



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

UPIITA

Desalinización De Agua Por Destilación Solar Activa Empleando Concentradores Solares De Lentes Fresnel

Que para obtener el título de
“Ingeniero en Energía”

Presenta el alumno:
Jiménez Miranda Eduardo

Directores:
Diego Alonso Flores Hernández,
Helvio Ricardo Mollinedo Ponce de León,
Sergio Isai Palomino Resendiz

M. en C. Adolfo Rojas Pacheco



México CDMX, a Diciembre 22 de 2023



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

UPIITA

Desalinización De Agua Por Destilación Solar Activa Empleando Concentradores Solares De Lentes Fresnel

Que para obtener el título de
“Ingeniero en Energía”

Presenta el alumno:
Jiménez Miranda Eduardo

Sinodales:

Dr. Diego Alonso Flores Hernández
Director

Dr. Helvio Ricardo Mollinedo Ponce de
León
Director

Dr. Sergio Isai Palomino Resendiz
Director

Dr. Mario Fidel García Sánchez
Presidente

M. en C. Joaquin Alfredo Velazquez Olvera
Secretario

Agradecimientos

El Instituto Politécnico Nacional me ha dado grandes oportunidades para desarrollarme como persona y como profesionista, dando el espacio y permitiendo que conociera a gente maravillosa que ha dejado huella en mi vida; por eso mismo quiero expresar mi agradecimiento a mi institución que tantas herramientas me ha dado, así mismo, dedico este espacio para reconocer el apoyo y el conocimiento que me ha brindado la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas y el Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos No. 9 “Juan De Dios Bátiz”.

A mi familia, que siempre me ha dado su apoyo incondicional y me ha guiado y proveído de las herramientas para crecer como persona de bien y como profesional; a ellos, les doy mi más sincera gratitud. Y por animarme en tiempos de duda y darmel fuerza para continuar con este proyecto, por esto y más, mi corazón está lleno de gratitud hacia ellos.

Al Dr. Diego Alonso Flores Hernández, el Dr. Sergio Isai Palomino Resendiz y el Dr. Helvio Ricardo Mollinedo Ponce de León les agradezco enormemente por haberme guiado durante el desarrollo de esta tesis, por haber dado su consejo y su tiempo cada vez que se los requería, y les doy gracias por su inmensa contribución a mi crecimiento académico y profesional.

Al técnico profesionista Héctor Cruz Martín, al Ing. Gustavo Zamudio Rodríguez y a los docentes y técnicos del Laboratorio de Pesados de la UPIITA les agradezco con un gran aprecio por haberme apoyado durante la etapa de manufactura del proyecto.

A mis amigos, Bernardo Alberto Vargas Vidal, José Ismael Gamiño Barocio, Alan Dario Sánchez Cárdenas y Benjamín Guzmán, les agradezco a cada uno por su apoyo a lo largo de la carrera y los aportes que me dieron durante todo este tiempo.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| Abreviaciones y acrónimos | I |
| Simbología | II |
| Resumen | IV |
| Glosario | V |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.1.1. Historia de la energía solar | 1 |
| 1.1.2. Historia de la desalinación | 3 |
| 1.1.2.1. Destiladores solares | 3 |
| 1.2. Estado del arte | 4 |
| 2. Objetivos | 7 |
| 2.1. Objetivo General | 7 |
| 2.2. Objetivos específicos | 7 |
| 3. Planteamiento del problema | 8 |
| 4. Justificación de la investigación | 9 |
| 5. Marco teórico | 11 |
| 5.1. El agua | 11 |
| 5.1.1. Clasificaciones del agua | 11 |
| 5.1.2. Composición del agua de mar | 12 |
| 5.1.3. El efecto de la salinidad sobre el agua | 13 |

| | |
|---|----|
| 5.1.4. Propiedades coligativas del agua | 13 |
| 5.1.4.1. Elevación del punto de ebullición y disminución de la presión de vapor | 13 |
| 5.1.5. Evaporación del agua | 14 |
| 5.2. Irradiación solar | 15 |
| 5.2.1. Clasificaciones de la irradiancia | 15 |
| 5.2.2. Propiedades espectrales de la radiación solar | 15 |
| 5.2.3. Irradiancia solar en la Tierra | 16 |
| 5.2.3.1. Variación con respecto a la latitud | 17 |
| 5.2.3.2. Direccionalidad de la radiación solar | 18 |
| 5.2.4. Potencial solar en México | 18 |
| 5.3. Concentración solar | 19 |
| 5.3.1. Límites de la concentración solar | 19 |
| 5.3.2. Clasificación de concentradores solares | 20 |
| 5.3.2.1. Concentradores sin formación de imagen | 21 |
| 5.3.2.2. Clasificación por la geometría de concentración | 21 |
| 5.4. Desalinización | 22 |
| 5.4.1. Métodos de desalinización | 22 |
| 5.4.2. Destilación solar | 23 |
| 5.5. Corrosión | 24 |
| 5.5.1. Formas de corrosión | 25 |
| 5.5.2. Clasificación por su forma de identificación | 25 |
| 5.5.2.1. Corrosión general o corrosión uniforme | 25 |
| 5.5.2.2. Corrosión localizada | 26 |
| 5.5.3. Métodos para mitigar la corrosión | 26 |
| 5.6. Termodinámica de la destilación solar | 26 |
| 5.6.1. Evaporación del agua | 26 |

| | |
|---|-----------|
| 5.7. Ebullición del agua | 27 |
| 5.7.1. Ebullición en estanque | 27 |
| 5.7.2. Ebullición en flujo interno | 28 |
| 5.7.2.1. Convección interna forzada | 28 |
| 5.7.3. Intensificación de la transferencia de calor | 31 |
| 6. Desarrollo experimental | 33 |
| 6.1. Grupos de estudio | 34 |
| 6.1.1. Agua | 34 |
| 6.1.2. Lugar físico de experimentación | 34 |
| 6.1.2.1. Variables climáticas sobre la región a investigar | 34 |
| 6.2. Descripción de los problemas asociados a la destilación solar | 35 |
| 6.3. Configuración experimental | 35 |
| 6.3.1. Radiación solar de onda corta | 36 |
| 6.3.2. Temperatura | 37 |
| 6.3.3. Presión atmosférica | 38 |
| 6.3.4. Magnitud del perfil de velocidad del viento | 38 |
| 6.3.5. Definición de valores esperados de la configuración experimental | 39 |
| 6.4. Planteamiento de la solución | 41 |
| 6.4.1. Selección y caracterización del elemento óptico de concentración | 41 |
| 6.4.1.1. Ángulos para el trazado de rayos | 42 |
| 6.4.1.2. Pérdidas por transmisión | 42 |
| 6.4.1.3. Radiación efectiva | 43 |
| 6.4.2. Diseño de la cámara de concentración solar | 43 |
| 6.4.2.1. Recibidor solar | 43 |
| 6.4.2.2. Almacenamiento térmico de calor | 44 |
| 6.4.2.3. Aislamiento térmico | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 6.4.2.4. General | 45 |
| 6.4.3. Definición de la alimentación | 46 |
| 6.4.3.1. Definición del caudal | 46 |
| 6.4.4. Materiales | 46 |
| 6.4.4.1. Componentes | 46 |
| 6.4.4.2. Sensores | 48 |
| 7. Resultados | 49 |
| 7.1. Comportamiento e interacciones del desalinizador propuesto | 49 |
| 7.1.1. Principio de funcionamiento | 49 |
| 7.1.2. Componentes y módulos del desalinizador | 50 |
| 7.1.2.1. Contenedor de agua de mar | 51 |
| 7.1.2.2. Contenedor de agua destilada | 52 |
| 7.1.2.3. Cámara de evaporación | 52 |
| 7.1.2.4. Módulo de concentración solar | 53 |
| 7.1.3. Simulaciones del sistema desalinizador | 53 |
| 7.1.3.1. Materiales y geometría | 53 |
| 7.2. Control del sistema | 57 |
| 7.2.1. Sensores y componentes, calibración y caracterización | 57 |
| 7.2.2. Selección del método de control | 58 |
| 7.2.3. Modelo y reglas del control difuso | 59 |
| 7.2.4. Automatización del vaciado y llenado de nuestros módulos | 62 |
| 7.3. Construcción e integración del sistema | 62 |
| 7.4. Módulo de reaprovechamiento térmico y bombeo | 62 |
| 7.5. Integración al seguidor solar | 63 |
| Bibliografía | 64 |

| | |
|--|-----------|
| A. Propiedades del agua de mar | 68 |
| B. Propiedades del agua saturada | 71 |
| C. Código de julia para analizar las condiciones de la energía solar térmica en la CDMX | 72 |
| D. Código en Wolfram Mathematica para la caracterización de un termistor dada su respuesta a la temperatura | 78 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Aletas cilíndricas para mejorar los mecanismos de transferencia de calor de un destilador solar pasivo | 5 |
| 1.2. Destilador solar de dos cámaras con ventilador | 6 |
| 1.3. Destilador solar activo e híbrido con la incorporación de un calentador eléctrico y lentes de concentración. | 6 |
| 4.1. Índice de estrés evaporativo | 10 |
| 5.1. Relación entre la evaporación acumulada y el tiempo para la solución NaCl | 13 |
| 5.2. La presión de vapor de un líquido puro representa el balance entre el aumento de entalpía debido a la vaporización y la disminución de entalpía en su entorno. | 14 |
| 5.3. Imágenes traducidas de [39] | 16 |
| 5.4. Atenuación de la radiación solar por su paso por la atmósfera | 17 |
| 5.5. Irradiancia solar a latitud ϕ | 18 |
| 5.6. Radiación solar | 19 |
| 5.7. Esquematización de los diferentes métodos de desalinización | 23 |
| 5.8. Subclasicaciones de la Destilación solar | 24 |
| 5.9. Curva típica de ebullición en estanque del agua a 1 atmósfera | 27 |
| 5.10. Curva típica de ebullición en estanque del agua a 1 atmósfera | 28 |
| 5.11. Tubo con aletas internas | 31 |
| 5.12. Tubos con microaletas | 32 |
| 5.13. Arreglo de cintas torcidas | 32 |
| 6.1. Irradiación de onda corta recibida en el lugar físico de experimentación durante 2020 y 2021 | 37 |
| 6.2. Mapas de temperaturas de la Ciudad de México | 38 |
| 6.3. Presión promedio en el lugar físico de experimentación durante 2020 y 2021 | 38 |

| | |
|---|----|
| 6.4. Rapidez promedio por hora del viento sobre el lugar seleccionado | 39 |
| 6.5. Valores de eficiencia idealizados de lentes de Fresnel calculadas en la reflexión de las superficies y otras pérdidas comunes. | 43 |
| 7.1. Vista general del proceso de desalinización | 50 |
| 7.2. Propuesta del sistema desalinizador. Módulo de reaprovechamiento térmico y bombeo. . | 50 |
| 7.3. Propuesta del sistema desalinizador. Módulo de concentración solar. | 51 |
| 7.4. Diseño sugerido para aumentar el área de evaporación dentro de la cámara | 52 |
| 7.5. Transferencia de calor en el acero inoxidable | 54 |
| 7.6. Transferencia de calor en el cobre | 55 |
| 7.7. Transferencia de calor en el aluminio | 56 |
| 7.8. Flujo de aire en la cámara de evaporación | 57 |
| 7.9. Arreglo para la calibración de la bomba EZO-PMP | 58 |
| 7.10. Captura de pantalla de Autodesk CFD mostrando una vista general de las simulaciones realizadas | 59 |
| 7.11. Funciones de membresía de las variables difusas de entrada | 60 |
| 7.12. Funciones de membresía de la respuesta difusa. | 60 |
| 7.13. Intercambiador de calor con aletas verticales | 62 |
| 7.14. Trazado de rayos que permiten calcular la altura de la lente con respecto al punto focal. . | 63 |
| A.1. Gráficas del apéndice A | 70 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 1.1. Resumen del avance de la energía solar durante los siglos XX y XXI | 2 |
| 1.2. Breve historia de la desalinización de agua | 3 |
| 1.3. Pérdidas de un destilador solar | 4 |
| 5.1. Clasificación del agua con respecto al TSD según WQA | 11 |
| 5.2. Clasificación del agua propuesta por [31] de acuerdo a su uso | 12 |
| 5.3. Principales iones constituyentes del agua de mar | 12 |
| 5.4. Factores de retardo en la evaporación de agua con diferentes sales | 13 |
| 6.1. Variables del desarrollo experimental | 33 |
| 6.2. Grupo de control del agua de mar | 34 |
| 6.3. Grupo de control del agua de mar | 34 |
| 6.4. Variables climáticas consideradas importantes para la investigación | 34 |
| 6.5. Datos a interpolar para definir los parámetros de salida del agua | 40 |
| 6.6. Modelos y características de los concentradores solares | 41 |
| 6.7. Comparativa hallada entre los materiales propuestos para fungir como receptor solar | 44 |
| 6.8. Propiedades de los materiales aislantes térmicos | 45 |
| 6.9. Propiedades de la poliaftalamida | 46 |
| 6.10. Propiedades de la bomba peristáltica EZO-PMP | 47 |
| 6.11. Propiedades del extractor | 47 |
| A.1. Elevación del punto de ebullición según su salinidad | 68 |
| A.2. Conductividad térmica del agua según su salinidad | 68 |
| A.3. Calor latente de vaporización del agua según su salinidad | 69 |
| A.4. Calor específico del agua según su salinidad | 70 |

B.1. Propiedades del agua saturada 71

Abreviaciones y acrónimos

| | | | |
|---------------|--|------------------|--|
| AMPP | <i>Association for Materials Protection and Performance.</i> | NASA | <i>National Aeronautics and Space Administration.</i> |
| DS | Destilación solar. | NF | Nanofiltración. |
| ED | Electrodiálisis. | NREL | <i>National Renewable Energy Laboratory.</i> |
| FO | Ósmosis Directa. | ODS | Objetivos de Desarrollo sostenible. |
| Frz | Desalinización por congelación. | ONU | Organización de las Naciones Unidas. |
| G. Hyd | Hidrato de gas. | PIDESC | Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. |
| GEI | gases de efecto invernadero. | PNUD | Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. |
| HDH | Humidificación - Dehumidificación. | PV UV cut | Poly visible (UV cut). |
| I.Ex | Desalinización por intercambio de iones. | RO | Ósmosis Inversa. |
| LLE | Extracción líquido-líquido. | ROC | Radiación de onda corta. |
| MED | destilación multi-efecto. | TSD | total de sólidos disueltos. |
| MSF | Destilación Flash Multietapa. | WQA | <i>Water Quality Association.</i> |
| MVC | Destilación por compresión mecánica. | WRI | World Resources Institute. |

Simbología

| Símbolo | Descripción | Unidades |
|-------------------------|---|-----------------------------------|
| A | Área | m^2 |
| $C_{\text{área}}$ | Razón de concentración superficial | - |
| C_s | Calor específico | $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ |
| F | Número F | - |
| G | Constante solar | W m^{-2} |
| I | Intensidad o Irradiación | W m^{-2} |
| P_{aire} | Presión del aire seco | Pa |
| P_{atm} | Presión atmosférica | Pa |
| P_v | Presión de vapor | Pa |
| R_l | Radio de la lente | - |
| η | Eficiencia | - |
| ϕ_{hr} | Humedad relativa | - |
| ϕ | Latitud geográfica | rad |
| ρ | Densidad | kg m^{-3} |
| σ_{SB} | Constante de Stefan-Boltzmann | $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ |
| τ | Eficiencia de transmisión | - |
| L_c | Longitud característica | m |
| θ_s | Medio ángulo de divergencia de la radiación solar sobre la Tierra | rad |
| c | Velocidad de la luz | m s^{-1} |
| $d_{\text{Sol-Tierra}}$ | Distancia entre el Sol y la Tierra | m |
| f_l | Distancia focal de la lente | - |
| h_l | Entalpía de vaporización | kJ kg^{-1} |
| n_d | Índice de refracción | - |
| n | Índice de refracción absoluto de la luz | - |
| r_{sol} | Radio del sol | m |
| Re | Número de Reynolds | - |

| Símbolo | Descripción | Unidades |
|---------|-------------|----------|
| T | Temperatura | K |

Resumen

El siguiente trabajo desarrolla una propuesta técnica para la desalinización térmica de agua de mar por destilación solar activa mediante el uso de lentes Fresnel como concentradores solares. Se identificaron algunos problemas asociados con base en la revisión de trabajos previos y conocimiento técnico del propio método; se planteó un diseño buscando mitigar los efectos de la intermitencia del sol y la condensación del agua sobre la superficie de vidrio de los diseños más comunes. Para ello se estableció una serie de análisis térmicos, ópticos y estructurales que desembocaron en el diseño de una serie de módulos acoplados verticalmente. El propósito de este proyecto es coadyuvar al derecho de acceso al agua limpia a un precio asequible, siendo el fin último contribuir al objetivo de desarrollo sostenible 6.a. a través de fuentes de energía sostenibles.

Palabras clave — desalinización térmica, concentradores solares, destilación solar activa, lentes de Fresnel

Abstract

This work bears a technical proposal for thermal desalination of seawater by active solar distillation through Fresnel solar concentrators. Some associated problems were identified based on the review of previous works and technical knowledge of the method itself; a design was proposed to mitigate the effects of the intermittence of the Sun and water condensation on the glass surface presented by the common designs. To this end, a series of thermal, optical and structural analyses was established that led to the design of a series of vertically coupled modules.

This project seeks to assist the right of access to clean water at an affordable price, being the ultimate goal to contribute to the sustainable development goal 6.a. using sustainable energy sources.

Index terms — thermal desalination, solar concentrators, active solar distillation, fresnel lenses

Glosario

| | |
|--------------------------------|---|
| étendue | Extensión óptica. |
| colector solar | Un colector de energía solar es un tipo especial de intercambiador de calor que transforman la energía de la radiación solar recibida en una superficie en energía interna del medio de transporte. |
| desalinización | La desalinización se puede definir como cualquier proceso que elimina las sales del agua. |
| desalinización térmica | Proceso que utiliza energía térmica para evaporar agua con la finalidad de condensarla una vez separada de las sales. |
| destilación solar | Proceso heliotérmico que ocurre dentro de un sistema cerrado en el cual se evapora agua con cierto grado de salinidad por efecto de la radiación solar para la obtención de agua destilada. |
| fluorescencia | Tipo particular de luminiscencia que caracteriza a las sustancias que al absorber luz a una determinada longitud de onda emiten parte de esa energía en luz a una longitud de onda más larga. |
| luminiscencia | Propiedad que tienen ciertos cuerpos de emitir luz tras haber absorbido energía de otra radiación (principalmente ultravioleta) sin elevar su temperatura. |
| propiedades coligativas | Son aquellas propiedades de las soluciones que dependen únicamente de la relación entre el número de partículas de soluto y de disolvente sin importar la especie química. |

Capítulo 1

Introducción

La escasez de agua aumenta día con día, afectando a más del 40 % de la población mundial [1]. Según datos de la World Resources Institute (WRI) en 2019 globalmente más de 1000 millones de personas vivían en regiones de escasez de agua y para el 2025 este número podría crecer a 3500 millones, siendo las principales causas de esta escasez: la contaminación de cuerpos acuosos, sequías agravadas por la emergencia climática y el uso descontrolado de agua, de pequeña escala en hogares sin buenas prácticas para el cuidado del agua como a escala industrial.

Este problema es innegable y por ello la Organización de las Naciones Unidas (ONU) contempló como sexto objetivo en los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS) el acceso a agua limpia y saneamiento. Estos objetivos pertenecientes a la Agenda 2030 proponen 8 puntos estratégicos para afrontar esta situación, de los cuales, me gustaría resaltar el objetivo 6.a, pues propone una estrategia para abordar la problemática y propone medidas para aminorar este problema.

De aquí a 2030, ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, **desalinización**, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización [2].

En aras de aportar a esta meta, el presente trabajo propone un sistema para la desalinización térmica por destilación solar buscando un mejor rendimiento a través del uso de concentradores solares; a lo largo del texto se revisa literatura que encamina la metodología a seguir para lograr la desalinización de agua que asemeje las condiciones de vida marina obtenida artificialmente disolviendo las sales contenidas en los paquetes de sal para acuario.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Historia de la energía solar

El primer registro del uso de concentradores para capturar la energía del sol data del año 212 a.C. por el famoso griego Arquímedes quien usó esta potente energía para defender a Siracusa de una flota romana durante la segunda guerra púnica, la leyenda cuenta que se usaron los escudos de bronce de los guerreros para concentrar los rayos del sol en la madera de los barcos enemigos y así incendiarlos. Aunque no queda registro histórico fiable de esta leyenda, el Dr. Ioannis Sakkas, logró recrear el escenario y en sólo cuestión de minutos, tenía un galeón romano ardiendo [3].

No fue sino hasta el siglo XVIII que los concentradores solares volvieron a tener aplicación, época donde se construyeron numerosos hornos solares capaces de derretir hierro, cobre y otros metales, siendo uno de los más famosos el diseñado por Antoine Lavoisier, el cual alcanzó una increíble temperatura de 1750 °C. Récord de temperatura alcanzada por estas técnicas durante poco más del 1 siglo [4]. Posteriormente otros ilustres personajes como August Mouchot y Abel Pifre continuaron con el diseño de colectores solares para impulsar máquinas de vapor.

En 1839 Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico en el selenio, pero no fue sino hasta 1883 que se creó la primera celda solar con una eficiencia de 1% a 2%; a pesar de estos hechos, la primera vez que se observa y describe el efecto fotoeléctrico es hasta 1887 por el físico alemán Heinrich Hertz.

Teniendo en cuenta que la energía solar a partir de ese momento empezó a tener un gran interés de estudio, la tabla 1.1 recopila brevemente hechos destacados de los próximos dos siglos.

Tabla 1.1: Resumen del avance de la energía solar durante los siglos XX y XXI

| Ubicación temporal | Evento |
|--------------------|--|
| 1905 | Einstein propone la teoría de la luz y resuelve con ella las incógnitas encontradas en el efecto fotoeléctrico. El descubrimiento de la ley que rige este fenómeno le otorgaría en 1922 el Nobel de Física |
| 1912 | Se instaló la planta de bombeo más grande del mundo en Meadi, Egipto, la cual usaba concentradores de cilindro parabólico logrando hasta 37 kW a 45 kW continuamente por 5 horas diarias, fue detenida en 1915 por el inicio de la primera guerra mundial y el bajo precio de los combustibles fósiles |
| 1956 | Se empiezan a usar las celdas solares de silicio de manera comercial a pequeña escala |
| 1958 | Se lanza el primer satélite que usaba energía solar (Vanguard I) |
| Década de 1960 | Se popularizó la industria de los calentadores solares de agua residenciales |
| 1974 | EE.UU. crea el <i>National Renewable Energy Laboratory</i> (NREL), laboratorio que fue fundamental para el desarrollo de la energía solar en años posteriores |
| Década de 1980 | Se ponen en funcionamiento las primeras torres solares de manera demostrativa trasladándose al campo industrial en el 2007 |
| 1982 | Se construye el primer parque solar |
| 1981 | En España se probó un sistema de 500 kW de la Agencia Internacional de Energía para generación eléctrica usando concentradores parabólicos en la plataforma solar de Almería. |
| 1994 | El NREL desarrolla celdas fotovoltaicas con hasta un 30 % de eficiencia de conversión |
| 2013 | Las celdas solares de perovskita se empiezan a estudiar y tienen un gran auge |

Referencias: Tabla construida con base en [5], [4], [6], [7], [8], [9]

1.1.2. Historia de la desalinación

La tabla 1.2 hace un resumen histórico de la desalinización.

Tabla 1.2: Breve historia de la desalinización de agua

| Ubicación temporal | Evento |
|-------------------------|--|
| Siglo III a.C. | Aristóteles ideó el primer evaporador de agua conocido y describe que al evaporarse el agua salada y volverse a condensar, el vapor no forma agua salada de nuevo. |
| Siglo I d.C. | Plinio describe algunos métodos para desalinizar el agua. |
| Entre el Siglo II y III | Alejandro de Afrodisias describe el procedimiento para desalinizar agua del mar. |
| 1551 | Se registra el primer uso de destiladores solares por alquimistas árabes |
| Siglo XVI | Se vuelve popular el uso de alambiques para desalinizar agua en los barcos que navegaban por el mar. |
| 1869 | Mouchot describe la desalinización por destilación térmica y crea el antecedente de la aplicación del uso de la energía térmica del sol para aplicaciones industriales. |
| 1870 | Wheeler y Evans patentan por primera vez en la historia un destilador solar, describiendo a gran detalle los fenómenos de condensación y los problemas de corrosión y absorción de calor |
| 1872 | Creación de la primera planta desalinizadora industrial ubicada en Chile. |
| 1928 | Pasteur reportó el uso de concentradores solares para desalinizar agua contenida en una caldera de cobre |
| Segunda guerra mundial | Los destiladores solares cobraron gran importancia para el abastecimiento de agua de los soldados en el norte de África y en las islas del océano pacífico. |
| 1964 | Primera planta desalinizadora en España. |
| 1959 | Brenton y Reid demuestran la capacidad de un acetato de luminosa para desalinizar agua. A partir de este momento, la desalinización por ósmosis inversa empezó a llamar la atención. |

Referencias: Tabla construida con base en [4], [10], [11], [12], [13], [14]

1.1.2.1. Destiladores solares

Hallazgos sobre la eficiencia del destilador solar

En 1973 Cooper [15] (citado en [16]) encontró que la máxima eficiencia experimental y teórica de los destiladores solares de una fase pueden alcanzar hasta un 60 % y 50 %. Entre los motivos hallados, Malik *et al.* [17] (citado en [16]) en 1982 describe las mayores pérdidas que encontraron experimentalmente descritas en la tabla 1.3.

Tabla 1.3: Pérdidas de un destilador solar

| Motivo | Pérdida |
|--|---------|
| Pérdida de calor por radiación desde la superficie del agua salina a la cubierta | 26 % |
| Pérdida de calor por el reflejo de la luz | 11 % |
| Pérdida por reevaporación del destilado | 10 % |
| Pérdida por el calor absorbido por el vidrio | 5 % |
| Pérdidas por suelo y bordes | 2 % |
| Otras pérdidas | 7 % |

Breve historia de la destilación solar en México [18]

- México impulsó de 1972 a 1976 la instalación de un gran número de destiladores solares de caseta
- A fines de 1975 se inicia el grupo IIUNAM, el cual se dedicó a la investigación sobre las aplicaciones de la energía solar, entre ellas la desalación de agua de mar o salobre
- En 1980 en La Paz, Baja California Sur, incluyó un destilador solar de múltiple etapa para el cual se suministró el calor con un arreglo de concentradores solares de canal parabólico
- Durante un año a partir de marzo del 2017 se estudió el comportamiento de varios destiladores solares en Hidalgo, pues es un Estado con agua de alta dureza y con alta irradiancia solar

A pesar de que la desalinización solar ha sido objeto de estudio desde siglos atrás, la desalinización solar activa se podría decir que es una tecnología mucho más reciente siendo una idea acuñada por Soliman en 1976 [19, pág. 29]. A partir de ese entonces, ha ganado interés y se han propuesto numerosos esquemas para reducir las desventajas de la desalinización solar pasiva.

En agosto de 2017 en Perú fue desarrollado y patentado un destilador solar tipo cascada [20]. Este sistema tiene una eficiencia global de 71.5 % produciendo en días soleados $5690 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2}$ al día y en días nublados $3648 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2}$ por día.

1.2. Estado del arte

El trabajo realizado por [21] hace una investigación sobre la mejora de los mecanismos de transferencia de calor de los destiladores solares, donde se estudia el desempeño de un destilador semiesférico con diferentes tipos de aletas cilíndricas proponiendo diseños como el mostrado en la fig. 1.1. Para ver la mejora en el rendimiento, el sistema se probó durante lapsos de 12 horas por 3 días y los resultados obtenidos se compararon contra un destilador semiesférico convencional.

