



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”

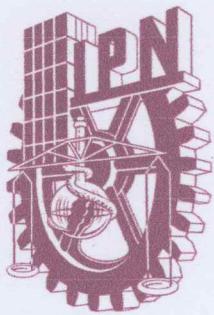
Presenta el alumno:
Jiménez Miranda Eduardo

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

M. en C. Adolfo Rojas Pacheco



México CDMX, a Marzo 23 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

Dr. Alberto Luviano Juárez
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”.

Le agradezco enormemente a mi familia quien me ha dado su apoyo incondicional y me ha dado la posibilidad de cursar una carrera universitaria, dándome las herramientas para crecer como una persona de bien y dejándome sin palabras para expresar mi gratitud hacia ellos.

A mis directores quienes me han orientado y guiado durante la elaboración de este proyecto quiero agradecerles por el acompañamiento y el conocimiento que me han brindado.

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
6.4.3.2. Materiales	46
7. Resultados	48
7.1. Diseño del sistema desalinizador	48
7.1.1. Contenedor de agua de mar	48
7.1.2. Contenedor de agua destilada	49
7.1.3. Cámara de evaporación	50
7.1.4. Cámara de concentración	51
7.1.4.1. Parte inferior	51
7.1.4.2. Parte superior	52
Bibliografía	53
A. Propiedades del agua de mar	57
B. Propiedades del agua saturada	60
C. Código de julia para analizar las condiciones de la energía solar térmica en la CDMX	61
D. Dibujos isométricos del sistema propuesto	67

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. Subclasificaciones 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. Propuesta del sistema desalinizador	48
7.2. Contenedor de agua de mar. Corte 1	49
7.3. Contenedor de agua destilada. Corte 1	49
7.4. Contenedor de agua destilada. Corte 2	50
7.5. Cámara de evaporación. Corte 1	50
7.6. Cámara de evaporación. Corte 2	51
7.7. Cámara de concentración; parte inferior. Corte 1	51
7.8. Cámara de concentración; parte inferior. Corte 2	52
A.1. Gráficas del apéndice A	59

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 modelos de bombas peristálticas	46
6.11. Propiedades de modelos de extractores	47
A.1. Elevación del punto de ebullición según su salinidad	57
A.2. Conductividad térmica del agua según su salinidad	57
A.3. Calor latente de vaporización del agua según su salinidad	58
A.4. Calor específico del agua según su salinidad	59

B.1. Propiedades del agua saturada	60
--	----

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 crea 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 foto eléctrico 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 tiempos de 12 horas continuas por 3 días y los resultados obtenidos se compararon contra un destilador semiesférico convencional.

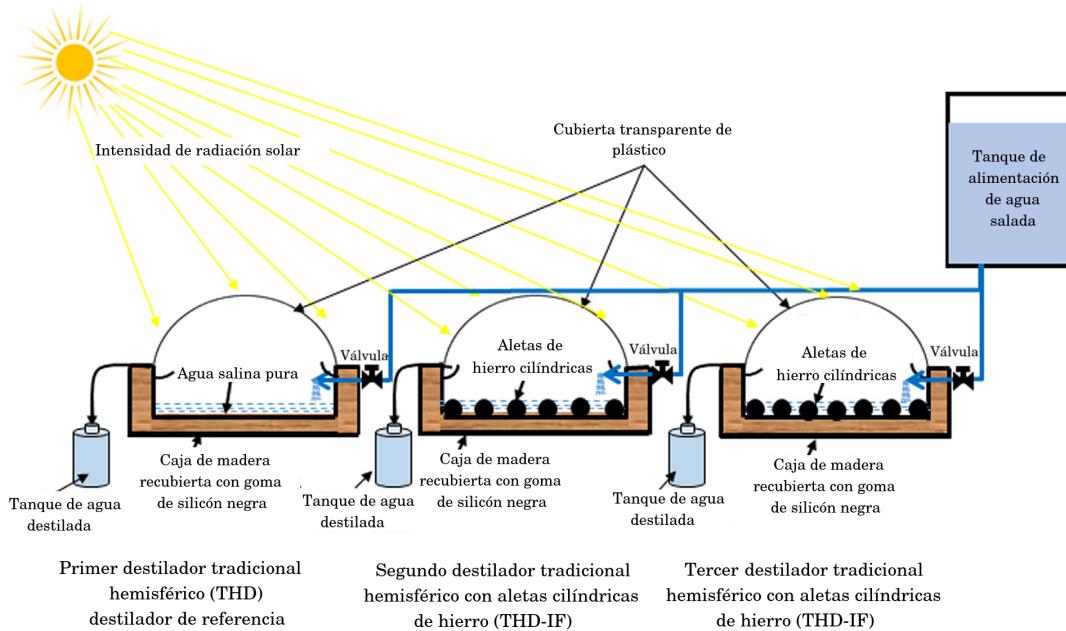


Figura 1.1: Aletas cilíndricas para mejorar los mecanismos de transferencia de calor de un destilador solar pasivo

Figura obtenida de [21]

De 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.

