.9	3.95	9.2 272	12.6 402	16.6 515	19.8 557	22.6 582	25.4 611
AISI 316		8 238	468	13.4	3.48			15.2 504	18.3 550	21.3 576	24.2 602
AISI 347		7 978	480	14.2	3.71			15.8 513	18.9 559	21.9 585	24.7 606
Plomo	601	11 340	129	35.3	24.1	39.7 118	36.7 125	34.0 132	31.4 142		
Magnesio	923	1 740	1 024	156	87.6	169 649	159 934	153 1 074	149 1 170	146 1 267	
Molibdeno		2 894	10 240	251	138	53.7 179		143 134	126 126	118 118	112 112
Niquel:											
Puro	1 728	8 900	444	90.7	23.0	164 232	107 383	80.2 485	65.6 592	67.6 530	71.8 562
Nicromo (80% Ni, 20% Cr)	1 672	8 400	420	12	3.4			14 480	16 525	21 545	
Inconel X-750 (73% Ni, 15% Cr, 6.7% Fe)	1 665	8 510	439	11.7	3.1	8.7 —	10.3 372	13.5 473	17.0 510	20.5 546	24.0 626
Niobio		2 741	8 570	265	53.7	23.6 55.2		52.6 52.6	58.2 58.2	61.3 61.3	64.4 64.4
Paladio		1 827	12 020	244	71.8	24.5 188		24.5 249	73.6 73.6	79.7 79.7	94.2 94.2
Platino:											
Puro	2 045	21 450	133	71.6	25.1	77.5 100	72.6 125	71.8 136	73.2 141	75.6 146	78.7 152
Aleación 60Pt-40Rh (60% Pt, 40% Rh)	1 800	16 630	162	47	17.4			52 —	59 —	65 —	69 —
Renio	3 453	21 100	136	47.9	16.7	58.9 97	51.0 127	46.1 139	44.2 145	44.1 151	44.6 156
Rodio	2 236	12 450	243	150	49.6	186 147	154 220	146 253	136 274	127 293	121 311

Figura 6.6: Propiedades de metales sólidos

Propiedades relativas a la radiación solar de los materiales				
Descripción/composición	Absortividad solar, α_s	Emisividad, ϵ , a 300 K	Relación, α_s/ϵ	Transmisividad solar, τ_s
Aluminio				
Pulido	0.09	0.03	3.0	
Anodizado	0.14	0.84	0.17	
Con capa adicional de cuarzo	0.11	0.37	0.30	
Hoja	0.15	0.05	3.0	
Ladrillo rojo (Purdue)	0.63	0.93	0.68	
Concreto	0.60	0.88	0.68	
Lámina metálica galvanizada				
Limpia, nueva	0.65	0.13	5.0	
Oxidada, con acción de la intemperie	0.80	0.28	2.9	
Vidrio, espesor de 3.2 mm				
Flotado o templado				0.79
Tipo al bajo óxido de hierro				0.88
Mármol, ligeramente blanquizco (no reflector)	0.40	0.88	0.45	
Metal, con chapa				
Sulfuro negro	0.92	0.10	9.2	
Óxido negro de cobalto	0.93	0.30	3.1	
Óxido negro de níquel	0.92	0.08	11	
Cromo negro	0.87	0.09	9.7	
Mylar, espesor de 0.13 mm				0.87
Pinturas				
Negra (Parsons)	0.98	0.98	1.0	
Blanca, acrílica	0.26	0.90	0.29	
Blanca, óxido de zinc	0.16	0.93	0.17	
Papel blanco	0.27	0.83	0.32	
Plexiglas, espesor de 3.2 mm				0.90
Porcelana, losetas de porcelana, blancas (superficie vidriada reflectora)	0.26	0.85	0.30	
Tejas para techo, rojo brillante				
Superficie seca	0.65	0.85	0.76	
Superficie mojada	0.88	0.91	0.96	
Arena seca				
Blanquizca	0.52	0.82	0.63	
Roja mate	0.73	0.86	0.82	
Nieve				
Partículas finas, recién caídas	0.13	0.82	0.16	
Gránulos de hielo	0.33	0.89	0.37	
Acero				
Acabado de espejo	0.41	0.05	8.2	
Intensamente herrumbroso	0.89	0.92	0.96	
Piedra (rosa claro)	0.65	0.87	0.74	
Tedlar, espesor de 0.10 mm				0.92
Teflón, espesor de 0.13 mm				0.92
Madera	0.59	0.90	0.66	

Figura 6.7: Propiedades relativas a la radiación solar de los materiales