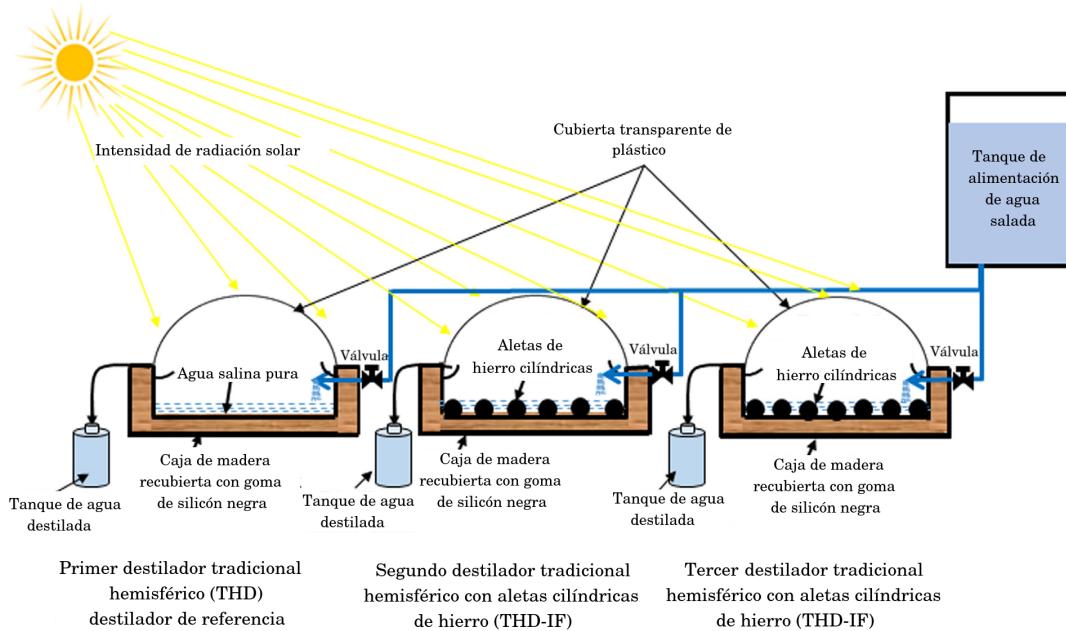


Figura 1.1: Aletas cilíndricas para mejorar los mecanismos de transferencia de calor de un destilador solar pasivo

Figura obtenida de [21]

En los resultados se observó una mejora de 4.80 L day^{-1} del destilador convencional a un promedio de 5.74 L day^{-1} del destilador aletado, también se alcanzó una eficiencia de hasta 53.52 % y se determinó que el sistema tenía una recuperación económica de 24 días.

Jobrane et al. [22] propusieron en 2022 un destilador de dos cámaras; se estimó que el costo del agua generada es de 25 euros por cada cien litros de agua, teniendo una producción promedio de $4.03 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ considerando una potencia recibida promedio de 380 W m^{-2} . Sobre el agua obtenida se realizaron estudios físicos y químicos donde se determinó que poseía buena calidad para beber.

En la fig. 1.2 se observa la configuración usada; el sistema consta de una cámara de evaporación la cual distribuye el agua bombeada uniformemente sobre una lámina de aluminio AW6060 donde acopla un extractor para forzar la convección del vapor generado hacia la cámara de condensación, donde se reutiliza el calor latente de vaporización para precalentar el agua salobre y a su vez condensar el vapor. Para su alimentación se usó una bomba peristáltica controlada automáticamente y optimizada según el rendimiento visto en el destilador.

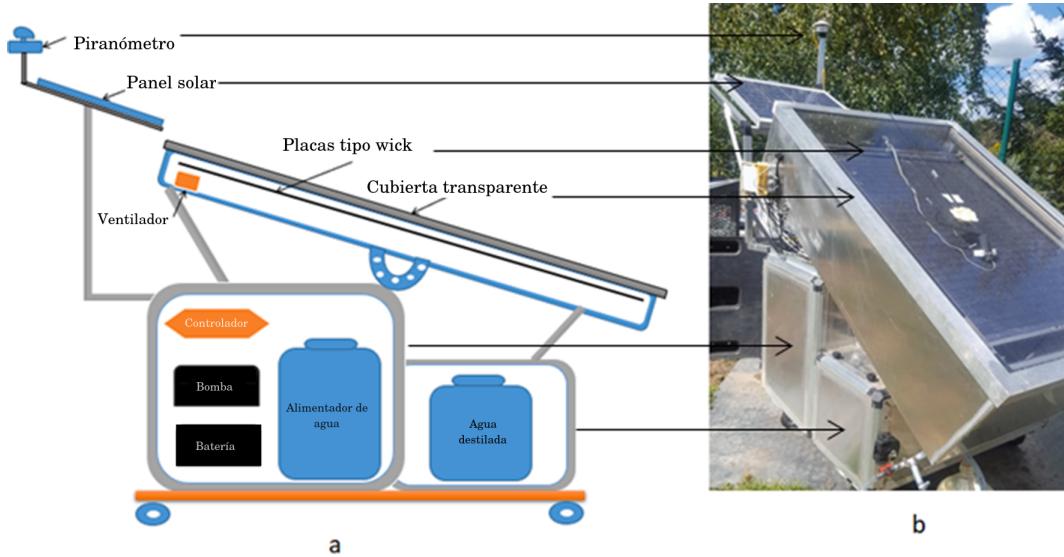


Figura 1.2: Destilador solar de dos cámaras con ventilador

Figura obtenida de [22]

Palomino et al. [23] propusieron un destilador solar híbrido el cual alcanza los 10 L por día en días soleados con menos de 13 g L^{-1} de sales disueltas. En la fig. 1.3 se observa el esquema propuesto, el cual se monta sobre una estructura robótica acoplada a un sistema de seguimiento solar y un sistema de control para regular la alimentación del agua. Se observa que este sistema aprovecha tanto la energía solar térmica como la solar fotovoltaica cuyos excedentes son almacenados en baterías.

Este desalinizador totalmente autónomo es potenciado mediante el uso de lentes de Fresnel y un calentador eléctrico. La energía térmica generada por ambos instrumentos es aprovechada dentro de una cámara adiabática de evaporación la cual lleva el vapor generado a un condensador externo.

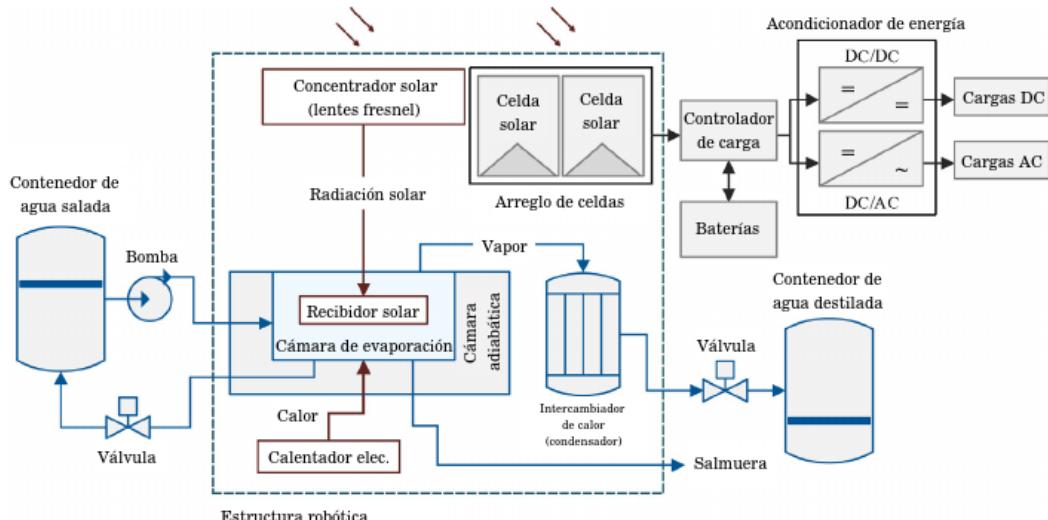


Figura 1.3: Destilador solar activo e híbrido con la incorporación de un calentador eléctrico y lentes de concentración.

Figura traducida de [23]

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar y construir un destilador solar activo usando concentradores solares de lentes de fresnel para destilar agua salada

2.2. Objetivos específicos

- I Diseñar los sistemas de tuberías y almacenamiento donde fluirá y reposará el agua salada.
- II Diseñar el concentrador solar y el mecanismo con el que se integrará al sistema de tuberías.
- III Estudiar los modelos térmicos que caractericen o aproximen el comportamiento del concentrador solar y del proceso de evaporación.
- IV Definir los parámetros asociados a la desalinización con los que operará el sistema tales como la taza volumétrica de agua o la salinidad del agua de alimentación.
- V Analizar los datos ambientales de temperatura e irradiación solar de la Ciudad de México para tener información climática sobre el lugar donde se desarrollará el proyecto.
- VI Construir los componentes que integran al destilador solar con base en los diseños propuestos.
- VII Desarrollar el mecanismo de control para regular la velocidad de flujo del agua mediante la implementación de programación y sistemas de control.
- VIII Integrar a un seguidor solar el concentrador para mejorar la captación de calor.
- IX Evaluar el desempeño del destilador solar con base en el agua de salida para verificar la viabilidad del mismo.

Capítulo 3

Planteamiento del problema

Globalmente existen más de 18 000 plantas desalinizadoras que contribuyen a garantizar el derecho de acceso a agua limpia y saneamiento a millones de personas. De acuerdo a las distintas condiciones como lo son el clima, la geografía, la política y la accesibilidad tecnológica, se selecciona el método de desalinización más adecuado, entre ellos, la ósmosis inversa se ha convertido en la tecnología más popular a nivel industrial [24, pág. 11] y se prevé que siga aumentando su presencia [25] debido a que es un proceso de alto rendimiento y económicamente favorable en relación al costo por litro de agua producido.

Aunque esta industria ha madurado rápidamente en los últimos 40 años, aún existen áreas de oportunidad en los procesos ya que, en general, la desalinización se considera de alto consumo energético y de grandes costos de construcción y operación. Aunado a ello, se presentan varios retos ambientales que comprenden entre otros: la huella ecológica de su construcción, las emisiones de GEI productos de la operación, impactos asociados a la obtención del agua salada y la materia prima que se utilice y la disposición final de residuos. Siendo en ocasiones el último factor un criterio que define la viabilidad final de una planta [26].

Dado lo anterior, la incorporación de estrategias para incorporar energía renovable a los procesos de desalinización y el desarrollo de las tecnologías disponibles para aumentar la eficiencia energética resulta en una tarea indispensable para cubrir sosteniblemente la creciente demanda de agua. Está claro que esta visión debe ser complementada por la concienciación de la población y la creación de políticas para un mejor manejo de los recursos hídricos disponibles.

Con base en lo ya expuesto, este proyecto plantea el desarrollo de un destilador solar activo e híbrido capaz de desalinizar a un ritmo lo más constante posible de acuerdo a las condiciones climáticas y geológicas disponibles. Para ello, se plantean los siguientes retos de ingeniería específicos a resolver:

- Obtención y caracterización del agua salada a usarse como materia prima.
- Obtención y análisis de los datos ambientales del lugar de desarrollo para identificar las variables ambientales de interés que influirán en la operación del sistema propuesto.
- Diseño del sistema y elaboración del modelo térmico que lo regirá así como la implementación de estrategias para reducir las pérdidas e intensificar la transferencia de calor.
- Propuesta de la capacidad de desalinización del sistema y selección de las lentes de concentración de acuerdo a la potencia requerida.
- Monitoreo del sistema y regulación del flujo de agua.
- Manufacturabilidad del sistema.

Capítulo 4

Justificación de la investigación

El agua es el recurso más valioso para los seres vivos de este planeta, por ello, el agotamiento y contaminación de este líquido es una amenaza para ecosistemas enteros y para las actividades humanas que dependen del agua. Dicho esto, se puede afirmar que la escasez de agua afecta todos los pilares de la sustentabilidad y esta carestía es cada vez más visible.

A pesar de que en noviembre del 2002 el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (PIDESC) otorgó en los artículos XI y XII a todos los seres humanos el derecho a contar con agua suficiente, a precio asequible, físicamente accesible, segura y de calidad aceptable para usos personales y domésticos [27], la situación global no refleja el cumplimiento de ese derecho. El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) señala que la escasez de agua afecta a más del 40 % de la población mundial [1] y se estima que esta cifra aumente drásticamente si no se emprenden las acciones necesarias para contrarrestar los factores que agravan el problema tales como el cambio climático, la contaminación de cuerpos acuosos y el crecimiento poblacional, por mencionar algunos. La falta de agua arrastra consigo problemas sociales y de salud, entre los que se pueden mencionar:

- **Enfermedades:** Desde la falta de saneamiento hasta la ingesta de agua contaminada, la escasez de agua provoca el aumento de enfermedades entre las que se pueden incluir la diarrea, el cólera y la poliomielitis, sin mencionar la muerte por deshidratación.
- **Hambre:** La ganadería, agricultura y otras industrias son afectadas al no contar con agua, lo que puede llevar a la escasez de alimentos.
- **Desaparición de flora y fauna:** La falta de este recurso natural conlleva a la muerte y a veces la extinción de los animales y plantas que dependían de un cuerpo de agua agotado.
- **Conflictos sociales:** Numerosos conflictos alrededor del mundo surgen por la falta de recursos y esto supone el desplazamiento forzado de las personas o incluso conflictos bélicos.

En mayo del 2021 la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) reportó que México afrontaba una sequía generalizada en aproximadamente 85 % del territorio nacional. Se reportó que cerca de 60 presas grandes se hallaban por debajo del 25 % de su capacidad y como se muestra en la fig. 4.1 la sequía se concentró en el norte y centro del país. Pocos meses después, México ocupaba el puesto 24 de 164 en mayor estrés hídrico según una lista elaborada por el WRI [28], y de acuerdo al mismo organismo, para 2040 se situaría en la categoría de *high-stress* [29], es decir, la segunda peor categoría.

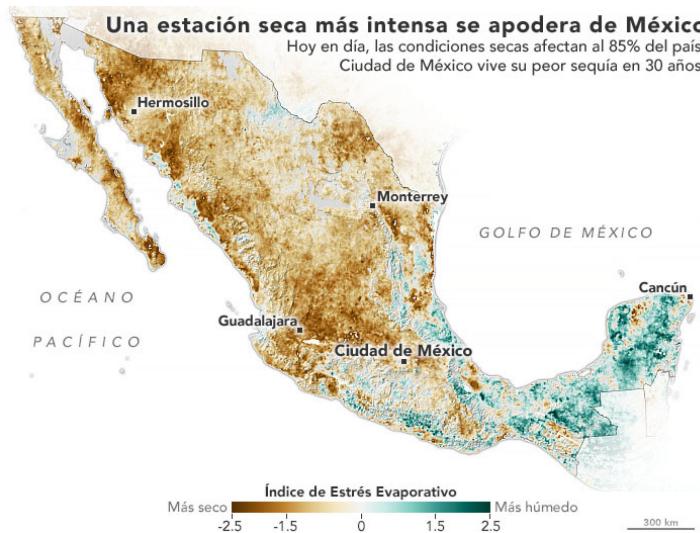


Figura 4.1: Índice de estrés evaporativo

Mapa obtenido de [30]

México no es el único país que enfrenta esta crisis hídrica, de hecho, desde hace varios años, países han implementado políticas para el control y suministro seguro de agua, donde se halló en varias ocasiones una respuesta en la desalinización de agua; aquí es donde la destilación solar se abre camino como un sector de investigación para el suministro seguro, limpio y sustentable de agua.

Varios estudios se han realizado para aumentar la productividad de la destilación solar. Se vislumbra entonces como un sector de investigación con grandes áreas de oportunidad para ser implementado a gran escala, pero para ello, el análisis de los procesos energéticos involucrados durante su operación resulta indispensable ya que uno de los problemas para implementar esta tecnología es el costo por cada litro producido y el reducir las pérdidas puede definir la viabilidad económica del proyecto.

Capítulo 5

Marco teórico

5.1. El agua

El planeta Tierra es conocido como planeta azul debido a que el 70 % de su superficie está cubierta de agua, a pesar de ello, solamente el 0.025 % de ella es potable. El 97.5 % corresponde a al agua salada de mares y océanos; del 2.5 % restante 80 % está congelada en casquitos polares, glaciares o se encuentra como humedad del suelo y no se considera accesible. El resto se encuentra en el subsuelo, pozos, acuíferos, cuencas hidrográficas, ríos y arroyos [31].

5.1.1. Clasificaciones del agua

El agua puede clasificarse de distintas formas, entre las cuales se puede considerar el total de sólidos disueltos (TSD). En la tabla 5.1 se puede observar la clasificación propuesta por la *Water Quality Association* (WQA).

Tabla 5.1: Clasificación del agua con respecto al TSD según WQA

| Denominación | TSD (mg/L) |
|------------------------|-------------------------|
| Agua fresca | menor a 1000 |
| Agua salobre | entre 1000 y 5000 |
| Agua altamente salobre | entre 5000 y 15 000 |
| Agua salina | entre 15 000 y 30 000 |
| Agua de mar | entre 30 000 y 40 000 |
| Salmuera | entre 40 000 y 300 000+ |

Referencia: Datos obtenidos del glosario en línea de la WQA [32]

Otra forma de clasificar el agua es de acuerdo a su forma final de uso y la salinidad que presenta. En la tabla 5.2 se describe la relación entre el grado de salinidad y su uso en sectores de la población.

Tabla 5.2: Clasificación del agua propuesta por [31] de acuerdo a su uso

| Categoría | Salinidad (ppm) | Fuentes |
|---|-------------------|--|
| Industrias como la farmacéutica, eléctrica o de evaporación en calderas | menor a 5 | Ríos de muy baja salinidad o plantas desalinizadoras |
| Agua potable | menor a 150 | Ríos, Lagos, plantas desalinizadoras |
| Agua para uso doméstico | entre 150 y 1000 | |
| Riego y refrigeración industrial | entre 1000 y 3000 | Agua salobre y agua de mar |

5.1.2. Composición del agua de mar

El agua de mar es una mezcla compleja de aproximadamente 96.5 % de agua y 2.5 % de sales y en menor cantidad otras sustancias incluyendo sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas [33]. Al analizarla se identifican seis iones predominantes los cuales pueden ser observados en la tabla 5.3 junto a otros iones en menor cantidad.

Tabla 5.3: Principales iones constituyentes del agua de mar

| Constituyente iónico | Compuesto químico | g/kg de agua | mol/kg de agua |
|----------------------|----------------------|--------------|----------------|
| Cloruro | Cl^- | 19.162 | 0.5405 |
| Sodio | Na^+ | 10.679 | 0.4645 |
| Magnesio | Mg^{2+} | 1.278 | 0.0526 |
| Sulfato | $(\text{SO}_4)^{2-}$ | 2.680 | 0.0279 |
| Calcio | Ca^{2+} | 0.4096 | 0.01022 |
| Potasio | K^+ | 0.3956 | 0.01011 |
| Ácido carbónico | $(\text{CO}_3)^{2-}$ | 0.0276 | 0.0023 |
| Bromuro | Br^- | 0.0663 | 0.00083 |
| Boro | B | 0.0044 | 0.00041 |
| Estroncio | Sr^{2+} | 0.0079 | 0.00009 |
| Fluoruro | F^- | 0.0013 | 0.00007 |

Nota: Concentración de salinidad igual a 34.7

Referencia: Tabla traducida de [33]

Se ha observado que los constituyentes descritos en la tabla 5.3 son constantes ya que el tiempo que se necesita para una mezcla uniforme es muy corto en comparación al tiempo requerido para remover o quitar por completo uno de los constituyentes, aunque estos datos pueden cambiar ligeramente por la evaporación o la precipitación por ejemplo.

5.1.3. El efecto de la salinidad sobre el agua

Obianyo [34] realizó un experimento con diferentes sales y cantidades para observar cómo afecta la salinidad la capacidad de evaporación del agua; su estudio nos indica que hay una relación clara entre el aumento de la salinidad y la reducción de la evaporación. Los coeficientes de retardo se pueden observar en la tabla 5.4.

En el apéndice A podemos observar la variación de las propiedades del agua de mar conforme a la salinidad a una atmósfera de presión, en el que se puede corroborar la relación de la salinidad y diversas propiedades vinculadas a la evaporación.

Tabla 5.4: Factores de retardo en la evaporación de agua con diferentes sales

| Sal | Factor de retraso |
|---------------------|-------------------|
| Sulfato de magnesio | 0.800 |
| Hidróxido de sodio | 0.490 |
| Cloruro de sodio | 0.712 |
| Cloruro de amonio | 0.820 |
| Nitrato de potasio | 0.822 |

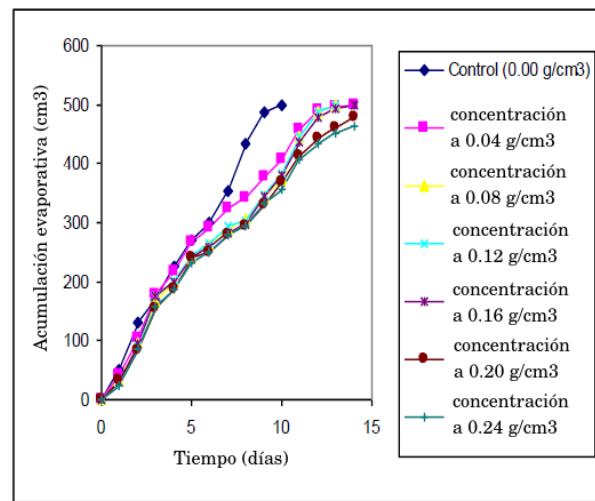


Figura 5.1: Relación entre la evaporación acumulada y el tiempo para la solución NaCl

Figura traducida de [34]

5.1.4. Propiedades coligativas del agua

El agua es un solvente por excelencia, por ello, en un proceso de desalinización se deben tomar en cuenta propiedades coligativas de las soluciones:

- Reducción relativa de la presión de vapor
- Elevación del punto de ebullición
- Depresión en el punto de congelación
- Presión osmótica

5.1.4.1. Elevación del punto de ebullición y disminución de la presión de vapor

La elevación del punto de ebullición es proporcional a la molaridad de la solución. Este fenómeno se puede explicar a través de la presión de vapor.

La presión de vapor del líquido puro refleja la tendencia de la solución hacia una mayor entropía, que se puede lograr si el líquido se vaporiza para formar un gas. Cuando un soluto está presente, hay una contribución adicional a la entropía del líquido, incluso en una solución ideal. Debido a que la entropía del líquido ya es más alta que la del líquido puro, hay una tendencia más débil a formar el gas (fig. 5.2). El efecto del soluto aparece como una presión de vapor baja, y por lo tanto un punto de ebullición más alto. Del mismo modo, la aleatoriedad molecular mejorada de la solución se opone a la tendencia a congelarse. En consecuencia, se debe mantener una temperatura más baja antes de alcanzar el equilibrio entre el sólido y la solución. Por lo tanto, el punto de congelación se reduce. [35].



(a) Se imagina a un solvente líquido como una estructura de cuadros

(b) Cuando hay presencia de un soluto (cuadros oscuros), la entalpía es más grande a comparación de un líquido puro y por ello hay una decreciente tendencia a adquirir el desorden característico de un vapor

Figura 5.2: La presión de vapor de un líquido puro representa el balance entre el aumento de entalpía debido a la vaporización y la disminución de entalpía en su entorno.

Figuras obtenidas de [35]

5.1.5. Evaporación del agua

La evaporación es el fenómeno que ocurre en la interfase líquido-vapor cuando la presión de vapor es menor que la presión de saturación de un líquido a una temperatura dada. A diferencia de la ebullición, la evaporación puede suceder a cualquier temperatura, adquiriendo mayor rapidez entre más alta es la temperatura. [36]

La presión atmosférica es la suma de la presión del aire seco (P_{aire}) y la presión de vapor (P_v), esta última constituye generalmente menos de un 3 % de la presión atmosférica.

$$P_{\text{atm}} = P_{\text{aire}} + P_v \quad (5.1)$$

El aire presenta límites de humedad pues es limitada la cantidad de vapor de agua que puede contener; podemos entonces definir a la humedad relativa (ϕ_{hr}) como la relación de cantidad de vapor de agua

real en el aire a determinada temperatura y la máxima cantidad que el aire puede contener a la misma temperatura. Para el aire seco $\phi_{hr} = 0$ y para el aire saturado $\phi_{hr} = 1$.

Podemos entonces especificar por completo la cantidad de humedad en el aire si conocemos la temperatura y la humedad relativa; a su vez podemos relacionar la presión de vapor con la humedad relativa mediante la (5.2). Podemos notar que la presión de saturación incrementa conforme más humedad exista en el aire. [37]

$$P_v = \phi_{hr} P_{\text{sat a } T} \quad (5.2)$$

5.2. Irradiación solar

5.2.1. Clasificaciones de la irradiancia

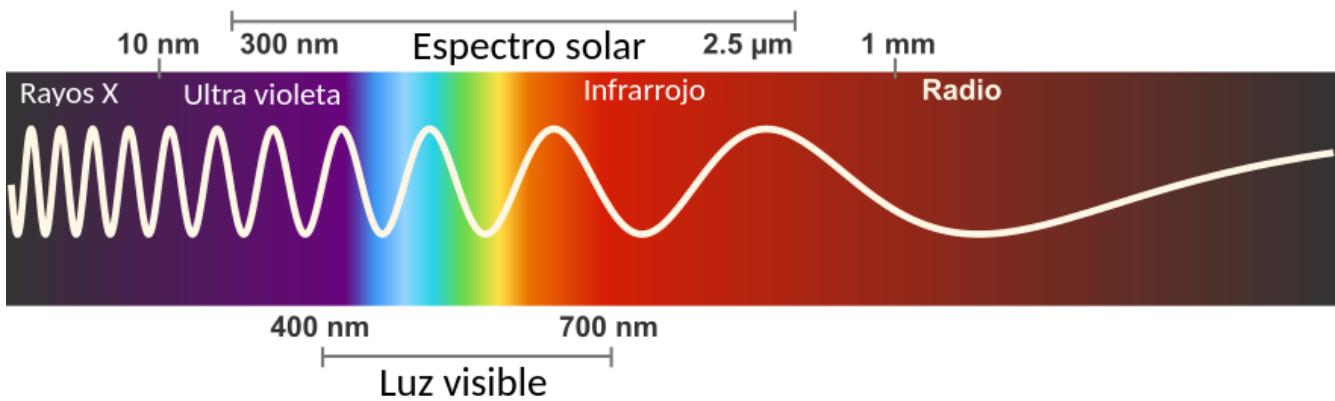
La irradiancia que recibe un objeto es clasificada de acuerdo a las interacciones por las que ese haz de luz pasó antes de llegar a dicho objeto.

- **Radiación directa:** Aquella que no tuvo interacción con otros cuerpos y que llega sin cambio de dirección.
- **Radiación difusa:** Aquella que sufrió algún choque con un cuerpo de la atmósfera, por ejemplo, la luz que atravesó una nube y fue difractada.
- **Radiación reflejada:** Aquella que proviene de la reflexión de la radiación directa.

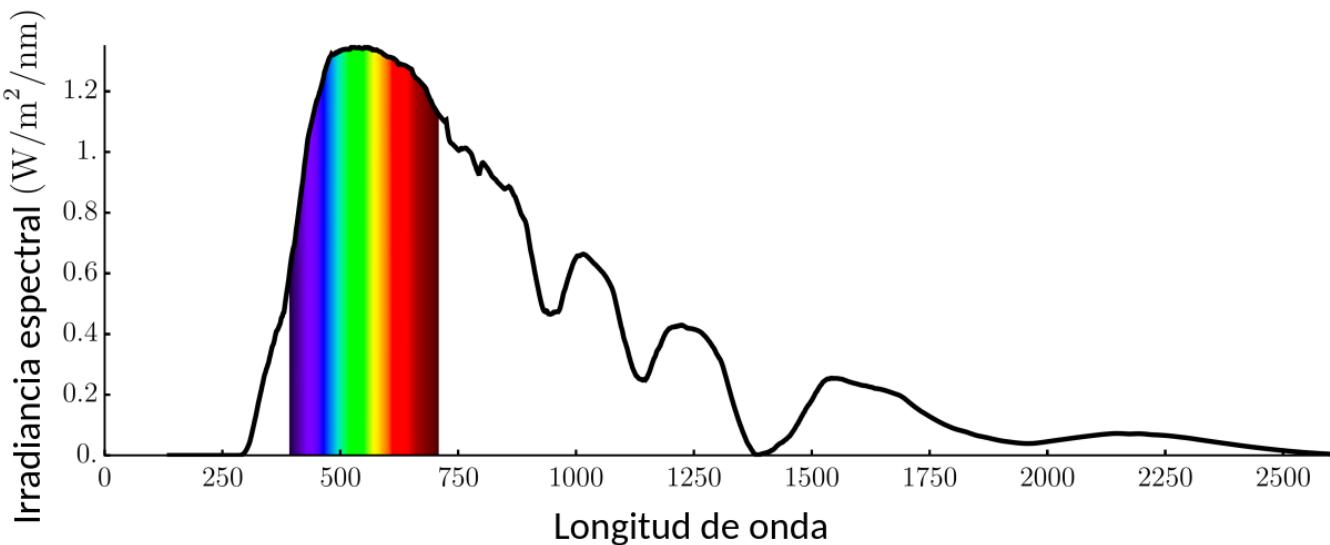
5.2.2. Propiedades espectrales de la radiación solar

Todas las radiaciones electromagnéticas viajan en el vacío con la misma rapidez ($c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) sin importar la fuente de emisión [38], y todos los cuerpos que poseen temperatura por arriba de los 0 grados kelvin emiten radiación electromagnética derivada del movimiento vibracional de sus moléculas; las frecuencias emitidas y asociadas a esta vibración dan origen a la radiación térmica. Nótese que la luz no necesariamente tiene la misma energía a pesar de viajar a la misma rapidez.