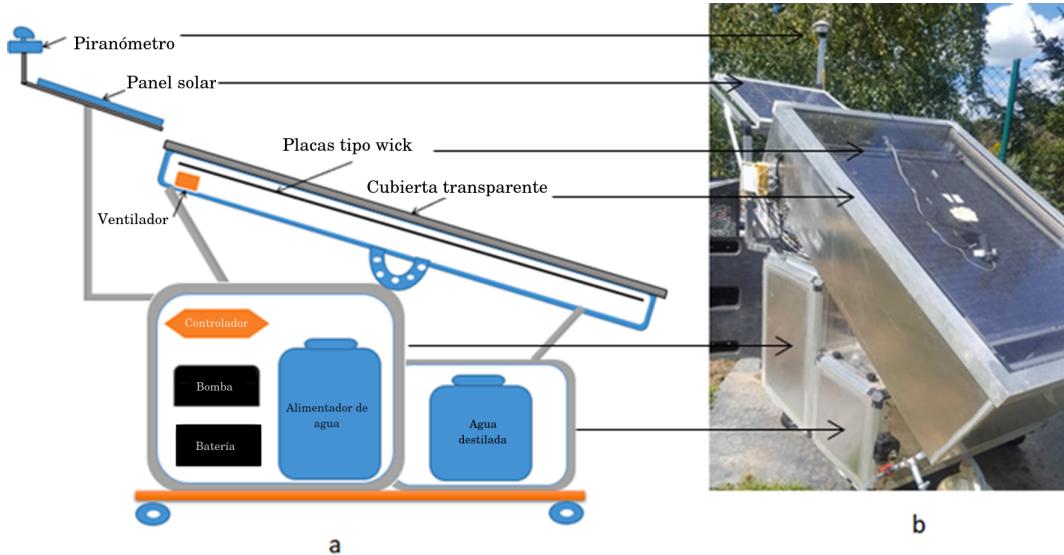


Figura 1.2: Destilador solar de dos cámaras con ventilador

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.

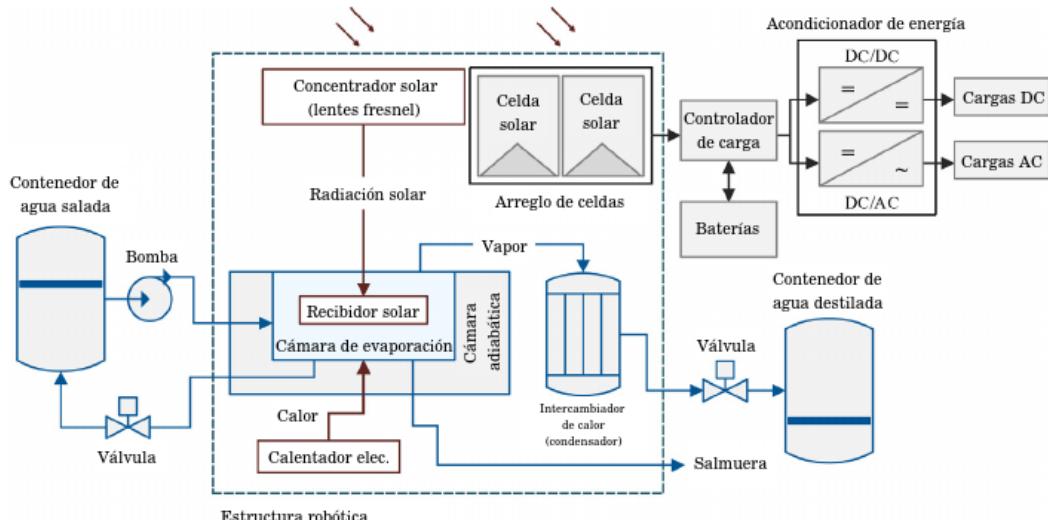


Figura 1.3: Destilador solar activo e híbrido con la incorporación de un calentador eléctrico y lentes de concentración.