Cerca del 99 % de la potencia recibida por el sol está entre los 300 nm a 2500 nm. En las figs. 5.3a y 5.3b notamos que de la irradiancia solar recibida, un aproximado del 44 % de la energía total corresponde al espectro visible mientras que un 52 % pertenece a la región del infrarrojo y el 4 % restante correspondería a la radiación ultravioleta [39].



(a) Espectro de radiación solar incidente sobre la Tierra



(b) Potencia recibida del sol en la Tierra

Figura 5.3: Imágenes traducidas de [39]

5.2.3. Irradiancia solar en la Tierra

El sol posee una temperatura superficial aproximada de 5778 K, la cual emite calor en forma de radiación constantemente, de la cual, en el tope de la atmósfera terrestre se recibe un valor conocido como constante solar (G) cuyo valor actualizado es de $1360.8 \text{ W m}^{-2} \pm 0.5 \text{ W m}^{-2}$. Sin embargo, no toda esa energía llega a la superficie terrestre fig. 5.4 debido a una serie de factores como el movimiento de rotación y translación así como la inclinación de la Tierra, las condiciones climáticas y geográficas propias de la zona, del día y de las interacciones a lo largo de su trayectoria por la atmósfera [40].

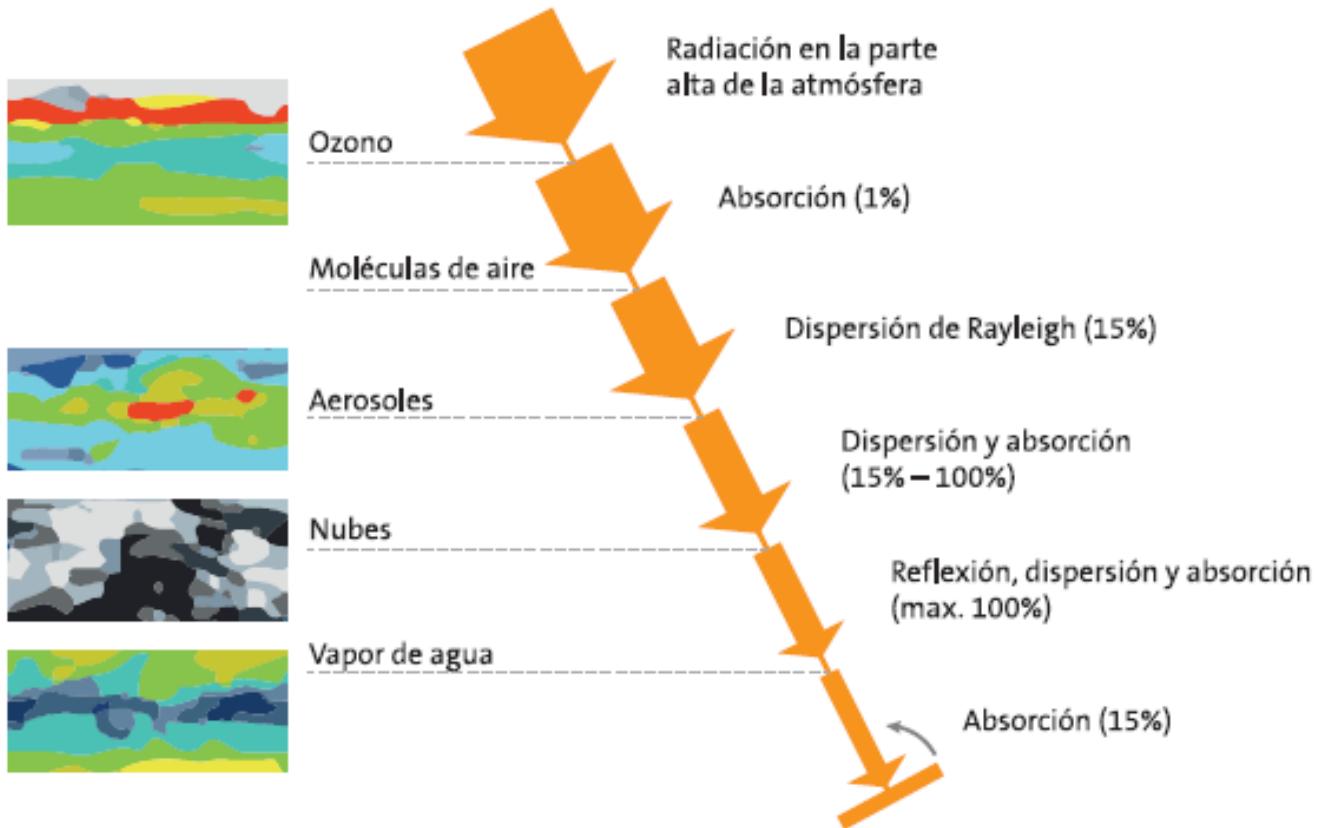


Figura 5.4: Atenuación de la radiación solar por su paso por la atmósfera

Imagen obtenida de [40]

5.2.3.1. Variación con respecto a la latitud

Como se mencionó anteriormente, el recurso solar varía de acuerdo a la latitud (ϕ). Ignorando la inclinación de la Tierra, esta variación viene dada por (5.3).

$$I_\phi = I_{\text{Superficial}} \times \frac{\cos \phi}{\pi} \quad (5.3)$$

Esta ecuación deriva de la razón entre el área proyectada y el área superficial verdadera. La Tierra se proyecta como un círculo al recibir la luz solar, sin embargo, en realidad se trata de una vista del área de una esfera. Si tomamos una franja infinitesimal de tamaño $d\phi$, podemos crear los dos rectángulos observados en la fig. 5.5 donde r_E es el radio de la Tierra.

Como se observa, intensidad de la radiación solar cae rápidamente y a pesar de ser una cantidad enorme de energía, esta se encuentra dispersa en toda el área superficial real.

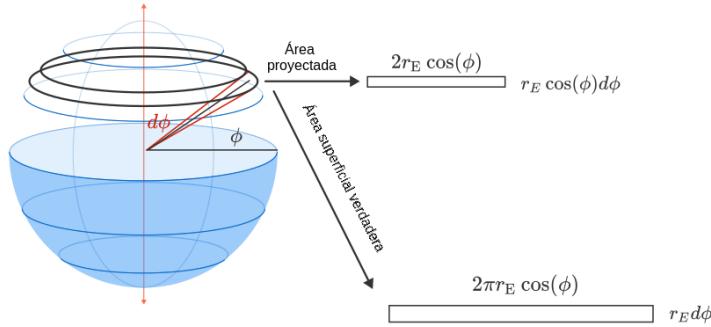


Figura 5.5: Irradiancia solar a latitud ϕ

Imagen traducida de [41]

5.2.3.2. Direccionalidad de la radiación solar

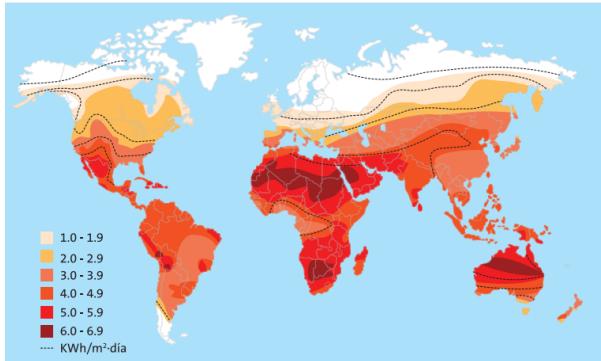
El Sol se proyecta en el cielo como un círculo, no como un punto, haciendo que sea una fuente de luz imperfecta cuyos rayos no son perfectamente colimados ya que vienen con una ligera desviación angular que se puede aproximar mediante (5.4).

$$\theta_s = \arctan \left(\frac{r_{\text{Sol}}}{d_{\text{Sol-Tierra}}} \right) \quad (5.4)$$

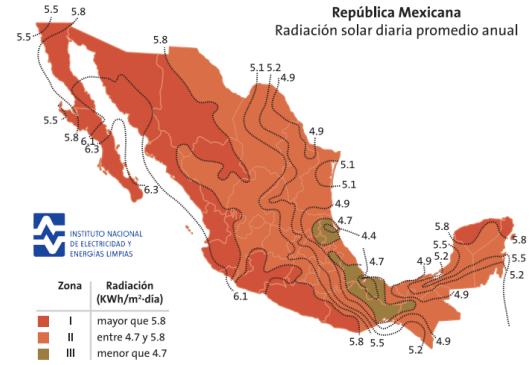
Usando (5.4) se calcula que el ángulo medio de radiación solar es $\theta_s = 0.275^\circ$.

5.2.4. Potencial solar en México

México se encuentra en una zona geográfica de alta irradiación solar, como se aprecia en la fig. 5.6b, diariamente se recibe un promedio mínimo de 4.4 kW h m^{-2} y un máximo de 6.3 kW h m^{-2} según la zona geográfica, lo que lo sitúa como un país con alta capacidad en energía solar.



(a) Radiación solar promedio en el mundo



(b) Radiación solar promedio en México

Figura 5.6: Radiación solar

Imágenes obtenidas de [40]

5.3. Concentración solar

Como se vio en la sección 5.2.3, la energía por unidad de área puede no ser suficiente grande como, sin embargo, se puede aumentar la cantidad de energía por unidad de área a través de la concentración de los rayos del Sol. Un concentrador solar es un tipo de colector solar que es capaz de concentrar la energía solar en un área reducida. Para ello se colecta la irradiancia incidente sobre un área y se concentra en una segunda área más pequeña. En un sistema ideal, ese sistema quedaría caracterizado por la razón de concentración superficial la cual se define por (5.5).

$$C_{\text{área}} = \frac{A_{\text{entrada}}}{A_{\text{salida}}} \quad (5.5)$$

Dado a que se trabaja en sistemas reales que tienen ineficiencias y defectos, la razón de concentración superficial suele ser solamente una aproximación, por lo que resulta conveniente definir la razón de concentración de flujos (5.6). Esta nueva razón ya tiene en cuenta las pérdidas del sistema. Ambas razones se pueden relacionar fácilmente a través de la eficiencia de concentración $\eta_{\text{concentración}}$ mediante (5.7).

$$C_{\text{flujo}} = \frac{I_{\text{salida}}}{I_{\text{entrada}}} \quad (5.6)$$

$$C_{\text{flujo}} = \eta_{\text{concentración}} C_{\text{área}} \quad (5.7)$$

5.3.1. Límites de la concentración solar

Aunque uno pueda imaginar que con una lente lo suficientemente grande y un área de concentración lo suficientemente pequeña podamos alcanzar cualquier temperatura, esto no es cierto. Se puede demostrar

fácilmente y de formas muy variadas el límite de la concentración solar.

- **Límite termodinámico:**

Imaginemos que logramos una relación de concentración superficial tal que:

$$\frac{A_{\text{entrada}}}{A_{\text{salida}}} \rightarrow \infty$$

La temperatura que se alcanzaría por un sistema así tendería hacia el infinito violando la segunda ley de la termodinámica.

- **Argumento de geometría óptica:**

Los principios físicos que se aplican para aumentar la intensidad son la reflexión y la refracción, no importa cuál principio sigamos, se trata de un fenómeno reversible, por lo que dos rayos con diferentes suponen dos trayectorias diferentes, es decir, no pueden enfocarse en la misma trayectoria, lo que supone un límite geométrico de la cantidad de rayos que puede enfocar una lente.

- **Conservación de la extensión óptica:**

En un sistema de concentración la extensión óptica (muchas veces referida como el *étendue*) sólo puede mantenerse constante o aumentar. Se puede lograr un decremento en el espaciamiento óptico pero aumentará el espaciamiento espacial y de manera contraria, al decrecer el espaciamiento espacial aumentará el espaciamiento óptico.

5.3.2. Clasificación de concentradores solares

La propuesta de [42] sugiere clasificarlos de acuerdo a su principio óptico, es decir:

- Reflexión para espejos concentradores
- Refracción para geometrías de concentración basadas en lentes o lentes de Fresnel
- Dispersión para concentradores basados en el poder dispersivo de prismas u hologramas
- Fluorescencia (luminiscencia) para concentradores de radiación global por medio de tintes fluorescentes incrustados en una placa plana de vidrio o plástico.

No obstante, los concentradores solares generalmente están compuestos de una combinación de estos principios, pero aún así se pueden distinguir dos clases de concentradores solares basados en su diseño óptico y las propiedades de formación de imagen.

- Concentradores con formación de imagen (generalmente no son ideales)
- Concentradores sin formación de imagen (presentan comportamiento cercano al ideal)

5.3.2.1. Concentradores sin formación de imagen

Un sistema óptico sin formación de imágenes está diseñado para concentrar la radiación con la mayor densidad posible, pretendiendo alcanzar el comportamiento ideal teórico de concentración. Así mismo por definición, el sistema óptico no produce una imagen de la fuente de luz.

5.3.2.2. Clasificación por la geometría de concentración

Un concentrador se considera de dos dimensiones (2D) si los rayos de luz recibidos se enfocan sobre una línea de acción. El *étendue* de un sistema 2D está dado por (5.8)

$$A_{\text{entrada}} \sin \theta_s = A_{\text{salida}} \sin \theta_{\text{salida}} \quad (5.8)$$

Por lo tanto la razón de concentración superficial está dada por (5.9) cuyo máximo ideal se alcanzaría cuando $\sin \theta_{\text{salida}} = 1$.

$$C_{\text{área } 2D} = \frac{\sin \theta_{\text{salida}}}{\sin \theta_s} \quad (5.9)$$

Un concentrador se considera de tres dimensiones (3D) si los rayos de luz recibidos se enfocan sobre un punto (En realidad un área pequeña). El *étendue* de un sistema 3D está dado por (5.10)

$$A_{\text{entrada}} \sin^2 \theta_s = A_{\text{salida}} \sin^2 \theta_{\text{salida}} \quad (5.10)$$

Por lo tanto la razón de concentración superficial está dada por (5.11) cuyo máximo ideal se alcanzaría cuando $\sin^2 \theta_{\text{salida}} = 1$

$$C_{\text{área } 3D} = \left(\frac{\sin \theta_{\text{salida}}}{\sin \theta_s} \right)^2 \quad (5.11)$$

Notemos que:

$$C_{\text{área } 2D} = \sqrt{C_{\text{área } 3D}} \quad (5.12)$$

Podemos reescribir (5.10) en términos de los índices de refracción del medio que rodea al emisor n_{emisor} y al concentrador $n_{\text{concentrador}}$. La ecuación (5.13) sigue obedeciendo a (5.12)

$$C_{\text{área } 3D} = \left(\frac{n_{\text{concentrador}}}{n_{\text{emisor}}} \right)^2 \quad (5.13)$$

5.4. Desalinización

5.4.1. Métodos de desalinización

Los métodos de desalinización se pueden dividir en 4 categorías según el principio de trabajo; como se observa en la fig. 5.7, se pueden agrupar en:

- **Métodos térmicos:** Con el conocimiento de los puntos de evaporación y congelación del agua y las condiciones de operación que se tendrán, se establecen técnicas que permiten extraer las sales al modificar la temperatura.
- **Métodos de membrana:** Con fuerzas impulsoras sean mecánicas o eléctricas, se usa una barrera física (membrana) con poros de tamaño específico para separar las sales del agua atrapándolas en los poros.
- **Métodos químicos:** Se hace uso de propiedades químicas como diferencia de solubilidad, transporte de iones disueltos, mecanismos de nucleación, entre otros para aprovechar estos fenómenos para purificar solventes, entre ellos, el agua.
- **Adsorción:** Con el descubrimiento de nuevos materiales se usan materiales porosos adsorbentes que purifican el agua; posteriormente se les inyecta otra cantidad de energía para limpiarlos y así poder ser utilizados de nuevo.

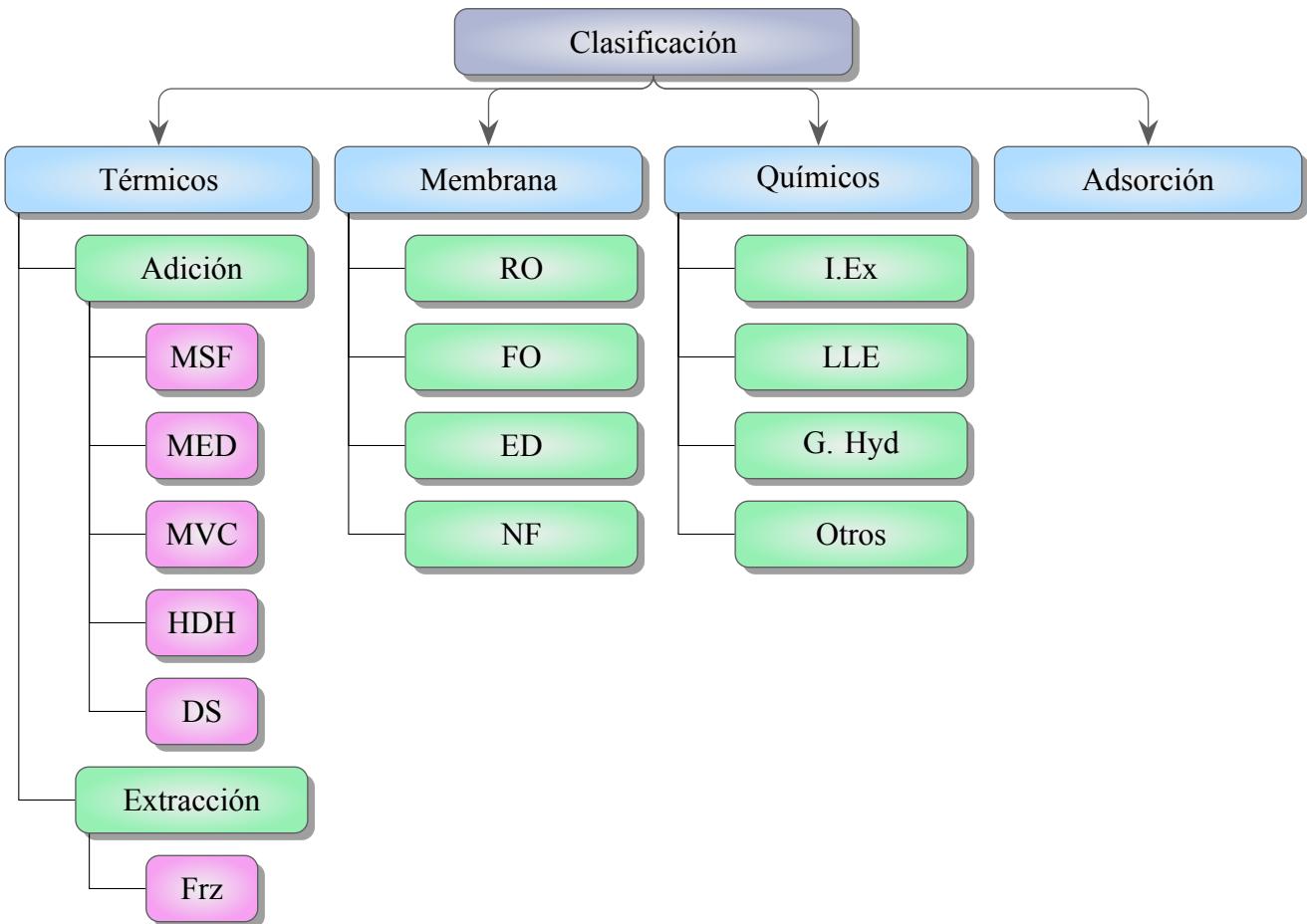


Figura 5.7: Esquematización de los diferentes métodos de desalinización

Elaboración propia

5.4.2. Destilación solar

Los destiladores solares caen dentro de los métodos térmicos aditivos de la desalinización, a su vez, estos se pueden agrupar en destiladores solares activos y pasivos. Los DS activos son aquellos que incorporan una fuente de energía externa para aumentar la producción del sistema; entre los mecanismos que se pueden incorporar existen concentradores solares, calor residual de procesos industriales, calentadores eléctricos o de combustible, etc. En la fig. 5.8 se aprecian algunas clasificaciones que tendría un destilador solar según la forma y los elementos incorporados [43].

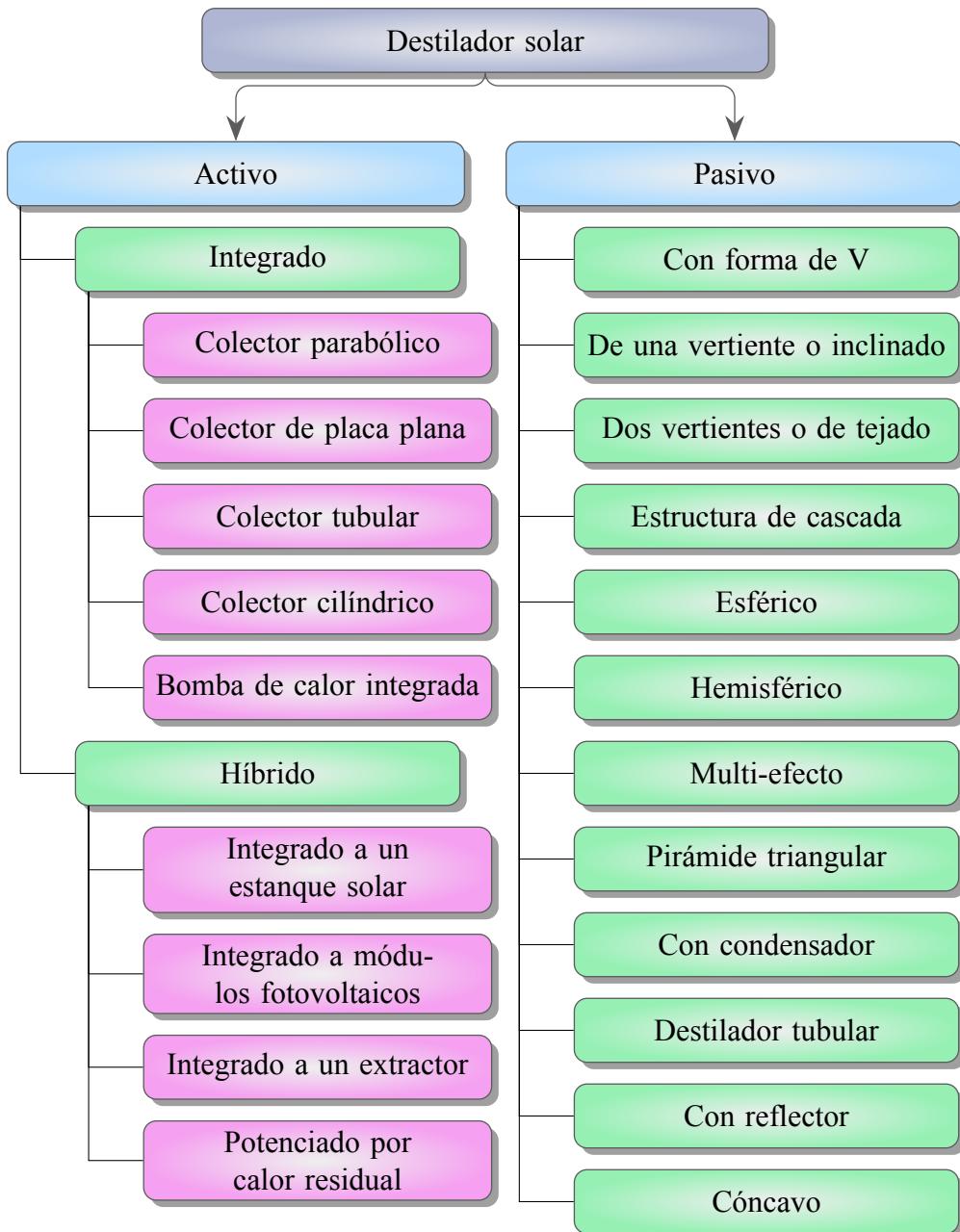


Figura 5.8: Subclasificaciones de la Destilación solar

Elaboración propia

5.5. Corrosión

La Association for Materials Protection and Performance (AMPP) explica que la corrosión es un fenómeno natural comúnmente definido como el deterioro de un material, por lo usual metálico, resultante de una reacción química o electroquímica con el ambiente. La corrosión puede causar daños peligrosos y costosos a cualquier sistema que incluya metal, entre ellos estructuras metálicas y tuberías, afortunadamente, existen diversas formas de prevenir o controlar la corrosión y sus impactos [44].

A excepción de algunos tipos de corrosión debido a altas temperaturas, todas se producen a través de la acción de la célula electroquímica, la cual está compuesta habitualmente por:

- Un ánodo donde la oxidación y pérdida de metal ocurren
- Un cátodo donde se producen efectos de reducción y protección
- Un conjunto de trayectorias metálicas y electrolíticas entre el ánodo y el cátodo por los que fluye la corriente electrónica e iónica
- Una diferencia de potencial que activa la célula

5.5.1. Formas de corrosión

5.5.2. Clasificación por su forma de identificación

| Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 |
|--|--|---|
| <p>Corrosión fácilmente identificable por examinación visual ordinaria</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Uniforme▪ Crateriforme o por picadura▪ De grieta▪ De relleno▪ Paquete de corrosión por óxido▪ Galvánica▪ Laminar | <p>Corrosión identifiable por medios suplementarios</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Erosión▪ Cavitación▪ Fricción▪ Intergranular▪ Exfoliación▪ Lixiviación selectiva | <p>Corrosión que requiere verificación por microscopio</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Agrietamiento ambiental▪ Agrietamiento por corrosión bajo tensión▪ Fatiga por corrosión▪ Fragilización por hidrógeno |

5.5.2.1. Corrosión general o corrosión uniforme

Este tipo de corrosión sucede de manera uniforme sobre una superficie, al encontrarse al rededor de toda la superficie, se produce un adelgazamiento casi uniforme que se reconoce por la rugosidad del material y productos de la corrosión como el óxido.

Este mecanismo de corrosión típicamente sucede por la interacción con el ambiente (electrolito), el cual genera un ataque electroquímico sobre la superficie del material. Las diferencias en la composición u orientación entre pequeñas áreas en la superficie del metal crean ánodos y cátodos que facilitan el proceso de corrosión [45], [44].

5.5.2.2. Corrosión localizada

A diferencia de la corrosión general, este tipo ataca lugares discretos del sistema, siendo más peligrosa, pues al tener área reducida, es más difícil de controlar; además, este tipo de corrosión es la que genera mayor daño a las tuberías de revestimiento en ambientes con H₂S o CO₂.

5.5.3. Métodos para mitigar la corrosión

Selección de materiales

Considerar diversos factores al momento de elegir los materiales es esencial para disminuir en lo más posible la corrosión, entre ellos, se encuentran aunque no limitados a: condiciones ambientales y de operación, tipo de producto con el que interactuará el material, tiempo de vida estimado y proximidad a fenómenos de corrosión.

Planeación y ejecución de medidas preventivas

Algunas medidas que se pueden tomar mitigar los impactos de la corrosión son: aplicación de recubrimientos protectores; medición e inspección de la corrosión para llevar un control; uso de protección catódica; uso de inhibidores químicos y la creación de un plan de manejo para la corrosión.

5.6. Termodinámica de la destilación solar

5.6.1. Evaporación del agua

La evaporación es el fenómeno que ocurre en la interfase líquido-vapor cuando la presión de vapor es menor que la presión de saturación de un líquido a una temperatura dada. A diferencia de la ebullición, la evaporación puede suceder a cualquier temperatura, adquiriendo mayor rapidez entre más alta es la temperatura. [36]

La presión atmosférica es la suma de la presión del aire seco y la presión de vapor (5.14), esta última constituye generalmente menos de un 3 % de la presión atmosférica.

$$P_{\text{atm}} = P_{\text{aire}} + P_{\text{v}} \quad (5.14)$$

El aire presenta límites de humedad pues es limitada la cantidad de vapor de agua que puede contener; podemos entonces definir a la humedad relativa ϕ_{hr} como la relación de cantidad de vapor de agua real en el aire a determinada temperatura y la máxima cantidad que el aire puede contener a la misma temperatura. Para el aire seco $\phi_{\text{hr}} = 0$ y para el aire saturado $\phi_{\text{hr}} = 1$.

Podemos entonces especificar por completo la cantidad de humedad en el aire si conocemos la temperatura y la humedad relativa; a su vez podemos relacionar la presión de vapor con la humedad relativa mediante

la (5.15). Podemos notar que la presión de saturación incrementa conforme más humedad exista en el aire. [37]

$$P_v = \phi_{hr} P_{\text{sat a T}} \quad (5.15)$$

5.7. Ebullición del agua

La ebullición del agua es un proceso complejo de analizar pues comprende varias etapas, tanto si es ebullición en estanque como en flujo. La creación aparentemente aleatoria de burbujas y de películas de vapor hacen que no se pueda obtener de manera precisa un modelo matemático que describa el comportamiento de este fenómeno.

5.7.1. Ebullición en estanque

La ebullición en estanque presenta 4 regímenes de ebullición: ebullición en convección natural, ebullición nucleada, ebullición de transición y ebullición en película

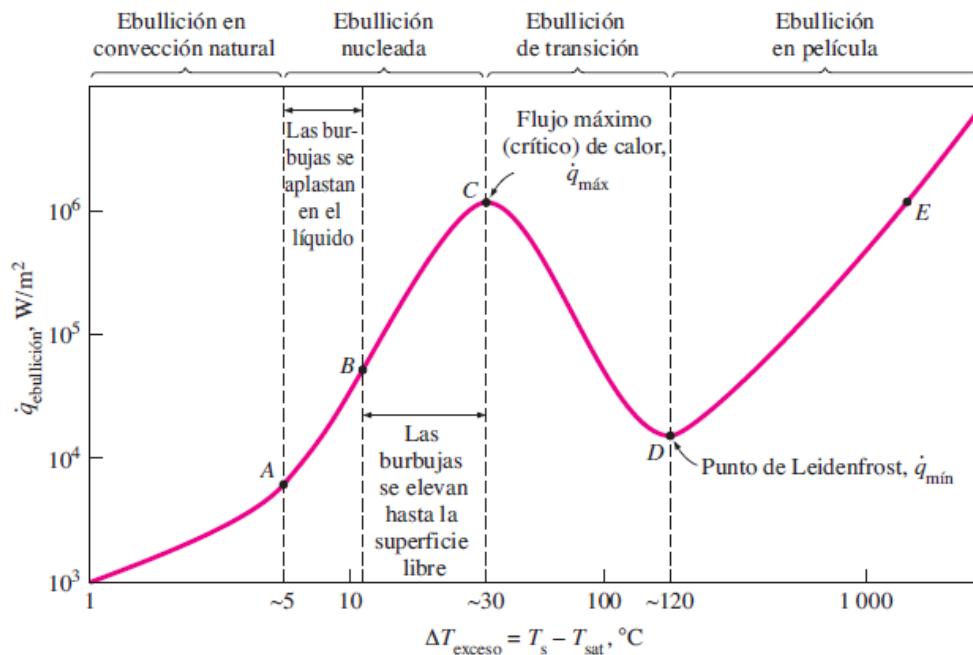


Figura 5.9: Curva típica de ebullición en estanque del agua a 1 atmósfera

Imagen obtenida de [36]

En la curva mostrada en la fig. 4.1 se puede apreciar no sigue un comportamiento lineal y el que la superficie tenga más temperatura no significa que aumentará la transferencia de calor, pues la formación de burbujas al cambiar de fase el agua disminuye esta razón y entre mayor sea esta capa de vapor, menor

transferencia tendremos dada la menor conductividad térmica del vapor. En general, los procesos de ebullición no seguirán más allá de nuestro punto C, pues para lograr obtener otra vez la misma transferencia de calor se tendría que alcanzar el punto E, el cual alcanza temperaturas mayores al punto de fusión de varios de los materiales que usualmente son empleados durante estos procesos. Cabe mencionar que una vez alcanzado el punto de Leidenfrost, se observa que la transferencia de calor por radiación empieza a apreciarse y cuando la temperatura en exceso es demasiado alta, este mecanismo de transferencia se vuelve predominante.

5.7.2. Ebullición en flujo interno

La ebullición en flujo fuerza a un fluido a moverse por medio de una fuerza externa, este se considera en flujo interno si la superficie por la que fluye evita que el vapor escape, es decir un flujo dentro de un tubo. Este método de transferencia al ser bifásico es más complejo de analizar y se pueden distinguir 7 etapas visibles en la fig. 5.10. Es a su vez importante recordar que durante este fenómeno se presenta la condición de no deslizamiento.

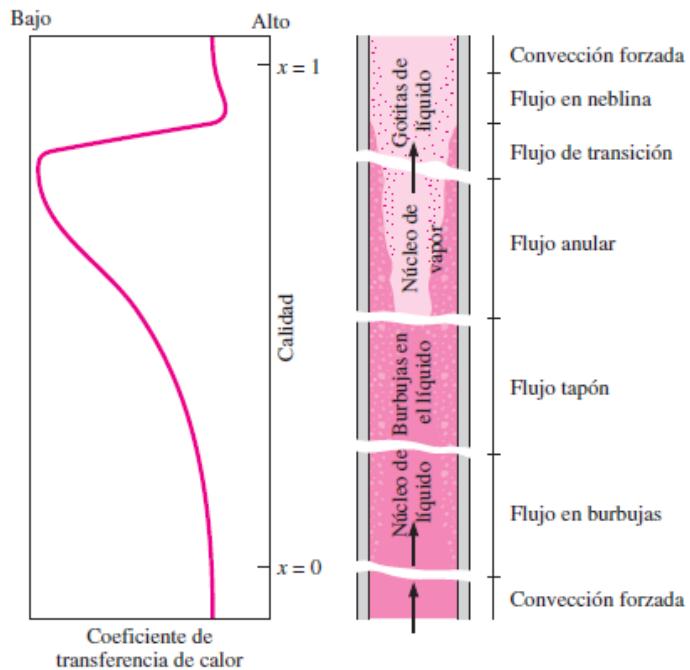


Figura 5.10: Curva típica de ebullición en estanque del agua a 1 atmósfera

Imagen obtenida de [36]

5.7.2.1. Convección interna forzada

Geometría

Como menciona [36], para un área superficial fija, el tubo circular da la mayor transferencia de calor para la caída de presión más baja, siendo popular su uso en el transporte de fluidos, en especial los líquidos,

debido a que pueden soportar grandes diferencias de presión entre el ambiente y el volumen interno¹. Los tubos no circulares suelen usarse en sistemas de calefacción y enfriamiento.

Flujo

El flujo de un sistema puede ser unidimensional, bidimensional o tridimensional de acuerdo a las variaciones a lo largo de las coordenadas donde podemos definir un vector $\vec{V}(x, y, z)$ o bien $\vec{V}(r, \theta, z)$ dependiendo del sistema de referencia que nos convenga analizar.

En la entrada de un tubo circular se podría decir que tenemos un flujo bidimensional, pues las variaciones en la tercera coordenada serían demasiado pequeñas como para suponer una influencia en los cálculos, este flujo el entrar empieza a ganar uniformidad y después de cierta distancia (alrededor de 10 diámetros del tubo para flujo turbulento [36]) se puede decir que el flujo está completamente desarrollado y para un tubo circular el flujo es unidimensional en este punto en coordenadas cilíndricas o bidimensional en coordenadas cartesianas.

A su vez podemos distinguir entre un flujo laminar, turbulento o en transición. El flujo laminar se caracteriza por ser un movimiento altamente ordenado y con líneas suaves de corriente; por el contrario el flujo turbulento tiene fluctuaciones en la velocidad y presenta un movimiento altamente desordenado, por lo que la transferencia de calor es mucho mayor que en el flujo laminar, pues provee mayor interacción entre la materia. El cambio entre estos dos flujos al no ser repentino tiene una etapa de transición donde varía entre flujo laminar y turbulento.

Este modelo de flujo depende de varios factores como la configuración geométrica de la superficie, las asperezas del material, la velocidad de flujo, la temperatura y las propiedades del fluido. En 1880, Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón entre las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas. De ahí surge el número de Reynolds, el cual es una cantidad adimensional y se expresa como en la (5.16)

$$Re = \frac{VL_c}{v} = \frac{\rho VL_c}{\mu} \quad (5.16)$$

Donde:

V : Velocidad corriente superior

v : Viscosidad cinemática del fluido

μ : Viscosidad dinámica

ρ : Densidad

Velocidad y temperatura promedios

Recordemos que por la condición de no deslizamiento, vamos a tener diferentes velocidades en el tubo, siendo cero en la superficie y alcanzando un máximo en el centro; por lo que el considerar una velocidad promedio se hace especialmente útil, obedeciendo al principio de la conservación de la masa.

¹Dado a lo aquí descrito, los puntos subsecuentes serán delimitados a los tubos circulares.

$$V_{\text{prom}} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr \quad (5.17)$$

Donde:

$u(r)$: Perfil de velocidad

R : Radio

Algo similar ocurre con la temperatura, sin embargo, a diferencia de la velocidad promedio, la temperatura promedio varía conforme el fluido de desplaza. Esta temperatura obedece al principio de la conservación de la energía.

$$T_{\text{prom}} = \frac{2}{V_{\text{prom}} R^2} \int_0^R T(r) u(r) r dr \quad (5.18)$$

Donde:

$u(r)$: Perfil de velocidad

R : Radio

Análisis térmico

El desplazamiento del fluido supone un ligero aumento de calor por la fricción entre las partículas, sin embargo, este aumento es tan pequeño que en realidad no afecta el cálculo general, por lo cual este cálculo se descarta, con excepción de líquidos intensivamente viscosos con altos gradientes de velocidad

Caída de presión

La caída de presión es una cantidad que está relacionada de manera directa con la potencia requerida por las bombas o ventiladores para mantener un flujo dado [36]. “En la práctica, resulta conveniente expresar la pérdida de presión para todos los tipos de flujos internos completamente desarrollados (flujos laminares o turbulentos, tubos circulares o no circulares, superficies lisas o ásperas, tubos horizontales o inclinados) como”

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{\text{promedio}}^2}{2} \quad (5.19)$$

Donde f se conoce como el factor de fricción de Darcy o Darcy-Weisbach

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho V_{\text{promedio}}^2} \quad (5.20)$$

5.7.3. Intensificación de la transferencia de calor

Cengel [36] nos indica que una manera de mejorar la transferencia de calor hacer intencionalmente que la superficie tenga asperezas o porosidades para favorecer la nucleación, por lo que a menudo las superficies de los tubos son ásperas, corrugadas o con aletas, teniendo importantes incrementos en la transferencia de calor con hasta un 400 % de mejora, aunque este aumento viene acompañado de un incremento en el factor de fricción y caída de presión, otras maneras de mejorar esta transferencia son generadores de pulsos, al inducir remolinos.

Ramírez [46] realizó un trabajo donde aglomera distintos métodos para mejorar la razón de transferencia de calor en ebullición convectiva durante el flujo interno de un fluido revisando numerosos mecanismos entre los que se encuentran:

Tubos con aletas internas

Las aletas internas son utilizadas para mejorar la transferencia de calor en flujos multifásicos y monofásicos; disminuyen el diámetro hidráulico a la vez que aumentan la superficie de contacto y aunque no presenta ínfimas ventajas para la nucleación tiene un considerable aumento en la convección de fluidos multifásicos.

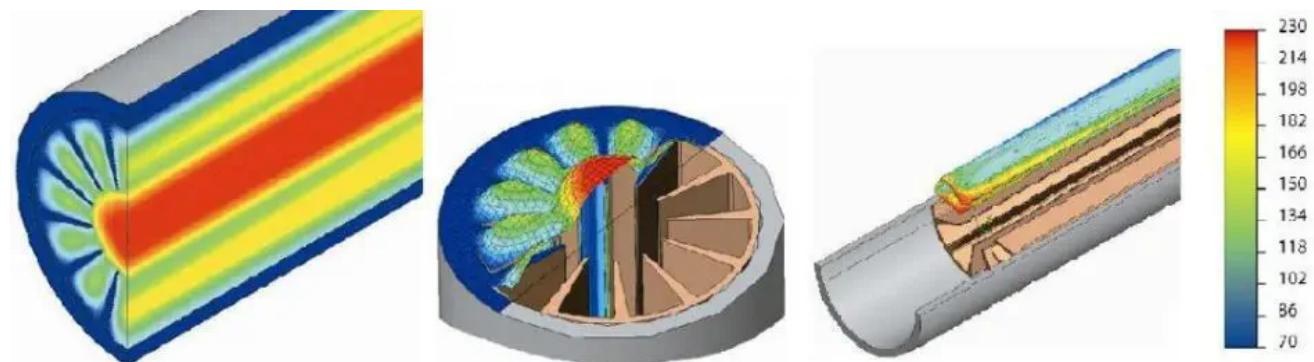


Figura 5.11: Tubo con aletas internas

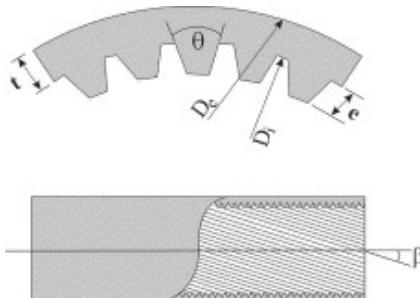
Imagen obtenida de [47]

Tubos microaletados

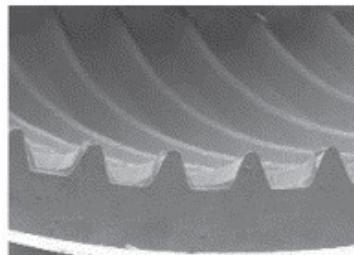
Aunque son tubos usualmente utilizados para la refrigeración y aire acondicionado [48], [49] citados por [46] pudieron mostrar que los incrementos en tubos con microaletas tienen incrementos en el intercambio de calor de 1.6 a 3.2 veces, siendo las causas principales:

- Aumento del área de contacto
- El área de levantamiento en la dirección de la circunferencia es grande
- Aumento de cavidades para la nucleación
- Las aletas tienen un efecto sobre la tubulencia y el flujo secundario

Arreglo de tubos de cintas torcidas



(a) Geometría del tubo



(b) Perfil de la aleta

Figura 5.12: Tubos con microaletas

Imagen obtenida de [46]

Este arreglo es ampliamente usado para flujos monofásicos, sin embargo, también son dispositivos muy eficaces en el aumento de la razón de transferencia de calor, dado a que estos arreglos centrifugan el líquido contra la pared desplazando el vapor y reduciendo el diámetro hidráulico, también propician remolinos que incrementan la interacción de la materia y energía aunque también **existe una caída de presión importante**.

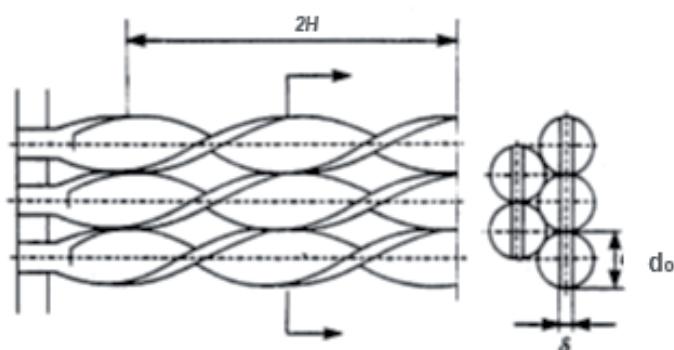


Figura 5.13: Arreglo de cintas torcidas

Imagen obtenida de [46]

Campos acústicos

En el estudio de Ramírez se menciona que hay diversos estudios que han demostrado que los efectos acústicos en las burbujas cercanas a la pared calentada tienen una influencia importante en la transferencia de calor apresurando el desprendimiento de las burbujas que se adhieren a las paredes del tubo.

Capítulo 6

Desarrollo experimental

Este trabajo busca realizar una investigación cuasi-experimental para reportar el comportamiento del destilador solar propuesto de acuerdo a la influencia de las variables independientes descritas en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Variables del desarrollo experimental

| Variable | Clasificación | Tipo de dato | Influencia en el modelo |
|--------------------------------------|---------------|--------------|---|
| Temperatura de entrada del agua* | Independiente | Cuantitativa | Establece la temperatura inicial del modelo térmico para la ebullición del agua |
| Presión atmosférica | Independiente | Cuantitativa | Modifica la temperatura a la cual sucede el cambio de fase del agua |
| Temperatura ambiente | Independiente | Cuantitativa | Influye en las pérdidas de calor que tendrá el sistema |
| Clima (nubosidad) | Independiente | Cualitativa | Punto de comparación rápido para ver la influencia de la nubosidad sobre el desempeño |
| Velocidad de viento | Independiente | Cuantitativa | Se asocia directamente a las pérdidas de calor por convección |
| Hora del día | Independiente | Cuantitativa | Determina la posición angular del Sol y se relaciona con la irradiación solar |
| Irradiación solar promedio | Independiente | Cuantitativa | Determina la potencia solar recibida en nuestro modelo de transferencia de calor |
| Temperatura de salida del agua | Dependiente | Cuantitativa | Asociada al cambio de fase del agua |
| Temperatura del recipiente solar | Dependiente | Cuantitativa | Influye en los modelos térmicos para la destilación del agua |
| Caudal de agua* | Dependiente | Cuantitativa | Influye en los modelos térmicos y la tasa de desalinización |
| Propiedades físico-químicas del agua | Dependiente | Cuantitativa | Indica la calidad del agua |

* Se puede ejercer control directo sobre esta variable.

6.1. Grupos de estudio

Con base en las variables observadas en la tabla 6.1 se distinguieron los grupos de control descritos en las sub-secciones siguientes.

6.1.1. Agua

Las muestras de agua se seleccionaron guiándose en la tabla 5.1. Para ello, la obtención de agua de mar se simula con sales marinas para acuario y se proponen 3 grupos de control descritos en la tabla 6.2 para evaluar los casos límite y promedio de la salinidad del agua de mar.

Tabla 6.2: Grupo de control del agua de mar

| Muestra | Salinidad (mg L^{-1}) |
|---------|----------------------------------|
| 1 | 30 000 |
| 2 | 35 000 |
| 3 | 40 000 |

6.1.2. Lugar físico de experimentación

Debido al alcance del proyecto, se acotó el lugar físico de experimentación a la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas ubicada en la Ciudad de México.

Tabla 6.3: Grupo de control del agua de mar

| Zona | Longitud | Latitud | Altitud |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------|
| Ciudad de México, México | $-99^{\circ}7'32''$ | $19^{\circ}30'38''$ | 2241 m |

6.1.2.1. Variables climáticas sobre la región a investigar

Debido a la naturaleza de nuestra fuente de energía y que su operación no transcurren dentro de un ambiente controlado se deben evaluar las condiciones climáticas del lugar que impactan en mayor medida el sistema propuesto.

Tabla 6.4: Variables climáticas consideradas importantes para la investigación

| Variable | Descripción | Unidades |
|---------------------|---|-------------------|
| Presión superficial | Presión promedio en la superficie del lugar | kPa |
| Velocidad de viento | Velocidad de viento promedio a 2 metros sobre la superficie del lugar | m s^{-1} |

Continúa en la siguiente página

Tabla 6.4: Variables climáticas consideradas importantes para la investigación (Continuación)

| Variable | Descripción | Unidades |
|---|--|---------------------|
| Humedad específica | Razón promedio de la masa de vapor de agua por unidad de aire a 2 metros sobre la superficie del lugar | g kg^{-1} |
| Radiación de onda corta (ROC) sobre cielo despejado | Total de irradiación solar incidida (directa más difusa) sobre la tierra en un plano horizontal sobre la superficie de la tierra a condiciones de cielo despejado. | W h m^{-2} |
| Radiación de onda corta | Total de irradiación solar incidida (directa más difusa) sobre la tierra en un plano horizontal sobre la superficie de la tierra a todas las condiciones. | W h m^{-2} |
| Nubosidad | Porcentaje promedio de cantidad de nubes en el cielo sobre un lapso determinado | W h m^{-2} |
| Irradiancia UVA? | Radiación UVA (315 nm a 400 nm) total incidida a todas las condiciones climáticas del día | W m^{-2} |
| Irradiancia UVB? | Radiación UVB (280 nm a 315 nm) total incidida a todas las condiciones climáticas del día | W m^{-2} |

[?] Estas variables fueron estudiadas para saber si se debían considerar en los modelos a desarrollar, sin embargo, tras un segundo análisis después del estudio se decidió excluirlas del modelo

6.2. Descripción de los problemas asociados a la destilación solar

Gracias a una entrevista informal con el Dr. Sergio Isai Palomino Resendiz acerca del modelo propuesto en [23], se identificó que la humedad suele condensarse sobre el vidrio o cristal afectando así la transmisividad y por ende el calor efectivo que llega al agua. Además, debido a la naturaleza intermitente de la energía solar, el proceso de desalinización suele presentar caídas grandes de producción en presencia de una nube.

Por ello, este diseño se encaminó a mitigar en lo posible los problemas identificados proponiendo un método de almacenamiento de energía térmica y transferencia indirecta de calor.

6.3. Configuración experimental

Para definir los criterios de operación sobre los cuales se espera que opere en pruebas el sistema, se realizó un análisis de datos de las variables climáticas propuestas. Los datos utilizados fueron obtenidos de *NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project* financiado por el Programa de Ciencias de la Tierra/Ciencias Aplicadas de la NASA usando el código mostrado en el apéndice C.

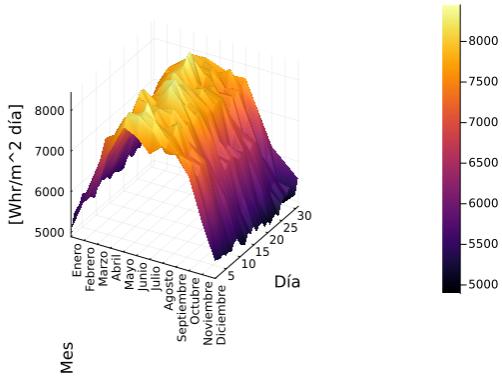
De dicho código se obtuvieron gráficas de área que nos representaban el comportamiento reportado por *The Power LaRC* en intervalos de cada hora.

6.3.1. Radiación solar de onda corta

En la fig. 6.1 observamos que de marzo a septiembre tenemos los niveles más altos de Radiación de onda corta y esta radiación se encuentra dentro de un rango de $5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ a $8 \text{ kWh m}^{-2} \text{ day}^{-1}$.

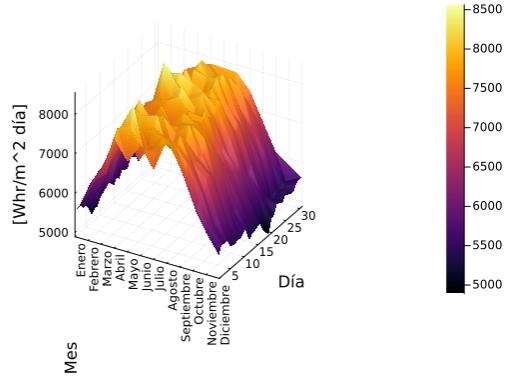
De las figs. 6.1e y 6.1f se observa que la irradiancia se de ROC de interés varía entre los 500 W m^{-2} a 900 W m^{-2} y se aprecia que en mayor proporción se encuentra entre 600 W m^{-2} a 700 W m^{-2} por lo que para los cálculos de operación se decide usar 650 W m^{-2} como valor de irradiancia.

ROC en condiciones de cielo despejado in 2020



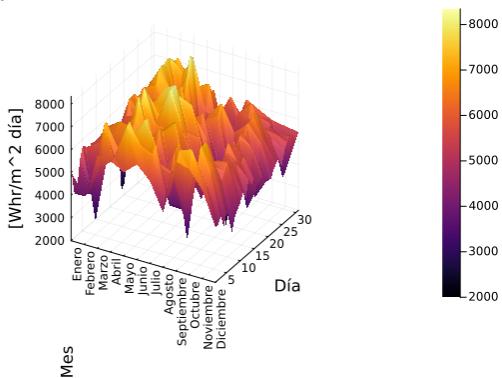
(a) Irradiación de onda corta total recibida por día en condiciones de cielo despejado durante el 2020 sobre el lugar seleccionado

ROC en condiciones de cielo despejado in 2021



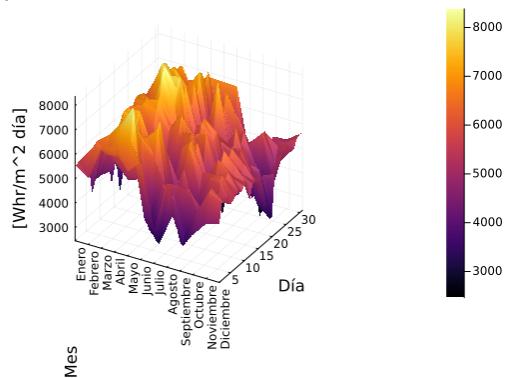
(b) Irradiación de onda corta total recibida por día en condiciones de cielo despejado durante el 2021 sobre el lugar seleccionado

ROC bajo todas las condiciones climáticas in 2020



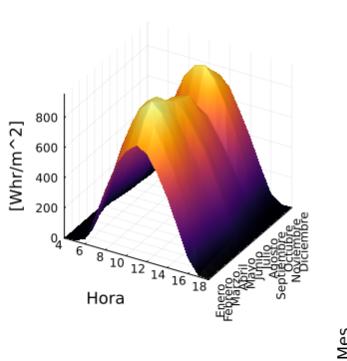
(c) Irradiación de onda corta total recibida por día bajo todas las condiciones climáticas durante el 2020 sobre el lugar seleccionado

ROC bajo todas las condiciones climáticas in 2021



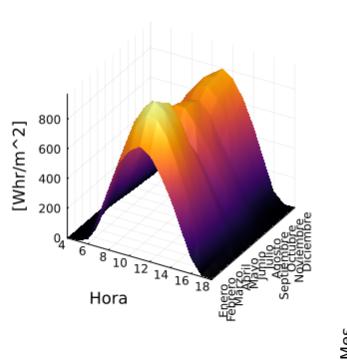
(d) Irradiación de onda corta total recibida por día bajo todas las condiciones climáticas durante el 2021 sobre el lugar seleccionado

ROC bajo todas las condiciones climáticas en 2020



(e) Irradiación de onda corta promedio recibida por hora bajo todas las condiciones climáticas durante el 2020 sobre el lugar seleccionado

ROC bajo todas las condiciones climáticas en 2021



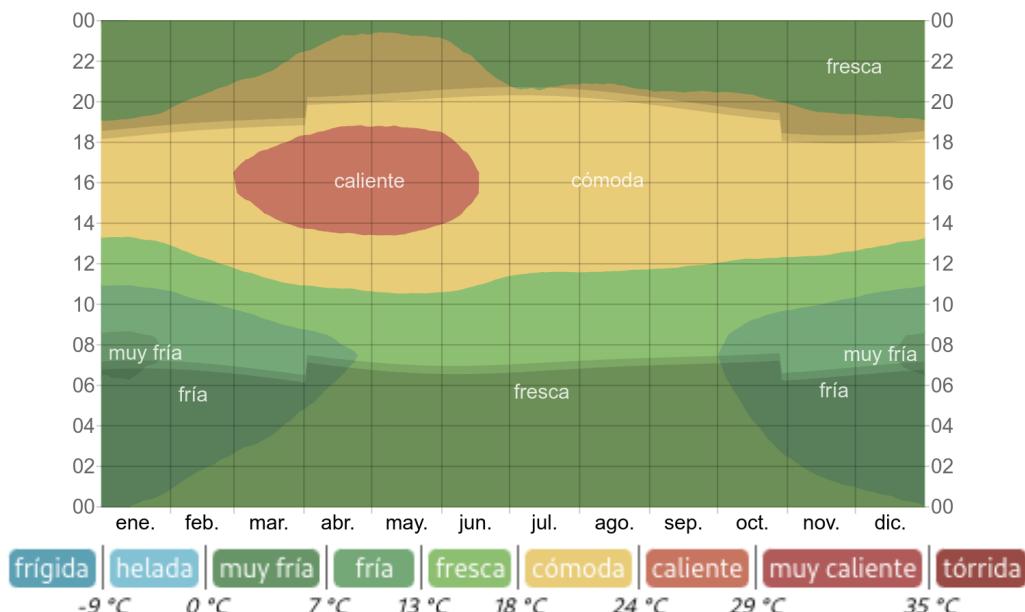
(f) Irradiación de onda corta promedio recibida por hora bajo todas las condiciones climáticas durante el 2021 sobre el lugar seleccionado

Figura 6.1: Irradiación de onda corta recibida en el lugar físico de experimentación durante 2020 y 2021

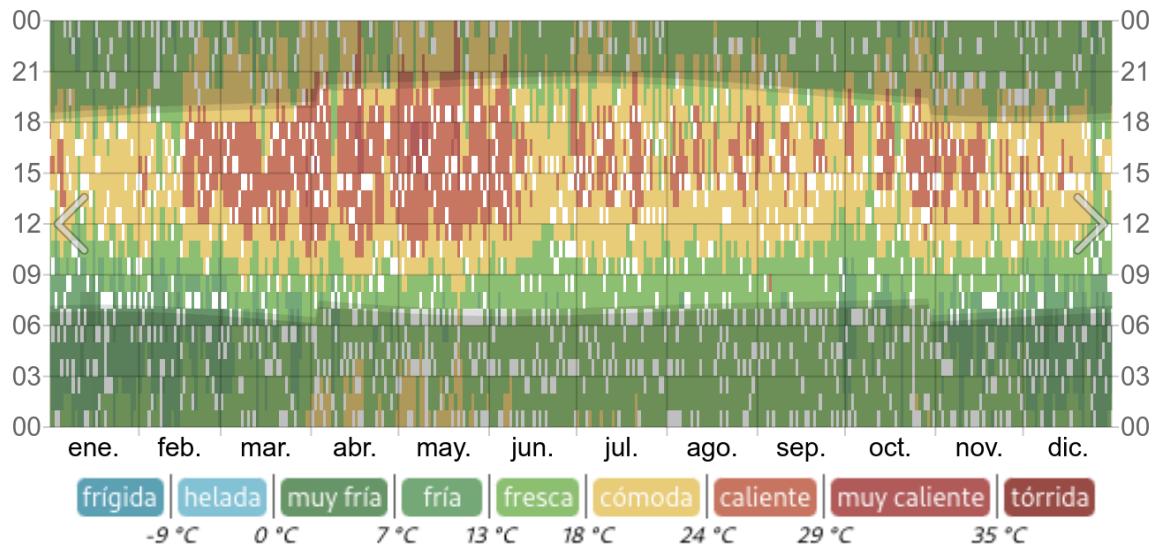
6.3.2. Temperatura

Debido a que no se pudo obtener una base de datos que proporcionara la temperatura en intervalos de una hora, se decidió usar el resumen presentado por WeatherSpark, el cual se puede observar en la fig. 6.2.

De la revisión de la fig. 6.2 se observa que la temperatura mínima durante los meses de mayor radiación solar se tiene una temperatura mínima de 13 °C y se define que la temperatura inicial del agua de entrada sería cercana a los 15.5 °C. Para condiciones de operación en horas más avanzadas, el agua de entrada se encontraría entre los 18 °C a 24 °C.



(a) Temperatura promedio por hora en Ciudad de México



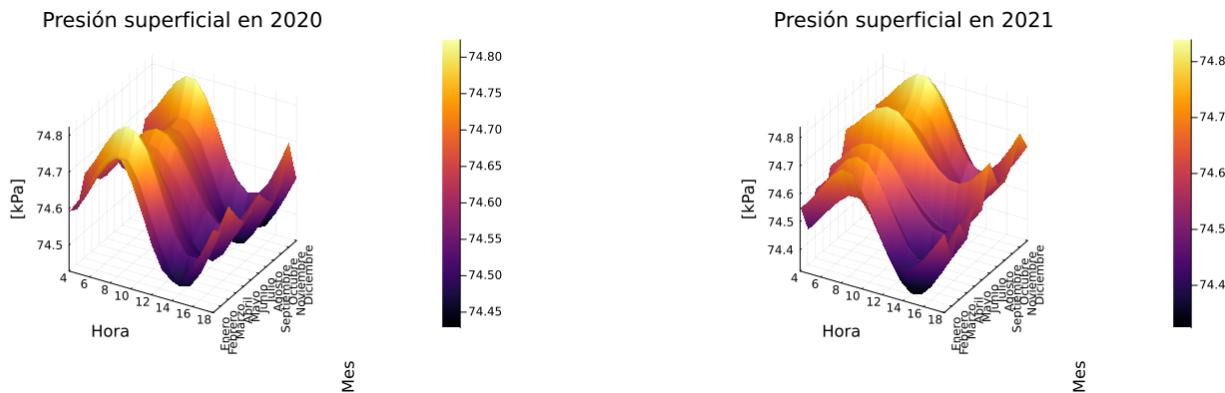
(b) Temperatura por hora del 2022 en la Ciudad de México

Figura 6.2: Mapas de temperaturas de la Ciudad de México

Los gráficos fueron obtenidos de [©WeatherSpark.com](https://www.weatherspark.com)

6.3.3. Presión atmosférica

En la fig. 6.3 se observa que la presión superficial varía muy poco, debido a ello sólo se tomará el valor redondeado de 74.80 kPa para cálculos posteriores.



(a) Presión promedio por hora del viento durante 2020 sobre el lugar seleccionado

(b) Presión promedio por hora del viento durante 2021 sobre el lugar seleccionado

Figura 6.3: Presión promedio en el lugar físico de experimentación durante 2020 y 2021

6.3.4. Magnitud del perfil de velocidad del viento

Debido a las pérdidas térmicas esperadas por convección forzada se estudió este criterio, sin embargo, como se observa en la fig. 6.4 no se distingue visiblemente un patrón en el comportamiento. Se decidió

usar un valor promedio de 1.5 m s^{-1} .

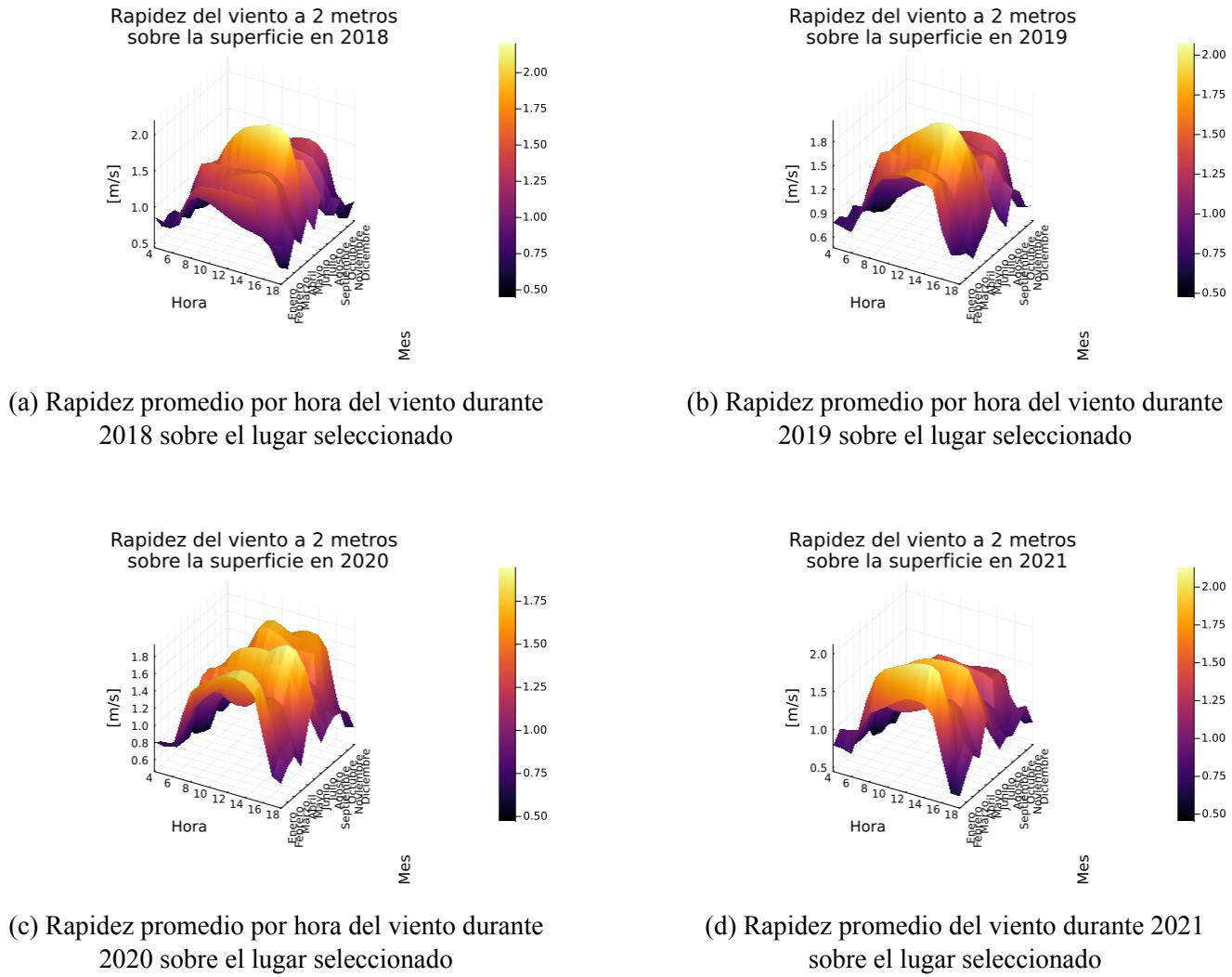


Figura 6.4: Rapidez promedio por hora del viento sobre el lugar seleccionado

6.3.5. Definición de valores esperados de la configuración experimental

Usando los límites de operación encontrados del análisis de datos se calcula mediante (6.1) y los datos de los apéndices A y B la temperatura de ebullición del agua de mar en el sitio de experimentación y a la cual se le agrega un 2% de tolerancia.

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \times (x - x_0) \quad (6.1)$$

Tabla 6.5: Datos a interpolar para definir los parámetros de salida del agua

| | <i>y</i> | <i>x</i> |
|---------------------|----------|-----------|
| 0 | 90 °C | 70.14 kPa |
| 1 | 95 °C | 80.55 kPa |
| T _{salida} | | 74.80 kPa |

$$T_{ebullición\ agua\ dulce} = 90\text{ }^{\circ}\text{C} + \frac{95\text{ }^{\circ}\text{C} - 90\text{ }^{\circ}\text{C}}{80.55\text{ kPa} - 70.14\text{ kPa}} \times (74.80\text{ kPa} - 70.14\text{ kPa})$$

$$T_{salida} = (T_{ebullición\ agua\ dulce} + 0.601\text{ }^{\circ}\text{C}) + \text{Tolerancia}$$

$$T_{salida} = (92.238\text{ }^{\circ}\text{C} + 0.601\text{ }^{\circ}\text{C}) \times (1.02)$$

$$T_{salida} \approx 94.70\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Y considerando una temperatura de entrada del agua igual al inicio de sus operaciones de 15.5 °C tenemos calculamos mediante (6.2) el flujo de calor necesario por unidad de flujo másico que se necesita para lograr la ebullición del agua y el cambio de fase.

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = (C_{sagua}\Delta T + h_l) \quad (6.2)$$

Para conocer C_{sagua} de la tabla A.4 se usa (6.1) para obtener el calor específico estimado a los 13 °C y a los 94.7 °C.

$$C_{s13} = 3968.1\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1} + \frac{3973.4\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1} - 3968.1\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}}{20\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ }^{\circ}\text{C}} \times (20\text{ }^{\circ}\text{C} - 13\text{ }^{\circ}\text{C})$$

$$C_{s13} = 3971.8\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$$

$$C_{s94.7} = 4010.5\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1} + \frac{4019.9\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1} - 4010.5\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}}{100\text{ }^{\circ}\text{C} - 90\text{ }^{\circ}\text{C}} \times (100\text{ }^{\circ}\text{C} - 94.7\text{ }^{\circ}\text{C})$$

$$C_{s94.7} = 4015.5\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$$

Una vez obtenidos sacamos el promedio incluyendo el resto del intervalo dandonos que:

$$C_{sagua} = 3989.5\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$$

Similarmente para obtener h_l aplicamos (6.1) en tabla A.3 para obtener la entalpía de vaporización a los 94.7 °C.

$$h_l = 2191.3\text{ kJ kg}^{-1} + \frac{2166.2\text{ kJ kg}^{-1} - 2191.3\text{ kJ kg}^{-1}}{100\text{ }^{\circ}\text{C} - 90\text{ }^{\circ}\text{C}} \times (100\text{ }^{\circ}\text{C} - 94.7\text{ }^{\circ}\text{C})$$

$$h_l = 2178.0\text{ kJ kg}^{-1}$$

Sustituyendo en (6.2) obtenemos que el flujo de calor necesario por unidad de flujo máscico es:

$$\dot{Q} = \dot{m} [3.9895 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} (94.7^\circ\text{C} - 15.5^\circ\text{C}) + 2178.0 \text{ kJ kg}^{-1}] = \dot{m} \times 2493.97 \text{ kJ kg}^{-1} \quad (6.3)$$

6.4. Planteamiento de la solución

6.4.1. Selección y caracterización del elemento óptico de concentración

Para este proyecto son accesibles 4 modelos de lentes de Fresnel con ranuras hacia adentro cuyas características se ven resumidas en la tabla 6.6.

Tabla 6.6: Modelos y características de los concentradores solares

| Modelo | Longitud focal mm | Ancho mm | Largo mm | Material | Grosor mm | Tamaño de ranura mm |
|-----------|----------------------|-------------|-------------|-----------------|--------------|------------------------|
| — | mm | mm | mm | — | mm | mm |
| CP220-280 | 220 | 280 | 280 | PMMA: PV UV cut | 5 | 0.5 |
| CP330-280 | 330 | 280 | 280 | PMMA: PV UV cut | 5 | 0.5 |
| CP350-300 | 350 | 310 | 310 | PMMA: PV UV cut | 5 | 0.5 |
| CP350-330 | 350 | 340 | 340 | PMMA: PV UV cut | 5 | 0.5 |

Se halla en su hoja técnica que el PMMA PV UV cut tiene una transmitancia igual a 92.65 % .

Para seleccionar la lente se tomaron como criterios el área de la lente y el número F (F) dado por (6.4), ya que entre mayor sea F , será mayor la capacidad de concentración y será mejor la capacidad de recolección de la lente.

$$F = \frac{f_l}{2R_l} \quad (6.4)$$

Conociendo eso, se determina que el modelo a usar es la lente de Fresnel condensadora **CP350-300** con un F equivalente a 1.129.

A continuación se enlistan algunas propiedades importantes del material seleccionado [50] citado por [42].

- Índice de refracción: $n_d = 1.4918$
- Número de Abbe: $V_d = 54.7$
- Coeficiente de temperatura: $dn/dT \text{K}^{-1} = -105 \times 10^{-6}$

6.4.1.1. Ángulos para el trazado de rayos

Conociendo esto se calculan los ángulos α , ω y β necesarios para el cálculo en el trazado de rayos usando (6.5) a (6.7). Donde α es la inclinación del prisma y β es el ángulo del prisma.

$$\tan \alpha = \frac{R}{n_d \sqrt{R^2 + f^2} - f} \quad (6.5)$$

$$\tan \omega = \frac{R}{f} \quad (6.6)$$

$$\tan \beta = \alpha + \omega \quad (6.7)$$

Lo que nos da: $\alpha = 34.361^\circ$, $\omega = 22.989^\circ$, $\beta = 57.350^\circ$

Finalmente se describen las ecuaciones que se usan para modelar el trazado de rayos.

$$\phi_1 = \beta - \alpha - \theta_{\text{entrada}} \quad (6.8)$$

$$\phi_{1'} = \arcsin \left(\frac{\sin \phi_1}{n_{d'}} \right) \quad (6.9)$$

$$\phi_t = \beta - \alpha - \phi_{1'} \quad (6.10)$$

$$\phi_{2'} = \phi_t + \alpha \quad (6.11)$$

$$\phi_2 = \arcsin \sin \phi_{2'} / n_d \quad (6.12)$$

$$\theta_{\text{salida}} = \phi_2 - \alpha \quad (6.13)$$

6.4.1.2. Pérdidas por transmisión

Usando como referencia la fig. 6.5 vemos que el elemento de concentración tiene una eficiencia de transmisión aproximada de 83 %. Además se propone el uso de cuarzo el cual tiene una eficiencia de transmisión de 99.9 % como “ventana” en la cámara del receptor solar, asumiendo que el aire es un medio con $n_{\text{daire}} = 1$ y $\tau_{\text{aire}} = 1$, la transmisión total calculada del sistema esta dada por (6.14) mientras que la transmisión ideal esta dada por (6.15).

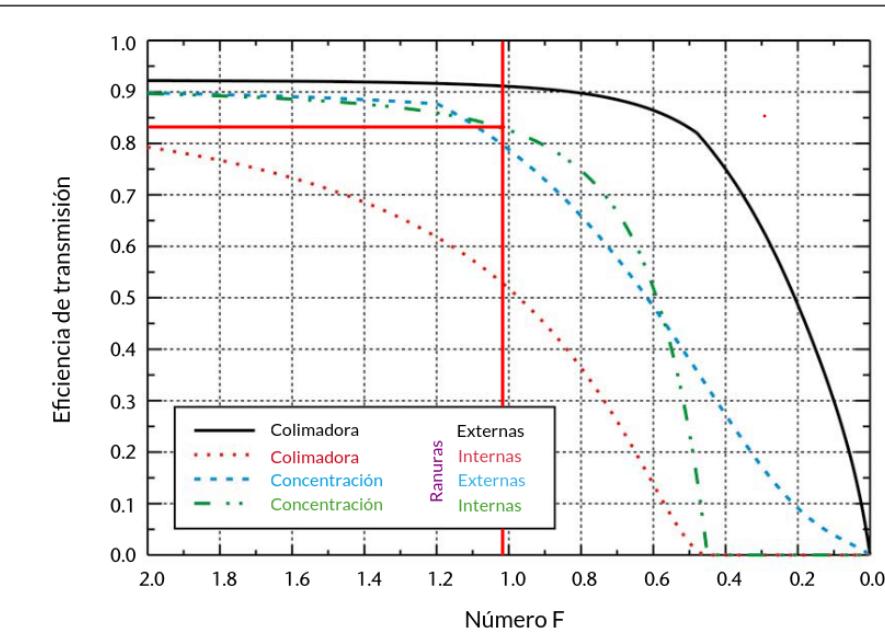


Figura 6.5: Valores de eficiencia idealizados de lentes de Fresnel calculadas en la reflexión de las superficies y otras pérdidas comunes.

Imagen adaptada de [51]

$$\tau = \tau_{\text{lente}} \tau_{\text{cuarzo}} = 82.92 \% \quad (6.14)$$

$$\tau = \tau_{\text{lente-ideal}} \tau_{\text{cuarzo}} = 92.56 \% \quad (6.15)$$

6.4.1.3. Radiación efectiva

La radiación que podría concentrar efectivamente esta lente de Fresnel sobre el receptor solar se describe mediante (6.16); usando las asunciones generales propuestas se obtiene una radiación de 51.80 W.

$$\dot{Q}_{\text{absorbedor}} = I_{\text{Sol}} \tau A_{\text{Fresnel}} \quad (6.16)$$

6.4.2. Diseño de la cámara de concentración solar

6.4.2.1. Receptor solar

Para el receptor solar se comparó (tabla 6.7) la propuesta de dos materiales típicamente usados para la fabricación de receptores solares.

Tabla 6.7: Comparativa hallada entre los materiales propuestos para fungir como recibidor solar

| Propiedad | Unidades | Cobre | Carburo de Silicio |
|---------------------------------|---------------------------------|--|--|
| Conductividad térmica | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | 387.0 a 430.0 | 120 a 130 |
| Coficiente de expansión térmica | $^{\circ}\text{C}^{-1}$ | 16.5×10^{-6} | 4×10^{-6} |
| Densidad | kg m^{-3} | 8620 | 3210 |
| Resistencia a la corrosión | — | Menor | Mayor |
| Costo | MXN | Menor | Mayor |
| Accesibilidad | — | Mayor | Menor |
| Propiedades ópticas | — | Alta reflectividad de luz en el espectro visible | Se puede manufacturar para tener buena absorbtividad |

A pesar de que el cobre tiene una alta reflectividad en el espectro de interés, se decide el uso de este material debido a sus ventajas de accesibilidad y costos. Para solventar el inconveniente descrito, se aplicó un recubrimiento que potencia sus características como recibidor solar usando el principio de selectividad espectral.

Al inicio se consideró que el recubrimiento de óxido negro sería una opción adecuada ya que de acuerdo al resultado reportado en [52], alcanza valores de absorbtividad para el espectro solar en el rango de 0.78 a 0.86 y de emisividad de 0.04 a 0.08 convirtiéndose así en un candidato fuerte.

Este recubrimiento resulta favorable en términos de rendimiento, duración y preservación de propiedades del cobre; a pesar de ello, se decidió usar pintura de alta temperatura negra de uso industrial debido a varias ventajas halladas, entre ellas, la accesibilidad, costo y facilidad de uso sin mencionar que de acuerdo a [53] donde se comparan diferentes pinturas para su aplicación en colectores solares, la absorbtividad aplicada sobre cobre resulta de un 95 % superando al óxido negro.

Se define entonces la temperatura máxima de forma ideal que podría alcanzar el concentrador solar considerando en función (5.5).

$$T_{\text{recibidor}} = \frac{\alpha_{\text{Solar}} I_{\text{Sol}}}{\epsilon_{\text{IR}} \sigma_{\text{SB}}} \times C_{\text{área}} \quad (6.17)$$

6.4.2.2. Almacenamiento térmico de calor

Como se ha resaltado a lo largo del texto, el sol es una fuente intermitente de energía, por lo que se propone un mecanismo de almacenamiento térmico de calor empleando arena de sílice de alta pureza la cual es una arena compuesta mayormente por SiO_2 . Las propiedades más relevantes encontradas en [54] y [55] y por las que se decidió por este material se enumeran a continuación.

- **Excelente estabilidad térmica:** Se habla que la arena de sílice de cuarzo- α es estable hasta los 573°C donde sufre solamente una alteración de los ángulos en las uniones de la red cristalina para

transformarse en cuarzo- β . Esta transformación es rápidamente reversible y no involucra ningún rompimiento de enlaces.

- **Alta capacidad calorífica:** En el estudio se observó que de temperatura ambiente hasta los 1200 °C presenta una capacidad calorífica de $750 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a $1200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- **Conductividad térmica adecuada:** Gracias a que su conductividad no es demasiado alta ni demasiado baja ($7.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a $13.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) no representa un problema hablando de pérdidas de calor.
- **Coeficiente de expansión térmica:** Posee un coeficiente de expansión térmica linear igual a $14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.
- **Densidad:** 2.65 g cm^{-3}
- **Humedad:** Aproximadamente 0.1 %

6.4.2.3. Aislamiento térmico

Se realizó una investigación previa sobre los materiales candidatos como aislantes térmicos de los cuales se determinó que los siguientes materiales son potenciales candidatos: aereogel, fibra de sílice, fibra cerámica.

Tabla 6.8: Propiedades de los materiales aislantes térmicos

| Parámetro | Unidades | Aereogel | Fibra de vidrio | Fibra cerámica |
|------------------------------|----------------------------------|-------------|-----------------|----------------|
| Coeficiente de conductividad | $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | 0.02 a 0.05 | 0.034 a 0.044 | 0.06 a 0.07 |
| Rango de operación | °C | -200 a 1000 | -200 a 700 | Hasta 1427 |
| Ignífugo | — | Sí | Sí | Sí |
| Hidrófobo | — | Sí | No | Sí |

Como se observa, el aereogel y la fibra cerámica son excelentes candidatos, la decisión de usar aereogel fue tomada debido a su mínima densidad y a que es un material que se tiene disponible en el Departamento de Posgrado de Sistemas Dinámicos de la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas.

6.4.2.4. General

En un inicio se contempló el uso de poliaftalamida para las paredes del desalinizador ya que es un termoplástico resistente a factores climáticos adversos durante largo tiempo e ideal para ser usado en exteriores además de tener baja absorción de humedad. En la tabla 6.9 se listan propiedades que se consideran importantes para el diseño.

Tabla 6.9: Propiedades de la poliaftalamida

| Parámetro | Unidad | Valor |
|----------------------------------|--------------------|-----------|
| Densidad | g cm ⁻³ | 1.2 a 1.4 |
| Temperatura de transición vítreo | °C | 127 a 140 |
| Temperatura de fusión | °C | 278 a 285 |

A pesar de tener buenas cualidades para este diseño, se encontraron limitaciones en la disponibilidad y accesibilidad, por lo que se sustituyó con Nylamid M, el cual es un plástico ingenieril que posee propiedades de interés, tales como: buena resistencia mecánica, buena resistencia térmica, baja disipación de calor y la cualidad de ser de grado alimenticio.

6.4.3. Definición de la alimentación

6.4.3.1. Definición del caudal

Se definirá el caudal suponiendo una transmisión perfecta y directa al agua usando el valor de $\dot{Q}_{\text{absorbedor}}$ en (6.3).

$$\dot{m} = \frac{51.80 \text{ W} \times \alpha_{\text{recibidor}}}{2493.97 \text{ kJ kg}^{-1}} \quad \dot{m} = \frac{49.21 \text{ W}}{2493.97 \text{ kJ kg}^{-1}} \quad \dot{m} = 0.0197 \text{ g s}^{-1}$$

Se observa que el caudal (1.18 mL min^{-1}) es bastante pequeño y sabiendo que la mayor parte del calor se iría en el cambio de fase, se considera que la ebullición no es el medio más adecuado para desalinizar el agua y se puede considerar que combinar los mecanismos de ebullición y evaporación tendrán un efecto sinérgico en la productividad del sistema.

Entonces se redefine el flujo másico necesario como (6.18) dando un caudal de 9.12 mL min^{-1}

$$\dot{m} = \frac{49.21 \text{ W}}{\left[3.9895 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} (94.7^\circ\text{C} - 15.5^\circ\text{C}) \right]} = 0.156 \text{ g s}^{-1} \quad (6.18)$$

6.4.4. Materiales

6.4.4.1. Componentes

Se consideró de acuerdo al caudal que el uso de una bomba peristáltica sería la opción adecuada ya que permiten trabajar con fluidos altamente agresivos al no tener contacto directo con el fluido además de

proporcionar caudales generalmente bajos. En la tabla 6.10 se describe el modelo seleccionado tras una exhaustiva revisión de los modelos disponibles.

*Después de la calibración (específicamente para la bomba adquirida). Veáse sección 7.2.1

Tabla 6.10: Propiedades de la bomba peristáltica EZO-PMP

| EZO-PMP | | |
|--------------------------|----------------------|-----------------|
| Parámetro | Unidad | Valor |
| Alimentación motor | V | 12 a 24 |
| Alimentación controlador | V | 3.3 a 5 |
| Caudal mínimo | mL min^{-1} | 0.5 |
| Caudal máximo | mL min^{-1} | 54* |
| Precisión de flujo | % | ± 1 |
| Altura de bombeo | m | 8.1 |
| Tamaño | mm | 37.5 x 48 x 112 |
| Precio aproximado | USD | 84.99 |
| Grado alimenticio | | Sí |

Para la extracción de vapor se considera adecuado el uso de mini ventiladores con protección IP. Los detalles del modelo propuesto se encuentran en la tabla 6.11.

Tabla 6.11: Propiedades del extractor

| UF3H3-500B | | |
|--------------------------|----------------------|-------------|
| Parámetro | Unidad | Valor |
| Alimentación | V | 2 a 3.5 |
| Potencia | W | 0.29 |
| Temperatura de operación | °C | -10 a 70 |
| Caudal | mL min^{-1} | 16 000 |
| RPM | rpm | 17000 |
| Tamaño | mm | 17 x 17 x 3 |
| Masa | g | 1.36 |
| Protección IP | — | IP58 |
| Precio aproximado | USD | 24.21 |

Para la conexión entre las diferentes partes, se encontró que las magueras de polietileno son la opción más adecuada debido a sus propiedades de flexibilidad, rigidez, temperatura de funcionamiento y costo.

6.4.4.2. Sensores

Debido a la naturaleza altamente corrosiva de los fluidos con los que se está trabajando y pensando en la vida útil de los componentes así como en su ensamble, se seleccionaron dos modelos de sensores de temperatura.

Para la parte que interactua directamente con el agua se seleccionó el termistor “USP10981 Thermistor Probe” ya que presenta dos ventajas: posee una carcasa de acero inoxidable y se puede montar mediante una rosca NPT de $\frac{1}{8}$ ”. Sin embargo, debido a su tamaño, costo y rango de temperatura, no resulta viable para monitorear la temperatura que alcanza el recibidor solar. Para ello se utilizó un termopar tipo K comercial con roscado de 6mm.

Capítulo 7

Resultados

El presente capítulo expone los resultados obtenidos tras el desarrollo del sistema de desalinización propuesto. Los resultados se organizan para proporcionar una visión integral del diseño y funcionamiento del sistema. Para lograr este cometido, se presenta de manera coherente de acuerdo al proceso seguido para obtener estos resultados.

En primer lugar, se muestra la vista general del funcionamiento del sistema para comprender la interacción entre los componentes del desalinizador. A continuación, se entra en detalle con el diseño propuesto y se validan los componentes a través de simulaciones de transferencia de calor que sustentarán al modelo de control difuso que regula la alimentación del sistema.

7.1. Comportamiento e interacciones del desalinizador propuesto

Como se ha mencionado anteriormente, esta propuesta está encaminada a sortear los problemas identificados en la destilación solar. Para ello, se separa la evaporación del agua del calentamiento. En la fig. 7.1 se observa que la interacción entre el recibidor solar y el mecanismos de evaporación es independiente.

Gracias a este esquema se logra evitar la interferencia del vapor de agua a la superficie de calentamiento. Para validar este modelo, se usó Autodesk Inventor para la parte del diseño del sistema y Autodesk CFD para el modelado de la transferencia de calor y el flujo de aire.

7.1.1. Principio de funcionamiento

El desalinizador se diseñó buscando aprovechar en la medida de lo posible el calor generado por el concentrador solar, a su vez, se buscó promover la evaporación evitando volúmenes grandes de agua.

El desalinizador inicia su operación con un volumen de agua salada a temperatura ambiente, mediante una bomba con la capacidad de regular su caudal, una vez se alcanzan ciertas condiciones, se bombea agua hacia una tubería que se calienta mediante el recibidor solar. Una vez caliente el agua se dirige hacia una cámara donde se evapora el agua. Para favorecer este fenómeno se mantiene un volumen de agua bajo mientras que un ventilador redirige el vapor generado a una segunda cámara. El flujo de aire creado por el ventilador permite desalojar el aire saturado y renovarlo con aire más seco.

El agua caliente excedente se vuelve a inyectar al inicio del ciclo mientras que el vapor generado es condensado mediante un intercambiador de calor que a su vez transmite ese calor al agua entrante.

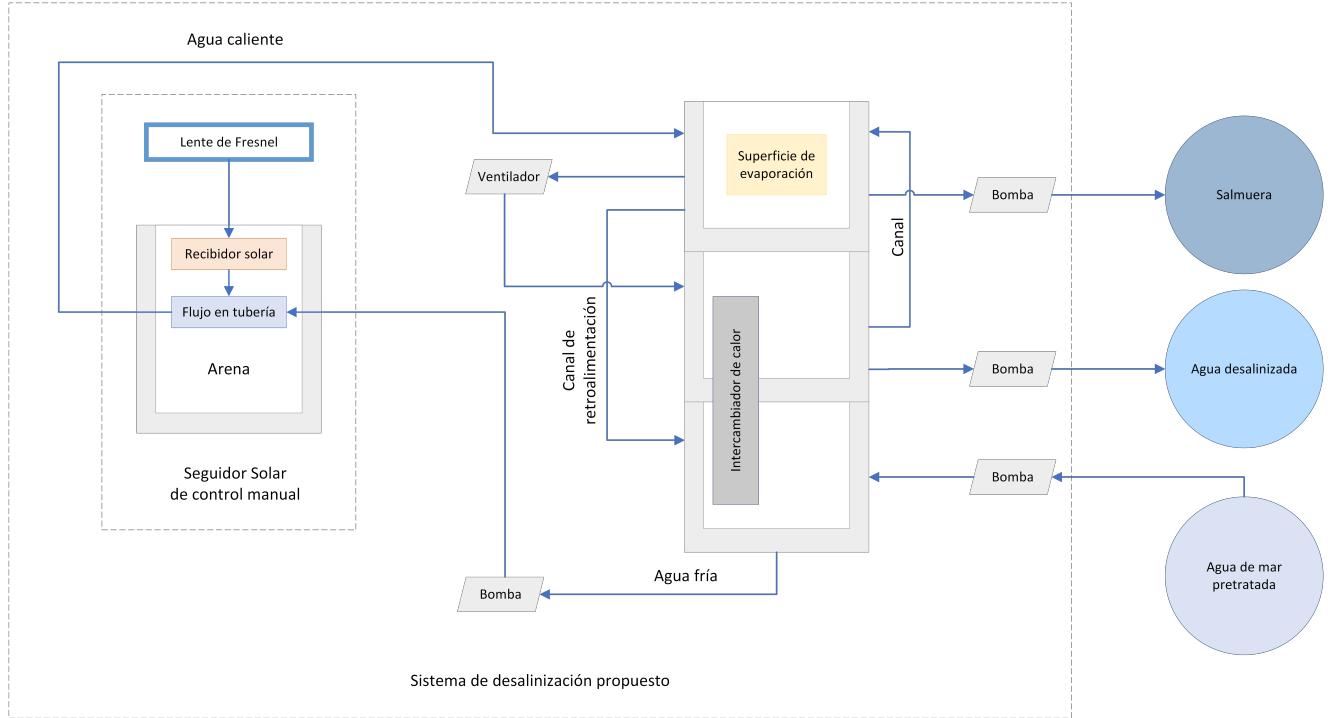


Figura 7.1: Vista general del proceso de desalinización

7.1.2. Componentes y módulos del desalinizador

Tras varias propuestas se llegó a un diseño modular vertical. En la fig. 7.2 se puede observar el primer módulo llamado “Módulo de reaprovechamiento térmico y bombeo” el cual se diseñó para aprovechar el calor del vapor generado tras pasar por el “Módulo de concentración solar” (fig. 7.3) el cual se integra a un seguidor solar para calentar el agua indirectamente por medio de la lente de Fresnel.

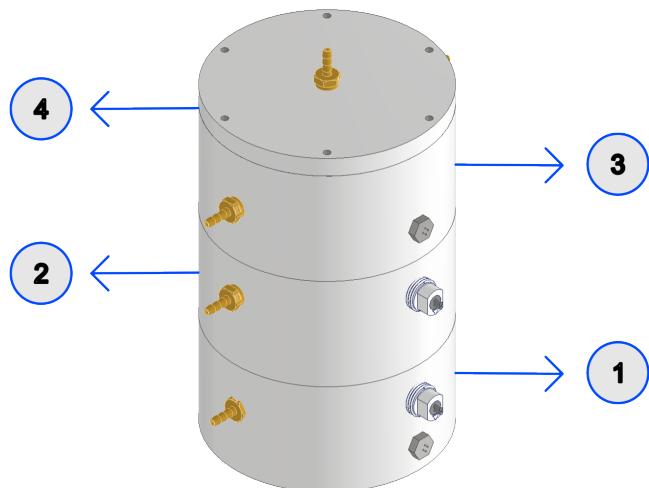


Figura 7.2: Propuesta del sistema desalinizador. Módulo de reaprovechamiento térmico y bombeo.

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. Contenedor de agua de mar | 3. Cámara de evaporación |
| 2. Contenedor de agua destilada | 4. Tapa |

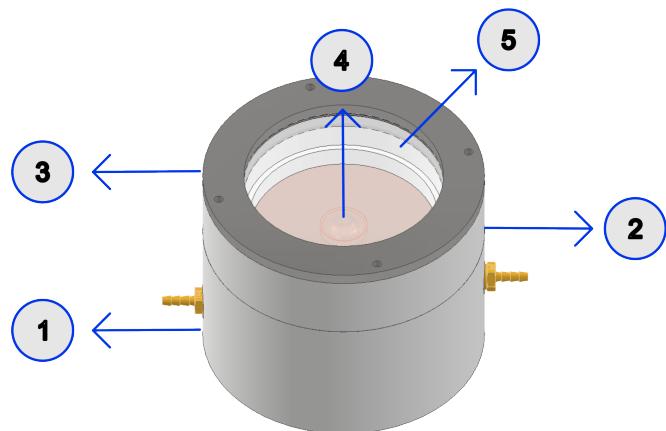


Figura 7.3: Propuesta del sistema desalinizador. Módulo de concentración solar.

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------|
| 1. Cámara de transferencia de calor | 4. Recibidor solar |
| 2. Soporte de lente | 5. Cristal de borosilicato |
| 3. Tapa | |

En los siguientes apartados se detallan los elementos que componen a este sistema y las funciones que desempeñan.

7.1.2.1. Contenedor de agua de mar

Su función básica es contener el agua a desalinizar y servir al mismo tiempo como fuente de frío para la condensación del vapor.

El contenedor de agua de mar consta de 2 entradas y 1 salida.

- Entrada de agua de mar
- Entrada del excedente de agua caliente
- Salida hacia el calentador solar

En este módulo se monitorea la temperatura y el nivel del agua.

7.1.2.2. Contenedor de agua destilada

Su función básica es promover la condensación del vapor y favorecer el aumento de la temperatura del agua de entrada usando un intercambiador de calor entre la misma cámara y el contenedor de agua de mar.

Este submódulo consta de 1 entrada y 2 salidas.

- Entrada de vapor caliente
- Salida para regular la presión entre cámaras
- Salida de agua destilada

En este módulo se monitorea el nivel del agua.

7.1.2.3. Cámara de evaporación

Su función básica es favorecer el proceso de evaporación aumentando el área superficial por unidad de volumen. Para incrementar la evaporación efectiva se acopló un ventilador que permite desalojar el aire saturado además de promover el flujo del aire.

En una segunda revisión se formuló la posibilidad de agregar elementos que permitieran aumentar el área de contacto del agua con el aire debido a que en realidad se trata de un espacio reducido, por lo que se propone el diseño visto en la fig. 7.4

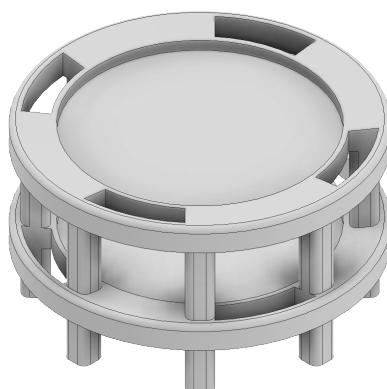


Figura 7.4: Diseño sugerido para aumentar el área de evaporación dentro de la cámara

Este submódulo consta de 2 entradas y 2 salidas.

- Entrada de agua caliente
- Entrada de aire de recirculación
- Salida de vapor caliente
- Salida de salmuera

En este módulo se monitorea la temperatura del agua.

7.1.2.4. Módulo de concentración solar

Este módulo se divide en dos partes por cuestiones de ensamble y manufactura. La parte superior se encarga de soportar un cristal de borosilicato por el cual atraviesan los rayos solares. Este cristal nos permite mantener un mejor aislamiento térmico del receptor solar así como evitar la exposición directa al ambiente.

Por otra parte, en el submódulo inferior ocurre el intercambio de calor entre el receptor solar y el agua. Esto se logra por medio de la conducción de calor entre el receptor y una tubería de cobre. La elección de la tubería de cobre se dio debido a su alta conductividad térmica, flexibilidad, disponibilidad y costos, ya que en un inicio se planteó el uso de acero galvanizado y de acero inoxidable 316, sin embargo, como se mostrará en las simulaciones siguientes no resultaba buen conductor térmico además de ser difícilmente manufacturable; también se descartó el uso de tuberías de aluminio 5052 debido a su escasa disponibilidad.

Este submódulo consta de 1 entrada y 1 salida.

- Entrada de agua fría
- Salida de agua caliente

En este módulo se monitorea la temperatura del receptor solar.

7.1.3. Simulaciones del sistema desalinizador

Se realizaron varias simulaciones de transferencia de calor con el fin de validar los diseños propuestos, los materiales seleccionados y el caudal propuesto durante el desarrollo experimental. A su vez, se realizaron simulaciones del flujo de aire en la cámara de evaporación con el fin de validar el diseño visto en la fig. 7.4.

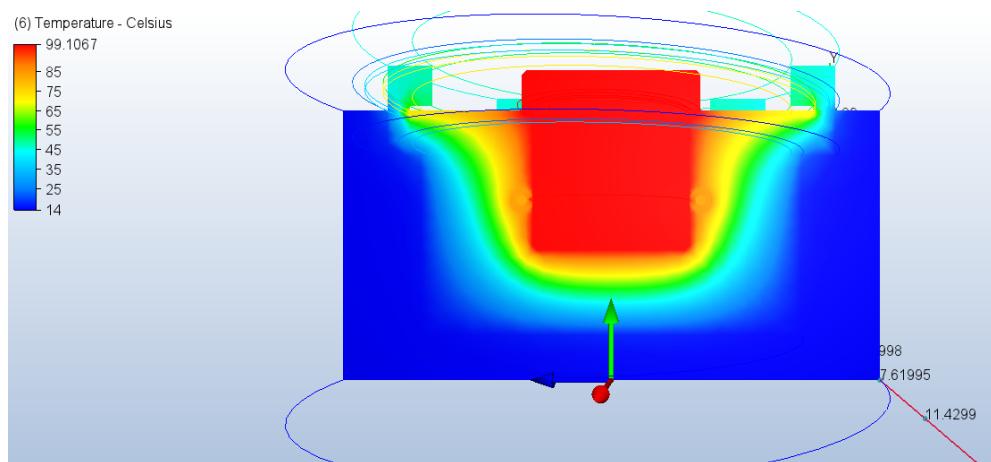
7.1.3.1. Materiales y geometría

Transferencia de calor

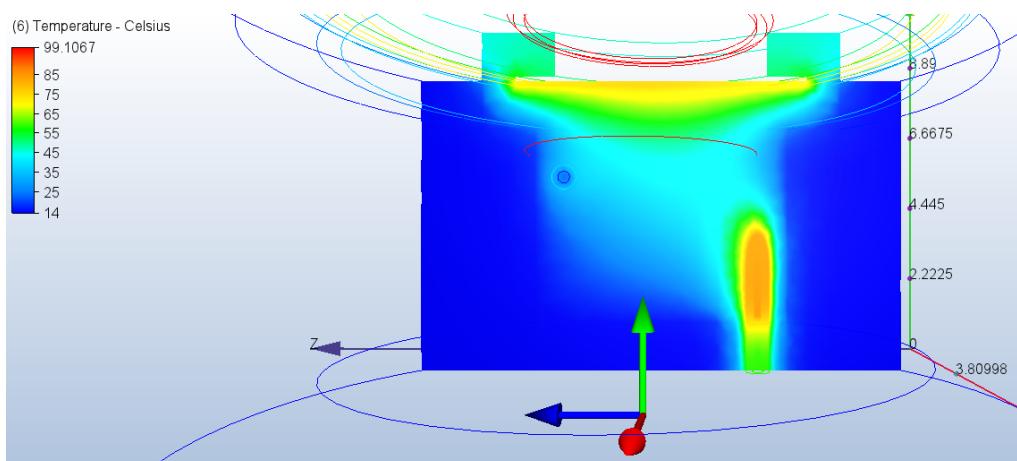
Con el fin de observar el desempeño de los materiales a utilizar para intercambiar calor con el receptor solar, se simuló transferencia de calor con cobre, aluminio y acero inoxidable bajo condiciones favorables (Alta generación de calor). De estas simulaciones se concluyó que:

1. El acero inoxidable no proporciona una conducción suficiente de calor, ya que el receptor empieza a sobrecalentarse mientras que el agua no adquiere la temperatura suficiente. Si se observa detenidamente la fig. 7.5 se observa que el agua se calienta cuando está más cerca del receptor, sin embargo, el calor no llega a toda la tubería, por lo que esta se vuelve a enfriar una vez que se aleja del receptor. Además, el receptor comienza a sobrecalentarse al no deshacerse del calor, transfiriéndolo a los aislantes térmicos y los alrededores del receptor.

2. El cobre es un buen candidato, ya que la tubería se calienta uniforme y rápidamente, además, el agua adquiere una temperatura poco menor que la del recipidor.
3. El aluminio 5052 es un buen candidato, ya que la tubería se calienta rápidamente, sin embargo, incrementa la diferencia entre la temperatura del agua y la del recipidor en contraste con el cobre, sin mencionar que el agua se calienta de manera menos uniforme.

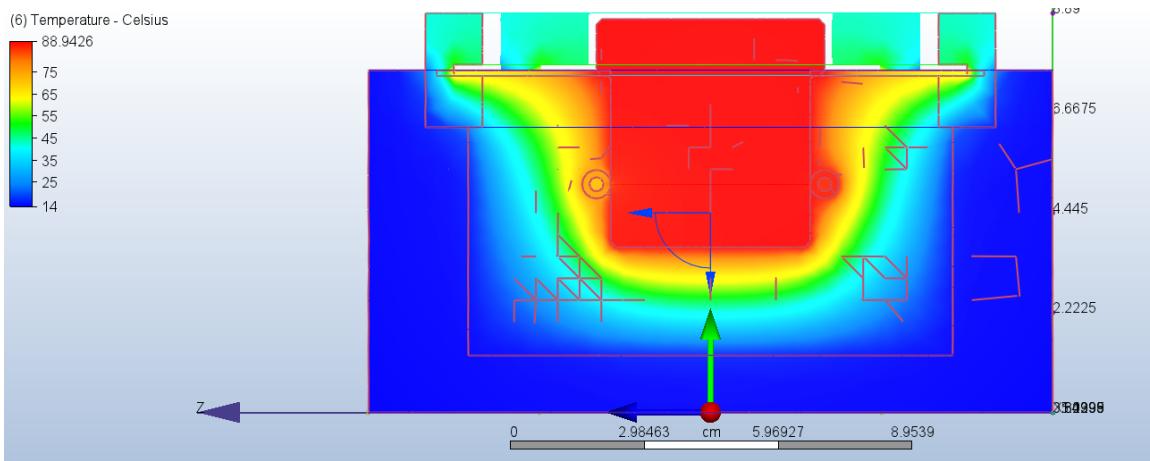


(a) Corte en el centro del recipidor solar y su transferencia de calor hacia el acero inoxidable 316

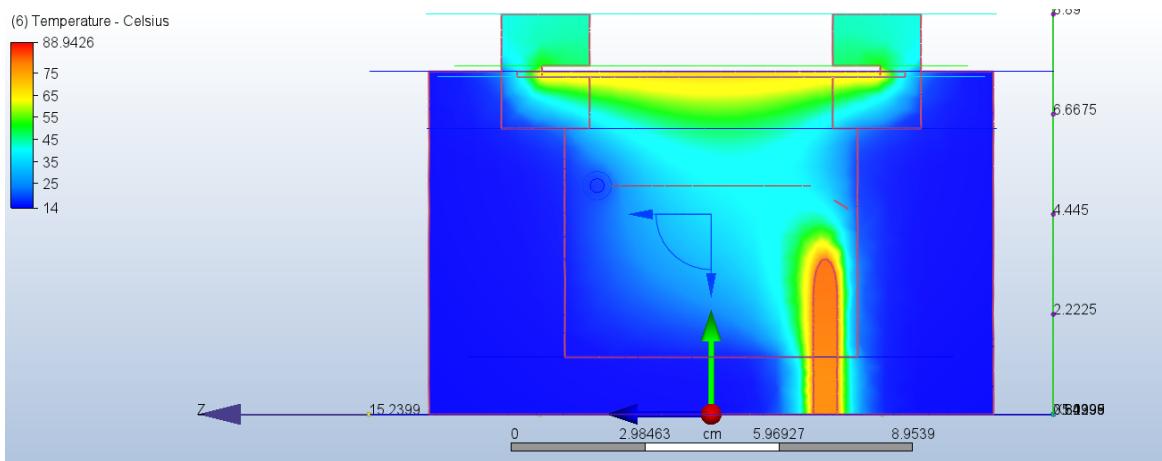


(b) Corte en la entrada y salida del agua de mar

Figura 7.5: Transferencia de calor en el acero inoxidable

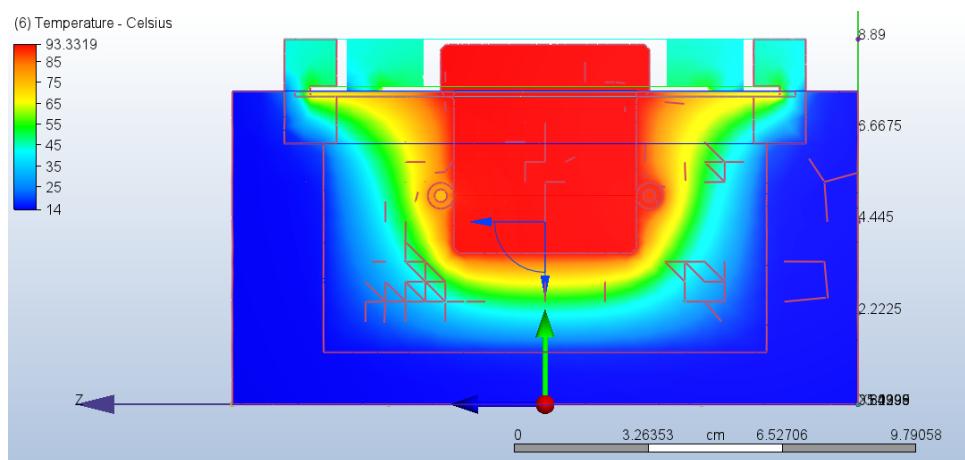


(a) Corte en el centro del receptor solar y su transferencia de calor hacia el cobre

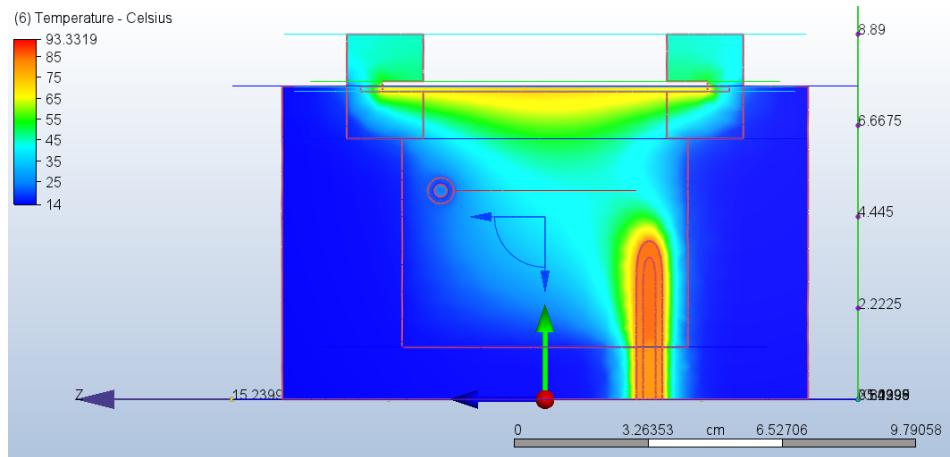


(b) Corte en la entrada y salida del agua de mar

Figura 7.6: Transferencia de calor en el cobre



(a) Corte en el centro del receptor solar y su transferencia de calor hacia el aluminio



(b) Corte en la entrada y salida del agua de mar

Figura 7.7: Transferencia de calor en el aluminio

Se simularon 300 segundos de transferencia de calor de los tres materiales bajo las condiciones halladas en el desarrollo experimental en lugar de buscar la convergencia, ya que esto requeriría un tiempo mucho mayor y observando el comportamiento de la temperatura del receptor se concluyó que la información proporcionada fue suficiente para llegar a una conjectura.

De las simulaciones se observó que la temperatura del receptor solar crecía más rápidamente que la temperatura del agua de salida; en cambio, el cobre y el aluminio tuvieron mejores respuestas.

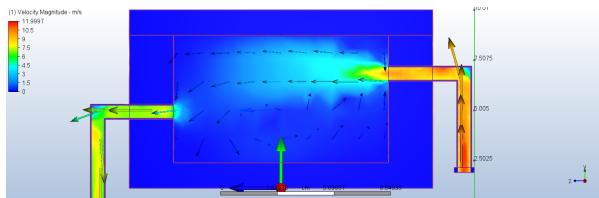
Producto de estas simulaciones

Las anteriores simulaciones ayudaron a comprender un poco más la respuesta del sistema y con base en ello se tomaron las siguientes decisiones.

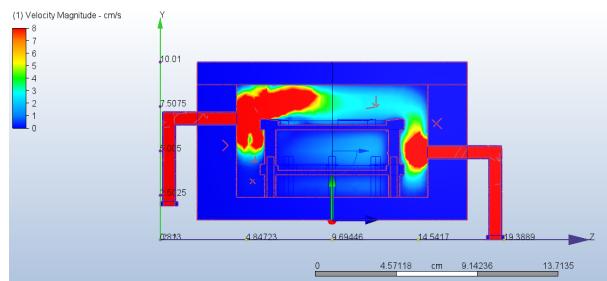
- Se descartó el uso de acero inoxidable como material para la tubería
- Se aceptó el uso de aluminio 5052 como material para la tubería pero se identificaron ciertas limitaciones en contraste con el cobre como menor ductilidad, menor transferencia de calor pero mayor resistencia a la corrosión.
- Los criterios de manufacturabilidad cambiaron cuando se eligió el cobre como material para la tubería. Como resultado, se propuso un nuevo diseño para mejorar la homogeneidad de la temperatura del agua, esto se muestra en la fig. 7.10.

Flujo de aire en la cámara de evaporación

La superficie de evaporación vista en la fig. 7.4 incrementa a más del doble la superficie de evaporación y no disminuye sustancialmente el flujo de aire dentro de la cámara como se observa en la fig. 7.8, por lo cual se justifica parcialmente su incorporación al desalinizador dado que falta evaluar su influencia en la acumulación de sales dentro de la cámara.



(a) Flujo de aire sin superficie de evaporación



(b) Flujo de aire con superficie de evaporación

Figura 7.8: Flujo de aire en la cámara de evaporación

7.2. Control del sistema

7.2.1. Sensores y componentes, calibración y caracterización

A continuación se detalla el proceso de ajuste y caracterización de los sensores y la bomba que regula el flujo de agua, estas calibraciones resultan indispensables para el correcto funcionamiento del método de control.

Termistores

Para caracterizar los termistores se refirió a un set de datos que reflejan la respuesta óhmica al aplicarse cierta temperatura; el código visto en apéndice D nos permite hallar los coeficientes de Steinhart-Hart para este modelo.

Se halló que:

$$\blacksquare A = 1.128\,66 \times 10^{-3} \quad \blacksquare B = 2.3422 \times 10^{-4} \quad \blacksquare C = 8.7159 \times 10^{-8}$$

EZO-PMP

La bomba peristáltica EZO-PMP permite una calibración manual, para ello se recreó la configuración vista en la fig. 7.9

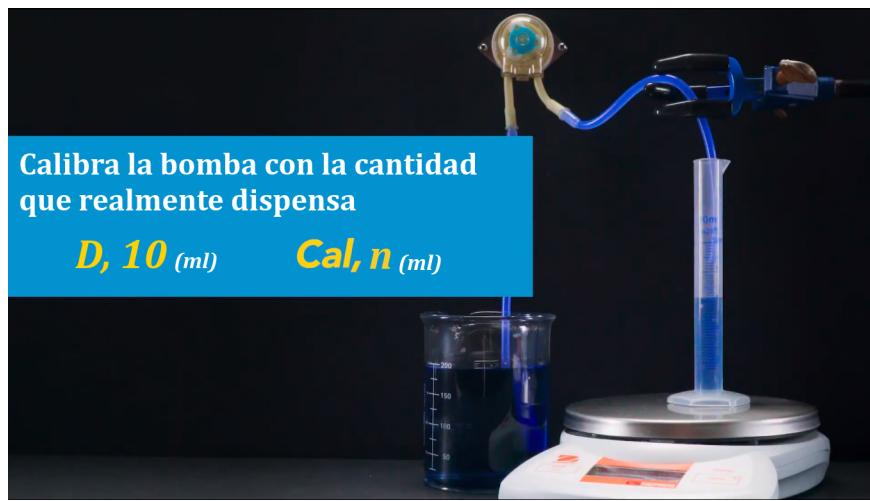


Figura 7.9: Arreglo para la calibración de la bomba EZO-PMP

Imagen adaptada de [56]

7.2.2. Selección del método de control

Considerando el tamaño del sistema y las diferentes funciones que debe atender, se decidió dividir el control en dos partes, la primera regula el flujo de agua que pasa por el receptor solar y la última se centra en abastecer y vaciar el sistema, es decir, se encarga de vaciar el agua condensada, la salmuera y restablecer los niveles de agua de mar. Debido a la naturaleza más simple de la segunda parte del control, se proporcionará una explicación breve al final. Por el momento, se justificará la selección del método de control propuesto.

En la primera etapa, se llevaron a cabo estudios comparativos para evaluar distintos métodos de control, analizando sus ventajas y desventajas. Tras este análisis, se llegó a la conclusión de que el método de control difuso se acoplaba mejor a las necesidades del sistema ya que:

- El modelo de control difuso permite hacer razonamientos para evaluar el grado de certidumbre de una afirmación en vez de limitarse a una lógica binaria donde se producen saltos de una afirmación a otra.
- Permite crear un modelo de control basado en reglas fácilmente interpretables
- No requiere un modelo matemático u aproximación numérica del proceso, sino, en conocimiento empírico, lo cual es muy beneficioso, ya que tanto el proceso de evaporación como el de ebullición es un fenómeno muy complejo y difícilmente modelable.
- Permite tomar decisiones de conocimientos y datos inexactos de forma similar al razonamiento humano

7.2.3. Modelo y reglas del control difuso

Se decidió restringir las variables difusas exclusivamente a la temperatura del agua de entrada y la del recipidor solar. Esta decisión se tomó considerando que un gran número de variables podría aumentar exponencialmente la complejidad del algoritmo y las reglas.

Con el fin de definir las funciones de membresía se estudió la respuesta del sistema variando el caudal, la temperatura del agua entrante y el calor capturado por el concentrador solar. Mediante simulaciones se pudo delimitar el universo de discurso de las variables difusas y comprender su impacto en el modelo. En la fig. 7.10 se muestra brevemente evidencia de las diferentes simulaciones hechas.

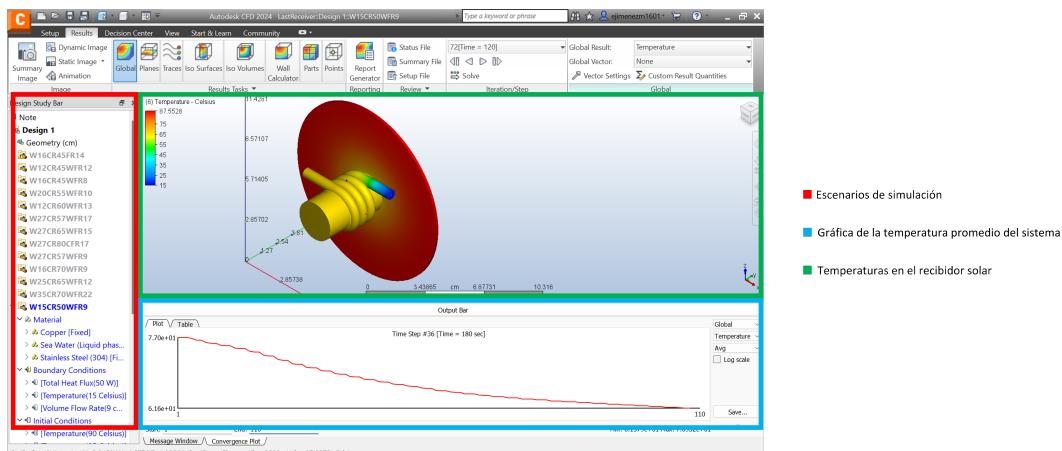


Figura 7.10: Captura de pantalla de Autodesk CFD mostrando una vista general de las simulaciones realizadas

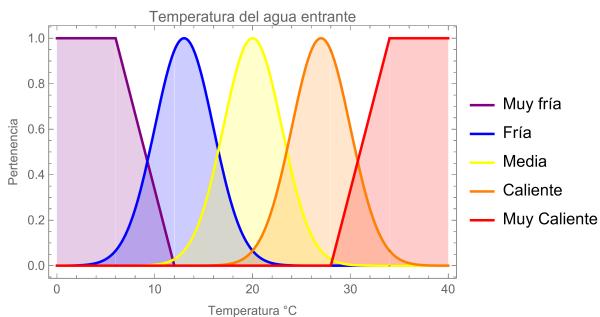
Durante la corrida de las simulaciones se observó que:

1. En esta nueva geometría de la tubería de cobre, el agua de salida adquiere prácticamente la temperatura del agua solar una vez se estabiliza el intercambio de calor. Cabe resaltar que esta temperatura y la temperatura del agua a evaporar son distintas.
 2. La variación del flujo de agua tiene el mayor impacto en el sistema; un cambio repentino en el flujo de agua tiene un impacto significativo en la temperatura del agua de salida.
 3. La variación de la temperatura del agua entrante tiene un impacto notable en la temperatura del agua de salida, aunque es necesario un rango amplio para notar esta diferencia.

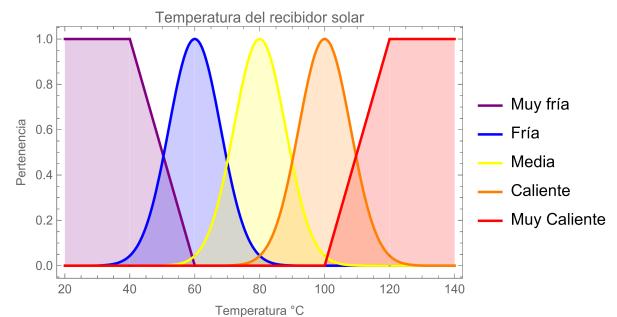
Se propuso entonces utilizar una función de membresía triangular para el caudal, ya que representa con mayor precisión los cambios bruscos que produce en la respuesta del sistema. En cuanto a la temperatura del receptor solar, se propuso una función gaussiana debido a que se ajusta más al comportamiento observado.

Posteriormente se definieron las variables lingüísticas y sus respectivas membresías. En las dos variables difusas de entrada, se establecieron cinco variables lingüísticas cada una, mientras que en la variable

difusa de salida se definieron seis variables lingüísticas. Estas membresías y sus respectivos rangos son visibles en las figs. 7.11 y 7.12.



(a) Funciones de membresía de la temperatura del agua de mar entrante



(b) Funciones de membresía de la temperatura del receptor solar

Figura 7.11: Funciones de membresía de las variables difusas de entrada

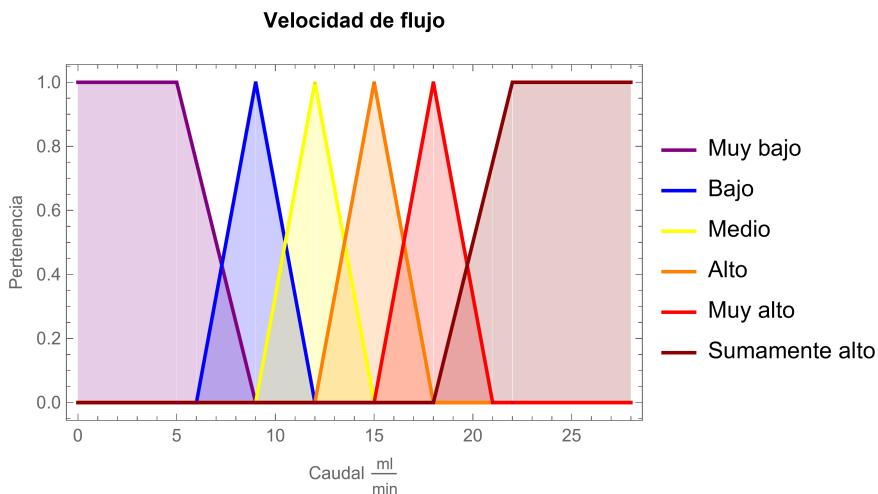


Figura 7.12: Funciones de membresía de la respuesta difusa.

Una vez llegado a este punto se definieron las reglas que rigen el sistema difuso. Para leerse con mayor facilidad se dividieron en bloques.

Si la temperatura del receptor solar es muy baja:

- El caudal es nulo en todos los casos.

Si la temperatura del receptor solar es baja:

- Si la temperatura del receptor solar es baja y además no es muy baja, y la temperatura del agua de entrada es muy alta, el caudal es medio.
- Si la temperatura del receptor solar es baja y además no es muy baja, y la temperatura del agua de entrada es alta, el caudal es bajo.

- Si la temperatura del receptor solar es baja y además no es muy baja, y la temperatura del agua de entrada es media pero no es baja, el caudal es muy bajo.
- Si la temperatura del receptor solar es baja y además no es muy baja, y la temperatura del agua de entrada es muy baja o baja, el caudal es nulo.

Si la temperatura del receptor solar es media:

- Si la temperatura del receptor solar es media y la temperatura del agua de entrada es alta o muy alta, el caudal es alto.
- Si la temperatura del receptor solar es media y la temperatura del agua de entrada es media, el caudal es medio.
- Si la temperatura del receptor solar es media y la temperatura del agua de entrada es baja, el caudal es bajo.
- Si la temperatura del receptor solar es media y la temperatura del agua de entrada es muy baja, el caudal es muy bajo.

Si la temperatura del receptor solar es alta:

- Si la temperatura del receptor solar es alta y la temperatura del agua de entrada es alta o muy alta, el caudal es muy alto
- Si la temperatura del receptor solar es alta y la temperatura del agua de entrada es media, el caudal es alto.
- Si la temperatura del receptor solar es alta y la temperatura del agua de entrada es baja, el caudal es medio.
- Si la temperatura del receptor solar es alta y la temperatura del agua de entrada es muy baja, el caudal es bajo.

Si la temperatura del receptor solar es muy alta:

- Si la temperatura del receptor solar es muy alta, y la temperatura del agua de entrada es muy alta el caudal es sumamente alto
- Si la temperatura del receptor solar es muy alta y la temperatura del agua de entrada es alta, el caudal es muy alto
- Si la temperatura del receptor solar es muy alta y la temperatura del agua de entrada es media, el caudal es alto
- Si la temperatura del receptor solar es muy alta y la temperatura del agua de entrada es baja, el caudal es medio

- Si la temperatura del receptor solar es muy alta y la temperatura del agua de entrada es muy baja, el caudal es bajo

Este conjunto de reglas tienen como objetivo tratar de mantener la temperatura del agua entre 62.5 °C a 67.5 °C con el fin de evitar daños en los componentes eléctricos. Aunque se observó que sería un caso improbable, se decidió agregar una función protectora que aumenta el caudal al máximo si la temperatura del agua a evaporar se acerca peligrosamente a los 70 °C (límite de operación de los componentes eléctricos seleccionados).

7.2.4. Automatización del vaciado y llenado de nuestros módulos

Como se explicó anteriormente, esta segunda parte del control se encarga de administrar los volúmenes de agua dentro del “Módulo de reacondicionamiento térmico y bombeo”.

Para el contenedor de agua de mar, se usa un sensor de nivel para saber cuándo es necesario suministrar más agua al contenedor. Caso contrario, en el contenedor de agua destilada, se usa para saber cuándo es necesario vaciarlo. En el caso de la cámara de evaporación, se usa el sensor de temperatura y el estado del sistema de control difuso para saber si hay salmuera en la cámara. Si la temperatura de la salmuera baja de los 40 °C o han transcurrido 2 horas de operación, se vacía la salmuera.

7.3. Construcción e integración del sistema

7.4. Módulo de reacondicionamiento térmico y bombeo

El intercambiador de calor



Figura 7.13: Intercambiador de calor con aletas verticales

7.5. Integración al seguidor solar

Para integrar el desalinizador al seguidor solar, se construyó un marco que soportara la lente, la altura de colocación de la lente se calculó mediante la ley de Snell y trigonometría siguiendo el arreglo mostrado en la fig. 7.14.

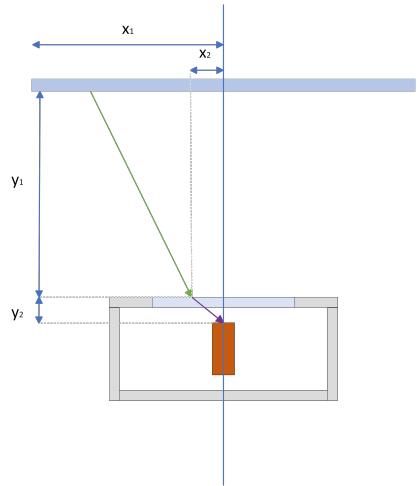


Figura 7.14: Trazado de rayos que permiten calcular la altura de la lente con respecto al punto focal.

De los cálculos hechos, se obtuvo una altura al punto focal de 362.45 mm. A eso se le sumó la altura del receptor solar con respecto al módulo de concentración solar dando que la altura mínima del marco es de 442.50 mm

Bibliografía

- [1] PNUD. “Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento | El PNUD en México”, UNDP. (), <https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html> (visitado 24-02-2022).
- [2] Naciones Unidas. “Sustainable Development Goal 6: Agua limpia y saneamiento | Naciones Unidas en México”, Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en México / Agua limpia y saneamiento. (), <https://mexico.un.org/es/sdgs/6> (visitado 24-02-2022).
- [3] T. W. Africa, “Archimedes through the Looking-Glass”, *The Classical World*, vol. 68, n.º 5, págs. 305-308, 1975, Publisher: [Johns Hopkins University Press, Classical Association of the Atlantic States], ISSN: 0009-8418. DOI: [10.2307/4348211](https://doi.org/10.2307/4348211).
- [4] S. A. Kalogirou, “Solar thermal collectors and applications”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, n.º 3, págs. 231-295, 2004, ISSN: 0360-1285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.
- [5] A. Cassini y M. Levinas, “La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico: un análisis histórico-epistemológico”, *Revista latinoamericana de filosofía*, vol. 34, págs. 5-38, 1 de mayo de 2008.
- [6] M. S. Bretado de los Rios, “Aplicación de Nanofluidos en un Concentrador Solar Parabólico Lineal para Aprovechamiento de Energía Térmica”, Tesis doct., Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, Nuevo León, 15 de mayo de 2017, 137 págs.
- [7] S. García Garrido, S. Remke, E. Zarza Moya et al., *Guía técnica de la energía Solar Termoeléctrica*, col. de A. - C. Energía. Madrid, España: Madrid Solar, 2012, 317 págs.
- [8] G. JAB. “Historia de las células solares y su evolución tecnológica”, Grupo JAB. (13 de ago. de 2018), <https://www.grupojab.es/historia-de-las-celulas-solares-y-su-evolucion-tecnologica/> (visitado 04-07-2022).
- [9] E. Ojeda-Durán, “Historia, Desarrollo y Actualidad de las Celdas Solares”, *Con ciencia*, n.º 2, págs. 17-21, 1 de mayo de 2018.
- [10] M. KUMAR, T. CULP e Y. SHEN. “Water Desalination History, Advances, and Challenges”, NAE Website. (19 de dic. de 2016), <https://nae.edu/164313/Water-Desalination-History-Advances-and-Challenges> (visitado 26-03-2022).
- [11] M. Pau, *Desaladoras. Fábricas de agua dulce*.
- [12] AQUAE. “Historia de la desalinización del agua”, Fundación Aquae. (), <https://www.fundacionaqua.org/historia-de-la-desalinizacion-del-agua/> (visitado 25-02-2022).
- [13] K. V. Modi, K. H. Nayi y S. S. Sharma, “Influence of water mass on the performance of spherical basin solar still integrated with parabolic reflector”, *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 10, pág. 100 299, 1 de abr. de 2020, ISSN: 2352-801X. DOI: [10.1016/j.gsd.2019.100299](https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100299).
- [14] E. González Castro, “Alternativa al modelo hídrico actual de Menorca: cubierta captadora de lluvia, rocío y destilación”, Tesis doct., Universidad Politécnica de Valencia, Barcelona, España, sep. de 2014, 130 págs.
- [15] P. I. Cooper, “The maximum efficiency of single-effect solar stills”, *Solar Energy*, vol. 15, n.º 3, págs. 205-217, 1 de ene. de 1973, ISSN: 0038-092X. DOI: [10.1016/0038-092X\(73\)90085-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(73)90085-6).

- [16] K. R. Ranjan y S. C. Kaushik, “Economic feasibility evaluation of solar distillation systems based on the equivalent cost of environmental degradation and high-grade energy savings”, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 11, n.º 1, págs. 8-15, 1 de mar. de 2016, ISSN: 1748-1317. DOI: [10.1093/ijlct/ctt048](https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt048).
- [17] M. a. S. Malik, G. N. Tiwari, A. Kumar y M. S. Sodha, “Solar distillation (a practical study of a wide range of stills and their optimum design, construction, and performance)”, 1 de ene. de 1982.
- [18] F. Muñoz Gutierrez. “Sobre la destilación solar”, Instituto de Ingeniería UNAM. (), <http://www.ii.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Gaceta-Gaceta-Septiembre-Octubre-2019/Paginas/sobre-la-destilacion-solar.aspx> (visitado 26-03-2022).
- [19] H. Zheng, *Solar Energy Desalination Technology*, 1.^a ed., H. Zheng, ed. Amsterdam: Elsevier, 1 de ene. de 2017, 768 págs., ISBN: 978-0-12-805411-6. DOI: [10.1016/B978-0-12-805411-6.00001-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805411-6.00001-4).
- [20] E. Saettone, Y. Valencia-Tovar y A. Gómez-de-la-Torre-Gastello, “Preliminary overview and evaluation of a stepped solar distiller with internal reflective walls and borosilicate vacuum tubes”, *Desalination*, vol. 413, págs. 136-143, 1 de jul. de 2017, ISSN: 0011-9164. DOI: [10.1016/j.desal.2017.03.020](https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.020).
- [21] A. E. Kabeel, M. El Hadi Attia, M. Abdelgaiied, A. S. Abdullah, A. Bellila y M. M. Abdel-Aziz, “Performance assessment of the hemispherical solar distillers with the extended cylindrical iron fins: An experimental investigation”, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, n.º 12, págs. 11 149-11 157, 1 de dic. de 2022, ISSN: 1110-0168. DOI: [10.1016/j.aej.2022.04.018](https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.04.018).
- [22] M. Jobrane, A. Kopmeier, A. Kahn, H.-M. Cauchie, A. Kharroubi y C. Penny, “Theoretical and experimental investigation on a novel design of wick type solar still for sustainable freshwater production”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 200, pág. 117 648, 5 de ene. de 2022, ISSN: 1359-4311. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2021.117648](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117648).
- [23] S. I. Palomino-Resendiz, D. A. Flores-Hernández, N. Lozada-Castillo, L. Guzmán-Vargas y A. Luviano-Juárez, “Design and implementation of a robotic active solar distiller based on a fresnel concentrator and a photovoltaic system”, *Energy Conversion and Management*, vol. 166, págs. 637-647, 15 de jun. de 2018, ISSN: 0196-8904. DOI: [10.1016/j.enconman.2018.04.069](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.069).
- [24] S. Lattemann, M. Kennedy, J. Schippers y G. Amy, “Chapter 2 Global Desalination Situation”, *Sustainability Science and Engineering*, vol. 2, 31 de dic. de 2010, ISSN: 9780444531155. DOI: [10.1016/S1871-2711\(09\)00202-5](https://doi.org/10.1016/S1871-2711(09)00202-5).
- [25] A. A. Intelligence. “RO and MBR are the next big technology development in the water treatment market - arizton”. (30 de nov. de 2021), <https://www.prnewswire.com/news-releases/ro-and-mbr-are-the-next-big-technology-development-in-the-water-treatment-market---arizton-301434002.html> (visitado 24-03-2022).
- [26] D. B. Singh, J. K. Yadav, V. K. Dwivedi, S. Kumar, G. N. Tiwari e I. M. Al-Helal, “Experimental studies of active solar still integrated with two hybrid PVT collectors”, *Solar Energy*, vol. 130, págs. 207-223, 1 de jun. de 2016, ISSN: 0038-092X. DOI: [10.1016/j.solener.2016.02.024](https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.024).
- [27] F. para la Comunicación y la Educación Ambiental. “Derecho Humano al Agua y al Saneamiento”, DERECHO HUMANO AL AGUA Y AL SANEAMIENTO. (), <https://agua.org.mx/tus-derechos-sobre-el-agua/> (visitado 24-02-2022).

- [28] EFE. “Empeora el estrés hídrico que envuelve a México: 8 de 13 regiones lo padecen”, El Financiero. (25 de ago. de 2021), <https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/2021/08/25/empeora-el-estres-hidrico-que-envuelve-a-mexico-8-de-13-regiones-lo-padecen/> (visitado 24-02-2022).
- [29] A. Maddocks, R. S. Young y P. Reig, “Ranking the world’s most water-stressed countries in 2040”, 26 de ago. de 2015.
- [30] National Aeronautics and Space Administration. “Una estación seca más intensa se apodera de México”. (2021), <https://ciencia.nasa.gov/sequia-generalizada-en-mexico> (visitado 06-05-2021).
- [31] H. T. El-Dessouky y H. M. Ettonuey, *Chapter 1 - Introduction*, 1.^a ed., H. T. El-Dessouky y H. M. Ettonuey, eds. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1 de ene. de 2002, 670 págs., ISBN: 978-0-444-50810-2. DOI: [10.1016/B978-044450810-2/50003-8](https://doi.org/10.1016/B978-044450810-2/50003-8).
- [32] W. Q. Association. “Glossary of terms”, Water Quality Association. (), <https://www.wqa.org/resources/glossary-of-terms/glossary-of-terms1-glossary-s> (visitado 08-07-2022).
- [33] “Seawater”, Encyclopedia Britannica. col. de Alyn C. Duxbury, Robert Howard Byrne, Fred T. Mackenzie et al. (27 de feb. de 2023), <https://www.britannica.com/science/seawater> (visitado 07-04-2023).
- [34] J. Obianyo, “Effect of Salinity on Evaporation and the Water Cycle”, *Emerging Science Journal*, vol. 3, págs. 255-262, 30 de jul. de 2019. DOI: [10.28991/esj-2019-01188](https://doi.org/10.28991/esj-2019-01188).
- [35] P. Atkins y J. De Paula, *Physical chemistry*, 9.^a ed. New York, United States of America: W. H. Freeman y Company, 2010, 972 págs., ISBN: 978-1-4292-1812-2.
- [36] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa | ISBN 978-607-15-0540-8 - Libro*, 4.^a ed., trad. por E. J. Hernán D’Borneville. México: Mc Graw-Hill, 17 de dic. de 2010, 945 págs., ISBN: 978-607-15-0540-8.
- [37] Y. A. Çengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, 7.^a ed. D.F., México: McGRAW-HILL, 2009, 1014 págs., ISBN: 978-607-15-0743-3.
- [38] H. D. Young y R. A. Freedman, *Física Universitaria Con Física Moderna*, 12.^a ed. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2009, vol. 2, 896 págs., ISBN: 978-607-442-304-4.
- [39] L. Weinstein y Brilliant Worldwide Inc, *Spectral properties of sunlight*.
- [40] O. García Valladares e I. Pilatowsky Figueroa, *Aplicaciones Térmicas de la Energía Solar en los Sectores Residencial, Servicio e Industrial*, 1.^a ed., J. Tonda Mazón, ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, 9 de abr. de 2017, 160 págs., ISBN: 978-607-02-9005-3.
- [41] L. Weinstein y Brilliant Worldwide Inc, *Solar availability*.
- [42] R. Leutz y A. Suzuki, *Nonimaging Fresnel Lenses* (Springer Series in OPTICAL SCIENCES), red. de W. T. Rhodes. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001, vol. 83, ISBN: 978-3-642-07531-5 978-3-540-45290-4. DOI: [10.1007/978-3-540-45290-4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-45290-4).
- [43] A. Singh, R. Yadav, D. Mishra, R. Prasad, L. Gupta y P. Kumar, “Active solar distillation technology: A wide overview”, *Desalination*, vol. 493, pág. 114 652, 1 de nov. de 2020. DOI: [10.1016/j.desal.2020.114652](https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114652).
- [44] Association for Materials Protection and Performance. “What is corrosion”, What is corrosion? (), <https://www.ampp.org/resources/what-is-corrosion> (visitado 10-07-2022).

- [45] J. S. Rodríguez Suárez, E. Espinoza Navarrete, J. Rosenbuch et al., *La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México*, 1.^a ed. Ciudad de México, México: ProMéxico, 2017, 167 págs., ISBN: 978-607-97294-8-6.
- [46] J. L. Ramírez, “Intensificación de la transferencia de calor en ebullición convectiva”, *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 15, n.^o 1, págs. 86-102, 25 de dic. de 2018, Number: 1, ISSN: 2619-6581. DOI: [10.18041/1794-4953/avances.1.1327](https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1327).
- [47] Direct Industry. “Tubos aletados by ICI Caldaie SpA | DirectIndustry”, Tubos aletados. (), <https://www.directindustry.es/prod/ici-caldaie-spa/product-126357-1775129.html> (visitado 25-05-2022).
- [48] C. C. Wang, C. B. Chiou y D. C. Lu, “Single-phase heat transfer and flow friction correlations for microfin tubes”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 17, n.^o 5, págs. 500-508, 1 de oct. de 1996, ISSN: 0142-727X. DOI: [10.1016/0142-727X\(96\)00048-3](https://doi.org/10.1016/0142-727X(96)00048-3).
- [49] A. Greco, “Convective boiling of pure and mixed refrigerants: An experimental study of the major parameters affecting heat transfer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, n.^o 3, págs. 896-909, 1 de feb. de 2008, ISSN: 0017-9310. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.002](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.002).
- [50] R. R. Shannon, *The Art and Science of Optical Design*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997, ISBN: 978-0-521-45414-8. DOI: [10.1017/CBO9780511816529](https://doi.org/10.1017/CBO9780511816529).
- [51] A. Davis y F. Kühnlenz, “Optical design using fresnel lenses”, *Optik & Photonik*, vol. 2, n.^o 4, págs. 52-55, 2007, _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/oppb.201190287>. DOI: [10.1002/oppb.201190287](https://doi.org/10.1002/oppb.201190287).
- [52] J. R. Lowery, “Solar absorption characteristics of several coatings and surface finishes”, National Aeronautics y Space Administration, Washington D.C., USA, Technical Memorandum NASA TM X-3509, mar. de 1977, pág. 35.
- [53] L. M. Mosquera Rivera, “ESTUDIO FÍSICO COMPARATIVO DE PINTURAS COMERCIALES DE ALTA TEMPERATURA PARA APLICACIÓN EN COLECTORES SOLARES”, Tesis doct., Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2020, 96 págs.
- [54] P. Davenport, Z. Ma, W. Nation, J. Schirck, A. Morris y M. Lambert, “Thermal stability of silica for application in thermal energy storage”, Presentado en SOLARPACES 2020: 26th International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Freiburg, Germany, 2022, pág. 160 003. DOI: [10.1063/5.0085641](https://doi.org/10.1063/5.0085641).
- [55] G. Wypych, “2 - fillers – origin, chemical composition, properties, and morphology”, en *Handbook of Fillers (Fifth Edition)*, G. Wypych, ed., ChemTec Publishing, 1 de ene. de 2021, págs. 13-302, ISBN: 978-1-927885-79-6. DOI: [10.1016/B978-1-927885-79-6.50005-7](https://doi.org/10.1016/B978-1-927885-79-6.50005-7).
- [56] Atlas Scientific LLC. “EZO-PMP™ embedded dosing pump”. (26 de jun. de 2020), <https://www.youtube.com/watch?v=h1WgDr5QuLE> (visitado 25-09-2023).
- [57] K. Nayar, M. Sharqawy, L. Banchik y J. Lienhard V, “Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence”, vol. 390, págs. 1-24, 2016. DOI: [10.1016/j.desal.2016.02.024](https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.024).
- [58] M. H. Sharqawy, J. H. Lienhard V y S. M. Zubair, “Thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data”, vol. 16, págs. 354-380, abr. de 2010.
- [59] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Fluid mechanics: fundamentals and applications* (McGraw-Hill series in mechanical engineering). Boston: McGraw-HillHigher Education, 2006, 956 págs., OCLC: 56481360, ISBN: 978-0-07-247236-3.

Apéndice A

Propiedades del agua de mar

Los datos mostrados en este apéndice son datos distribuidos gratuitamente gracias a los siguientes artículos de revistas científicas [57], [58].

$$\text{Considerando } P = \begin{cases} 101.325 \text{ kPa} & T \leq 100^\circ\text{C} \\ \text{Presión de vapor de agua} & T > 100^\circ\text{C} \end{cases} \text{ para las tablas A.1 a A.4}$$

Tabla A.1: Elevación del punto de ebullición según su salinidad

| T [°C] | Salinidad | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 0 | 0.067 | 0.138 | 0.213 | 0.291 | 0.373 | 0.458 | 0.547 | 0.64 | 0.736 | 0.836 | 0.939 | 1.046 |
| 10 | 0.073 | 0.15 | 0.232 | 0.317 | 0.407 | 0.501 | 0.599 | 0.701 | 0.807 | 0.917 | 1.032 | 1.151 |
| 20 | 0.079 | 0.163 | 0.251 | 0.344 | 0.442 | 0.545 | 0.652 | 0.764 | 0.88 | 1.002 | 1.128 | 1.258 |
| 30 | 0.085 | 0.176 | 0.272 | 0.373 | 0.479 | 0.59 | 0.707 | 0.829 | 0.956 | 1.088 | 1.225 | 1.368 |
| 40 | 0.092 | 0.19 | 0.293 | 0.402 | 0.517 | 0.637 | 0.764 | 0.895 | 1.033 | 1.176 | 1.325 | 1.48 |
| 50 | 0.099 | 0.204 | 0.315 | 0.433 | 0.556 | 0.686 | 0.822 | 0.964 | 1.112 | 1.267 | 1.428 | 1.595 |
| 60 | 0.106 | 0.219 | 0.338 | 0.464 | 0.597 | 0.736 | 0.882 | 1.035 | 1.194 | 1.36 | 1.532 | 1.711 |
| 70 | 0.114 | 0.234 | 0.362 | 0.497 | 0.639 | 0.788 | 0.944 | 1.107 | 1.277 | 1.455 | 1.639 | 1.831 |
| 80 | 0.121 | 0.25 | 0.387 | 0.53 | 0.682 | 0.841 | 1.007 | 1.181 | 1.363 | 1.552 | 1.748 | 1.952 |
| 90 | 0.129 | 0.267 | 0.412 | 0.565 | 0.726 | 0.895 | 1.072 | 1.257 | 1.45 | 1.651 | 1.86 | 2.076 |
| 100 | 0.138 | 0.284 | 0.438 | 0.601 | 0.772 | 0.952 | 1.139 | 1.335 | 1.54 | 1.752 | 1.973 | 2.203 |
| 110 | 0.146 | 0.302 | 0.465 | 0.638 | 0.819 | 1.009 | 1.208 | 1.415 | 1.631 | 1.856 | 2.089 | 2.331 |

Nota: El cambio de temperatura está dado en kelvin

Tabla A.2: Conductividad térmica del agua según su salinidad

| T [°C] | Salinidad | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 0 | 0.572 | 0.571 | 0.57 | 0.57 | 0.569 | 0.569 | 0.568 | 0.568 | 0.567 | 0.566 | 0.566 | 0.565 | 0.565 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.2: Conductividad térmica del agua según su salinidad (Continuación)

| T [°C] | Salinidad | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 10 | 0.588 | 0.588 | 0.587 | 0.587 | 0.586 | 0.585 | 0.585 | 0.584 | 0.584 | 0.583 | 0.583 | 0.582 | 0.582 |
| 20 | 0.604 | 0.603 | 0.602 | 0.602 | 0.601 | 0.601 | 0.6 | 0.6 | 0.599 | 0.599 | 0.598 | 0.598 | 0.597 |
| 30 | 0.617 | 0.617 | 0.616 | 0.616 | 0.615 | 0.615 | 0.614 | 0.614 | 0.613 | 0.613 | 0.612 | 0.612 | 0.611 |
| 40 | 0.63 | 0.629 | 0.629 | 0.628 | 0.628 | 0.627 | 0.627 | 0.626 | 0.626 | 0.625 | 0.625 | 0.624 | 0.624 |
| 50 | 0.641 | 0.64 | 0.64 | 0.639 | 0.639 | 0.638 | 0.638 | 0.637 | 0.637 | 0.636 | 0.636 | 0.635 | 0.635 |
| 60 | 0.65 | 0.65 | 0.649 | 0.649 | 0.648 | 0.648 | 0.647 | 0.647 | 0.647 | 0.646 | 0.646 | 0.645 | 0.645 |
| 70 | 0.658 | 0.658 | 0.658 | 0.657 | 0.657 | 0.656 | 0.656 | 0.655 | 0.655 | 0.655 | 0.654 | 0.654 | 0.653 |
| 80 | 0.665 | 0.665 | 0.665 | 0.664 | 0.664 | 0.663 | 0.663 | 0.663 | 0.662 | 0.662 | 0.661 | 0.661 | 0.661 |
| 90 | 0.671 | 0.671 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.669 | 0.669 | 0.669 | 0.668 | 0.668 | 0.667 | 0.667 | 0.667 |
| 100 | 0.676 | 0.675 | 0.675 | 0.675 | 0.674 | 0.674 | 0.674 | 0.673 | 0.673 | 0.673 | 0.672 | 0.672 | 0.672 |
| 110 | 0.679 | 0.679 | 0.679 | 0.678 | 0.678 | 0.678 | 0.677 | 0.677 | 0.677 | 0.676 | 0.676 | 0.676 | 0.675 |
| 120 | 0.682 | 0.681 | 0.681 | 0.681 | 0.68 | 0.68 | 0.68 | 0.679 | 0.679 | 0.679 | 0.679 | 0.678 | 0.678 |

Nota: La conductividad está dada en $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

Tabla A.3: Calor latente de vaporización del agua según su salinidad

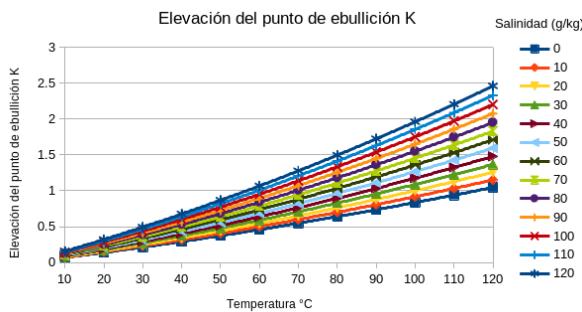
| T [°C] | Salinidad | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 0 | 2500.9 | 2475.9 | 2450.9 | 2425.9 | 2400.9 | 2375.9 | 2350.8 | 2325.8 | 2300.8 | 2275.8 | 2250.8 | 2225.8 | 2200.8 |
| 10 | 2477.2 | 2452.5 | 2427.7 | 2402.9 | 2378.1 | 2353.4 | 2328.6 | 2303.8 | 2279 | 2254.3 | 2229.5 | 2204.7 | 2180 |
| 20 | 2453.6 | 2429 | 2404.5 | 2379.9 | 2355.4 | 2330.9 | 2306.3 | 2281.8 | 2257.3 | 2232.7 | 2208.2 | 2183.7 | 2159.1 |
| 30 | 2429.8 | 2405.5 | 2381.2 | 2356.9 | 2332.6 | 2308.3 | 2284 | 2259.7 | 2235.4 | 2211.1 | 2186.8 | 2162.5 | 2138.2 |
| 40 | 2406 | 2381.9 | 2357.9 | 2333.8 | 2309.7 | 2285.7 | 2261.6 | 2237.6 | 2213.5 | 2189.4 | 2165.4 | 2141.3 | 2117.3 |
| 50 | 2382 | 2358.1 | 2334.3 | 2310.5 | 2286.7 | 2262.9 | 2239 | 2215.2 | 2191.4 | 2167.6 | 2143.8 | 2120 | 2096.1 |
| 60 | 2357.7 | 2334.1 | 2310.5 | 2287 | 2263.4 | 2239.8 | 2216.2 | 2192.7 | 2169.1 | 2145.5 | 2121.9 | 2098.3 | 2074.8 |
| 70 | 2333.1 | 2309.8 | 2286.4 | 2263.1 | 2239.8 | 2216.4 | 2193.1 | 2169.8 | 2146.4 | 2123.1 | 2099.8 | 2076.5 | 2053.1 |
| 80 | 2308.1 | 2285 | 2261.9 | 2238.8 | 2215.8 | 2192.7 | 2169.6 | 2146.5 | 2123.4 | 2100.4 | 2077.3 | 2054.2 | 2031.1 |
| 90 | 2282.6 | 2259.7 | 2236.9 | 2214.1 | 2191.3 | 2168.4 | 2145.6 | 2122.8 | 2100 | 2077.1 | 2054.3 | 2031.5 | 2008.7 |
| 100 | 2256.5 | 2233.9 | 2211.3 | 2188.8 | 2166.2 | 2143.7 | 2121.1 | 2098.5 | 2076 | 2053.4 | 2030.8 | 2008.3 | 1985.7 |
| 110 | 2229.7 | 2207.4 | 2185.1 | 2162.8 | 2140.5 | 2118.2 | 2095.9 | 2073.6 | 2051.3 | 2029 | 2006.7 | 1984.4 | 1962.1 |
| 120 | 2202.1 | 2180.1 | 2158.1 | 2136.1 | 2114.1 | 2092 | 2070 | 2048 | 2026 | 2003.9 | 1981.9 | 1959.9 | 1937.9 |

Nota: El calor latente de vaporización está dado en kJ kg^{-1}

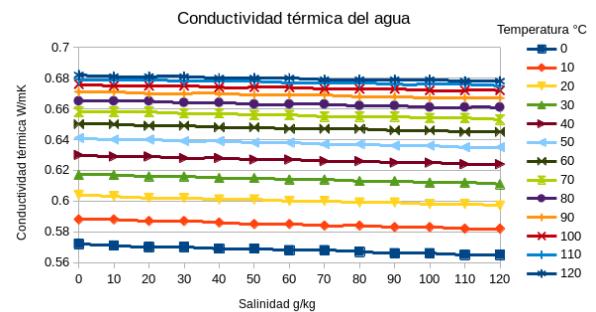
Tabla A.4: Calor específico del agua según su salinidad

| T [°C] | Salinidad | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 0 | 4206.9 | 4141.8 | 4079.3 | 4019.2 | 3961.7 | 3906.6 | 3853.9 | 3803.8 | 3756.1 | 3711 | 3668.3 | 3628.1 | 3590.3 |
| 10 | 4196.9 | 4136.7 | 4078.4 | 4022.2 | 3968.1 | 3915.9 | 3865.8 | 3817.7 | 3771.6 | 3727.6 | 3685.6 | 3645.6 | 3607.7 |
| 20 | 4189.4 | 4132.9 | 4078.1 | 4024.9 | 3973.4 | 3923.6 | 3875.4 | 3828.9 | 3784.1 | 3740.9 | 3699.4 | 3659.6 | 3621.4 |
| 25 | 4186.5 | 4131.5 | 4078.1 | 4026.2 | 3975.8 | 3926.9 | 3879.5 | 3833.7 | 3789.3 | 3746.5 | 3705.2 | 3665.4 | 3627.1 |
| 30 | 4184.2 | 4130.6 | 4078.3 | 4027.5 | 3978 | 3930 | 3883.3 | 3837.9 | 3794 | 3751.4 | 3710.3 | 3670.5 | 3632.1 |
| 40 | 4181.4 | 4129.8 | 4079.5 | 4030.3 | 3982.3 | 3935.5 | 3889.8 | 3845.3 | 3801.9 | 3759.8 | 3718.8 | 3678.9 | 3640.2 |
| 50 | 4180.9 | 4130.8 | 4081.7 | 4033.7 | 3986.6 | 3940.5 | 3895.5 | 3851.5 | 3808.5 | 3766.5 | 3725.5 | 3685.5 | 3646.5 |
| 60 | 4182.9 | 4133.6 | 4085.2 | 4037.8 | 3991.2 | 3945.6 | 3900.8 | 3857 | 3814.1 | 3772.1 | 3731 | 3690.8 | 3651.6 |
| 70 | 4187.3 | 4138.3 | 4090.2 | 4042.9 | 3996.5 | 3950.9 | 3906.2 | 3862.4 | 3819.4 | 3777.2 | 3736 | 3695.5 | 3656 |
| 80 | 4194.1 | 4145 | 4096.8 | 4049.4 | 4002.8 | 3957.1 | 3912.2 | 3868.1 | 3824.9 | 3782.5 | 3740.9 | 3700.2 | 3660.3 |
| 90 | 4203.4 | 4153.9 | 4105.3 | 4057.5 | 4010.5 | 3964.4 | 3919.1 | 3874.7 | 3831.1 | 3788.3 | 3746.4 | 3705.3 | 3665.1 |
| 100 | 4215.1 | 4165 | 4115.8 | 4067.4 | 4019.9 | 3973.3 | 3927.5 | 3882.6 | 3838.6 | 3795.4 | 3753.1 | 3711.6 | 3671.1 |
| 110 | 4229.4 | 4178.5 | 4128.6 | 4079.5 | 4031.4 | 3984.2 | 3937.8 | 3892.4 | 3847.9 | 3804.3 | 3761.5 | 3719.7 | 3678.8 |
| 120 | 4246.1 | 4194.5 | 4143.8 | 4094.1 | 4045.3 | 3997.5 | 3950.5 | 3904.6 | 3859.5 | 3815.4 | 3772.3 | 3730.1 | 3688.8 |

Nota: El calor específico está dado en $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$



(a) Elevación del punto de ebullición según aumenta la salinidad del agua (tabla A.1)



(b) Disminución de la conductividad térmica según aumenta la salinidad del agua (tabla A.2)

Figura A.1: Gráficas del apéndice A

Apéndice B

Propiedades del agua saturada

Tabla B.1: Propiedades del agua saturada

| T. °C | P. de Sat. kPa | Densidad kg m ⁻³ | | Entalpía de vap. kJ kg ⁻¹ | C _s J kg ⁻¹ K ⁻¹ | | Conductividad térmica W m ⁻¹ K ⁻¹ | | Viscosidad dinámica kg m ⁻¹ s ⁻¹ | | C. de expansión Volumétrica K ⁻¹ |
|----------|----------------------|--------------------------------|--------|---|--|-------|---|--------|--|------------------------|---|
| | | Líquido | Vapor | | Líquido | Vapor | Líquido | Vapor | Líquido | Vapor | |
| — | — | 999.8 | 0.0048 | 2501 | 4217 | 1854 | 0.561 | 0.0171 | 1.792×10^{-3} | 0.922×10^{-5} | -0.068×10^{-3} |
| 0.01 | 0.6113 | 999.9 | 0.0068 | 2490 | 4205 | 1857 | 0.571 | 0.0173 | 1.519×10^{-3} | 0.934×10^{-5} | 0.015×10^{-3} |
| 5 | 0.8721 | 999.7 | 0.0094 | 2478 | 4194 | 1862 | 0.58 | 0.0176 | 1.307×10^{-3} | 0.946×10^{-5} | 0.733×10^{-3} |
| 10 | 1.2276 | 999.1 | 0.0128 | 2466 | 4186 | 1863 | 0.589 | 0.0179 | 1.138×10^{-3} | 0.959×10^{-5} | 0.138×10^{-3} |
| 15 | 1.7051 | 998 | 0.0173 | 2454 | 4182 | 1867 | 0.598 | 0.0182 | 1.002×10^{-3} | 0.973×10^{-5} | 0.195×10^{-3} |
| 20 | 2.339 | 997 | 0.0231 | 2442 | 4180 | 1870 | 0.607 | 0.0186 | 0.891×10^{-3} | 0.987×10^{-5} | 0.247×10^{-3} |
| 25 | 3.169 | 996 | 0.0304 | 2431 | 4178 | 1875 | 0.615 | 0.0189 | 0.798×10^{-3} | 1.001×10^{-5} | 0.294×10^{-3} |
| 30 | 4.246 | 994 | 0.0397 | 2419 | 4178 | 1880 | 0.623 | 0.0192 | 0.720×10^{-3} | 1.016×10^{-5} | 0.337×10^{-3} |
| 35 | 5.628 | 992.1 | 0.0512 | 2407 | 4179 | 1885 | 0.631 | 0.0196 | 0.653×10^{-3} | 1.031×10^{-5} | 0.377×10^{-3} |
| 40 | 7.384 | 990.1 | 0.0655 | 2395 | 4180 | 1892 | 0.637 | 0.02 | 0.596×10^{-3} | 1.046×10^{-5} | 0.415×10^{-3} |
| 45 | 9.593 | 988.1 | 0.0831 | 2383 | 4181 | 1900 | 0.644 | 0.0204 | 0.547×10^{-3} | 1.062×10^{-5} | 0.451×10^{-3} |
| 50 | 12.35 | 985.2 | 0.1045 | 2371 | 4183 | 1908 | 0.649 | 0.0208 | 0.504×10^{-3} | 1.077×10^{-5} | 0.484×10^{-3} |
| 55 | 15.76 | 983.3 | 0.1304 | 2359 | 4185 | 1916 | 0.654 | 0.0212 | 0.467×10^{-3} | 1.093×10^{-5} | 0.517×10^{-3} |
| 60 | 19.94 | 980.4 | 0.1614 | 2346 | 4187 | 1926 | 0.659 | 0.0216 | 0.433×10^{-3} | 1.110×10^{-5} | 0.548×10^{-3} |
| 65 | 25.03 | 977.5 | 0.1983 | 2334 | 4190 | 1936 | 0.663 | 0.0221 | 0.404×10^{-3} | 1.126×10^{-5} | 0.578×10^{-3} |
| 70 | 31.19 | 974.7 | 0.2421 | 2321 | 4193 | 1948 | 0.667 | 0.0225 | 0.378×10^{-3} | 1.142×10^{-5} | 0.607×10^{-3} |
| 75 | 38.58 | 971.8 | 0.2935 | 2309 | 4197 | 1962 | 0.67 | 0.023 | 0.355×10^{-3} | 1.159×10^{-5} | 0.653×10^{-3} |
| 80 | 47.39 | 968.1 | 0.3536 | 2296 | 4201 | 1977 | 0.673 | 0.0235 | 0.333×10^{-3} | 1.176×10^{-5} | 0.670×10^{-3} |
| 85 | 57.83 | 965.3 | 0.4235 | 2283 | 4206 | 1993 | 0.675 | 0.024 | 0.315×10^{-3} | 1.193×10^{-5} | 0.702×10^{-3} |
| 90 | 70.14 | 961.5 | 0.5045 | 2270 | 4212 | 2010 | 0.677 | 0.0246 | 0.297×10^{-3} | 1.210×10^{-5} | 0.716×10^{-3} |
| 95 | 84.55 | 957.9 | 0.5978 | 2257 | 4217 | 2029 | 0.679 | 0.0251 | 0.282×10^{-3} | 1.227×10^{-5} | 0.750×10^{-3} |
| 100 | 101.33 | 950.6 | 0.8263 | 2230 | 4229 | 2071 | 0.682 | 0.0262 | 0.255×10^{-3} | 1.261×10^{-5} | 0.798×10^{-3} |
| 110 | 143.27 | 943.4 | 1.121 | 2203 | 4244 | 2120 | 0.683 | 0.0275 | 0.232×10^{-3} | 1.296×10^{-5} | 0.858×10^{-3} |
| 120 | 198.53 | 934.6 | 1.496 | 2174 | 4263 | 2177 | 0.684 | 0.0288 | 0.213×10^{-3} | 1.330×10^{-5} | 0.913×10^{-3} |
| 130 | 270.1 | 921.7 | 2.145 | 2145 | 4286 | 2244 | 0.683 | 0.0301 | 0.197×10^{-3} | 1.365×10^{-5} | 0.970×10^{-3} |
| 140 | 361.3 | 916.6 | 2.546 | 2114 | 4311 | 2314 | 0.682 | 0.0316 | 0.183×10^{-3} | 1.399×10^{-5} | 1.025×10^{-3} |
| 150 | 475.8 | 907.4 | 3.256 | 2083 | 4340 | 2420 | 0.68 | 0.0331 | 0.170×10^{-3} | 1.434×10^{-5} | 1.145×10^{-3} |
| 160 | 791.7 | 897.7 | 4.119 | 2050 | 4370 | 2490 | 0.677 | 0.0347 | 0.160×10^{-3} | 1.468×10^{-5} | 1.178×10^{-3} |
| 170 | 1002.1 | 887.3 | 5.153 | 2015 | 4410 | 2590 | 0.673 | 0.0364 | 0.150×10^{-3} | 1.502×10^{-5} | 1.210×10^{-3} |
| 180 | 1254.4 | 876.4 | 6.388 | 1979 | 4460 | 2710 | 0.669 | 0.0382 | 0.142×10^{-3} | 1.537×10^{-5} | 1.280×10^{-3} |
| 190 | 1553.8 | 864.3 | 7.852 | 1941 | 4500 | 2840 | 0.663 | 0.0401 | 0.134×10^{-3} | 1.571×10^{-5} | 1.350×10^{-3} |
| 200 | 2318 | 840.3 | 11.6 | 1859 | 4610 | 3110 | 0.65 | 0.0442 | 0.122×10^{-3} | 1.641×10^{-5} | 1.520×10^{-3} |
| 220 | 3344 | 813.7 | 16.73 | 1767 | 4760 | 3520 | 0.632 | 0.0487 | 0.111×10^{-3} | 1.712×10^{-5} | 1.720×10^{-3} |
| 240 | 4688 | 783.7 | 23.69 | 1663 | 4970 | 4070 | 0.609 | 0.054 | 0.102×10^{-3} | 1.788×10^{-5} | 2.000×10^{-3} |
| 260 | 6412 | 750.8 | 33.15 | 1544 | 5280 | 4835 | 0.581 | 0.0605 | 0.094×10^{-3} | 1.870×10^{-5} | 2.380×10^{-3} |
| 300 | 8581 | 713.8 | 46.15 | 1405 | 5750 | 5980 | 0.548 | 0.0695 | 0.086×10^{-3} | 1.965×10^{-5} | 2.950×10^{-3} |

Fuente: Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Fluid mechanics: fundamentals and applications* (McGraw-Hill series in mechanical engineering). Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2006, 956 págs., OCLC: 56481360, ISBN: 978-0-07-247236-3

Apéndice C

Código de julia para analizar las condiciones de la energía solar térmica en la CDMX

Paquetes importados

```
using Pkg
Pkg.add("Plots")
Pkg.add("HTTP")
Pkg.add("CategoricalArrays")
Pkg.add("DataFrames")
Pkg.add("CSV")
Pkg.add("Missings")
Pkg.add("Statistics")

using HTTP
using DataFrames
using CSV
using CategoricalArrays
using Missings
using Statistics
using Plots
```

Declaración de diccionarios

```
parameters = Dict(
    "hourly" => [
        "PS",
        "WS2M",
        "QV2M",
        "CLRSKY_SFC_SW_DWN",
        "ALLSKY_SFC_SW_DWN",
        "CLOUD_AMT",
        "ALLSKY_SFC_UVA",
        "ALLSKY_SFC_UVB"
    ],
);
```

```

descriptions = Dict(
    "PS" => [
        "Surface Pressure",
        "The average of surface pressure at the surface of the earth.",
        "kPa"
    ],
    "WS2M" => [
        "Wind Speed at 2 Meters",
        "The average of wind speed at 2 meters above the surface of the earth.",
        "m/s"
    ],
    "QV2M" => [
        "Specific Humidity at 2 Meters",
        "The ratio of the mass of water vapor to the total mass of air at 2 meters (kg
            water/kg total air).",
        "g/kg"
    ],
    "CLRSKY_SFC_SW_DWN" => [
        "Clear Sky Surface Shortwave Downward Irradiance",
        """The total solar irradiance incident (direct plus diffuse) on a horizontal
            plane at the surface of the earth under clear sky conditions. An alternative
            term for the total solar irradiance is the "Global Horizontal Irradiance" or
            GHI."""",
        "Whr/m^2"
    ],
    "ALLSKY_SFC_SW_DWN" => [
        "All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance",
        """The total solar irradiance incident (direct plus diffuse) on a horizontal
            plane at the surface of the earth under all sky conditions. An alternative
            term for the total solar irradiance is the "Global Horizontal Irradiance" or
            GHI."""",
        "Whr/m^2"
    ],
    "CLOUD_AMT" => [
        "Cloud Amount",
        "The average percent of cloud amount during the temporal period.",
        "%"
    ],
    "ALLSKY_SFC_UVA" => [
        "All Sky Surface UVA Irradiance",
        "The ultraviolet A (UVA 315nm-400nm) irradiance under all sky conditions.",
        "W/m^2"
    ],
    "ALLSKY_SFC_UVB" => [
        "All Sky Surface UVB Irradiance",
        "The ultraviolet B (UVB 280nm-315nm) irradiance under all sky conditions.",
        "W/m^2"
    ]
);
months = Dict(

```

```

1 => "Enero",
2 => "Febrero",
3 => "Marzo",
4 => "Abril",
5 => "Mayo",
6 => "Junio",
7 => "Julio",
8 => "Agosto",
9 => "Septiembre",
10 => "Octubre",
11 => "Noviembre",
12 => "Diciembre"
);

```

Constantes para la construcción de la URL

```

const LATITUDE::Float64 = 19.3038;
const LONGITUDE::Float64 = -99.0732;
START_DATE::Int64 = 20180101;
END_DATE::Int64 = 20221231;

```

Constantes

```

START_HOUR::Int64 = 4;
END_HOUR::Int64 = 18;

```

Solicitud de datos a la base de datos Power Larc de la NASA

```

path = joinpath(pwd(), "files");
if !isdir(path)
    mkdir(path)
end
for key in keys(parameters)
    URL::String = string(
        "https://power.larc.nasa.gov/api/temporal/$key/point",
        "?parameters=",
        join(parameters[key], ","),
        "&community=RE",
        "&longitude=$LONGITUDE",
        "&latitude=$LATITUDE",
        "&start=$START_DATE",
        "&end=$END_DATE"
    )
    response = HTTP.get(URL)
    data = JSON.parse(response)
    # Process the data
end

```

```

"&end=$END_DATE",
"&format=CSV"
);
download(URL, joinpath(path, "$START_DATE-$END_DATE-$key.csv"))
end

```

Tratamiento y análisis de datos

Nota: Se confía en la fuente, por lo que se asume que no existen valores nulos en el DataFrame. Sin embargo, se observa que hay valores para llenar iguales a -999. Se observa que estos valores son consecutivos a partir del 01/04/2022. Se espera que sea debido al periodo de recolección que pasa de ser cada hora a diario. Se buscará entonces otro dataset. Se encontró que en efecto, desde esa fecha no hay datos, aunque al corregirlo a diario, se reduce de 5 a 3 columnas la falta de datos, aunque aún se observan algunos datos faltantes.

```

na_val = -999;
min_year::Int64 = trunc(Int, (START_DATE/10000));
max_year::Int64 = trunc(Int, (END_DATE/10000));
graphs_path = joinpath(pwd(), "graphs");
if !isdir(graphs_path)
    mkdir(graphs_path)
end

for file in readdir(path)
    df = DataFrame(CSV.File(joinpath(path, file), header=17))
    subset!(

        df,
        names(df) .=> ByRow(x -> x != na_val),
        :HR => ByRow(x -> x >= START_HOUR && x <= END_HOUR),
        :YEAR => ByRow(x -> x >= min_year)
    )

    if (isequal(file[19:end-4], "hourly"))
        gd = groupby(df, [:HR, :MO, :YEAR])
    else
        gd = groupby(df, [:MO, :YEAR])
    end

    mean_dg = combine(gd, parameters[file[19:end-4]] .=> mean)
    println(describe(mean_dg))

    for description in keys(descriptions)
        for hour in START_HOUR : END_HOUR
            plot_data = filter(row -> row.HR === hour, mean_dg)
            figure = plot(
                [months[x] for x in minimum(plot_data.MO) : maximum(plot_data.MO)],
                [

```

```

        filter(row -> row.YEAR === year, plot_data)[:, string(description,
            "_mean")]
            for year in min_year : max_year -1
        ],
        title = "$(descriptions[description][1]) at $hour",
        label = ["2018" "2019" "2020" "2021"],
        ylabel = "[$(descriptions[description][3])]",
        xlabel = "Mes",
        xrotation = 90
    );
    savefig(joinpath(graphs_path, string(description, "_", hour, ".png")))
end
end
for description in keys(descriptions)
    figure = plot();
    for year in min_year : max_year -1
        plot_data = filter(row -> row.YEAR === year, mean_dg)
        figure = plot!(
            [plot_data.HR],
            [months[x] for x in plot_data.M0],
            plot_data[:, string(description, "_mean")],
            title = "$(descriptions[description][1])",
            label = "$year",
            zlabel = "[$(descriptions[description][3])]",
            xlabel = "Hora",
            ylabel = "Mes",
            yrotation = 90
        );
    end
    savefig(joinpath(graphs_path, string(description, "_3d.png")))
end

md = groupby(df, [:DY, :M0, :YEAR])
irradiation_keys = filter(key -> occursin("SFC", key), keys(descriptions))
sum_md = combine(md, irradiation_keys .-> sum)

for key in irradiation_keys
    for year in min_year : max_year -1
        data2plot = filter(row -> row.YEAR === year, sum_md)
        surface(
            [months[x] for x in data2plot.M0],
            [data2plot.DY],
            data2plot[:, string(key, "_sum")],
            title = "$(descriptions[key][1]) in $year",
            #label = "$year",
            zlabel = "[$(descriptions[key][3]) día]",
            xlabel = "Mes",
            ylabel = "Día",
            xrotation = 90
        )
        savefig(joinpath(graphs_path, string(key, "_surface_", year, "_3d.png")))
    end
end

```

```
    end  
end  
end
```

Apéndice D

Código en Wolfram Mathematica para la caracterización de un termistor dada su respuesta a la temperatura

```
data = Import[
  FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "thermistor-behavior.csv"}]][[2 ;]];
{Temperature, R} = Transpose[data[[All, {1, 2}]]];

(*Ajuste a la ecuación de Steinhart-Hart*)
SteinhartHartModel =
  NonlinearModelFit[Transpose[{R, 1/(Temperature + 273.15)}], 
    a + b*Log[r] + c*(Log[r])^3, {a, b, c}, r];

(*Coeficientes del modelo*)
SHCoefficients = {a, b, c} /.
  SteinhartHartModel["BestFitParameters"];
Print[ "A: " <> ToString[SHCoefficients[[1]]] <> "\nB: " <>
  ToString[SHCoefficients[[2]]] <> "\nC: " <>
  ToString[SHCoefficients[[3]], TraditionalForm]]
```