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 comprendes 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 facteo 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.
- Construcción 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 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.

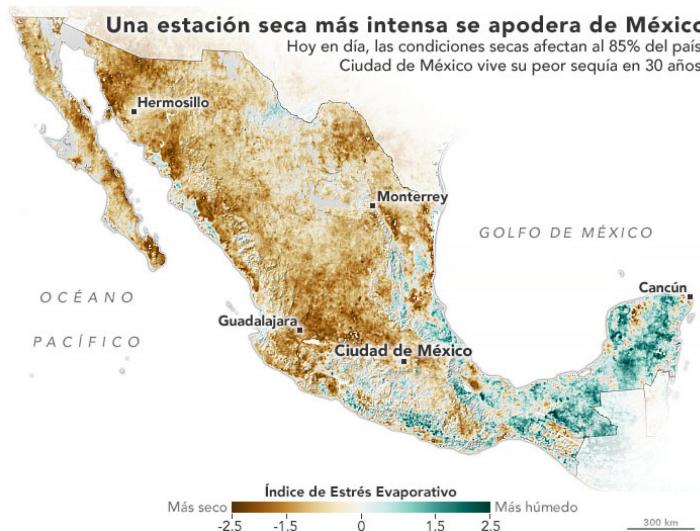


Figura 4.1: Índice de estrés evaporativo

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 implementada 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

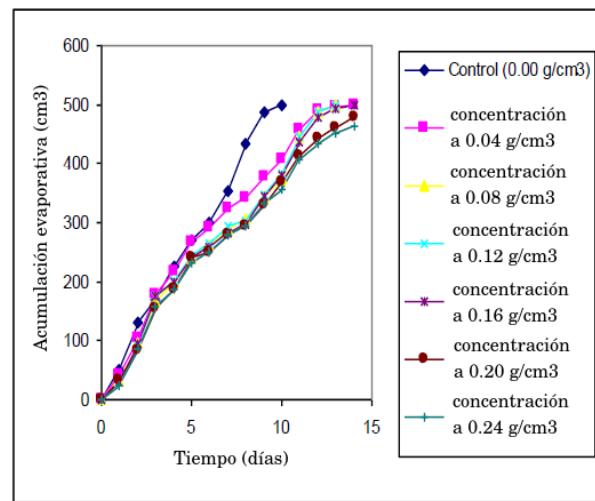


Figura 5.1: Relación entre la evaporación acumulada y el tiempo para la solución NaCl

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

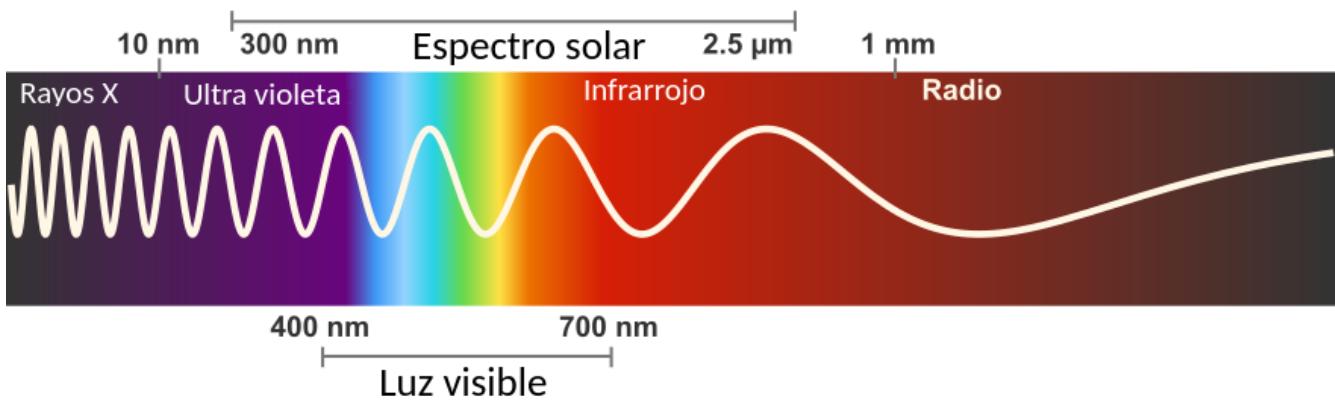
La irradiancia que recibe un objeto es clasificada de acuerdo a las interacciones por las que ese haz de luz pasó antes de llegar a dicho objeto.

- **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.

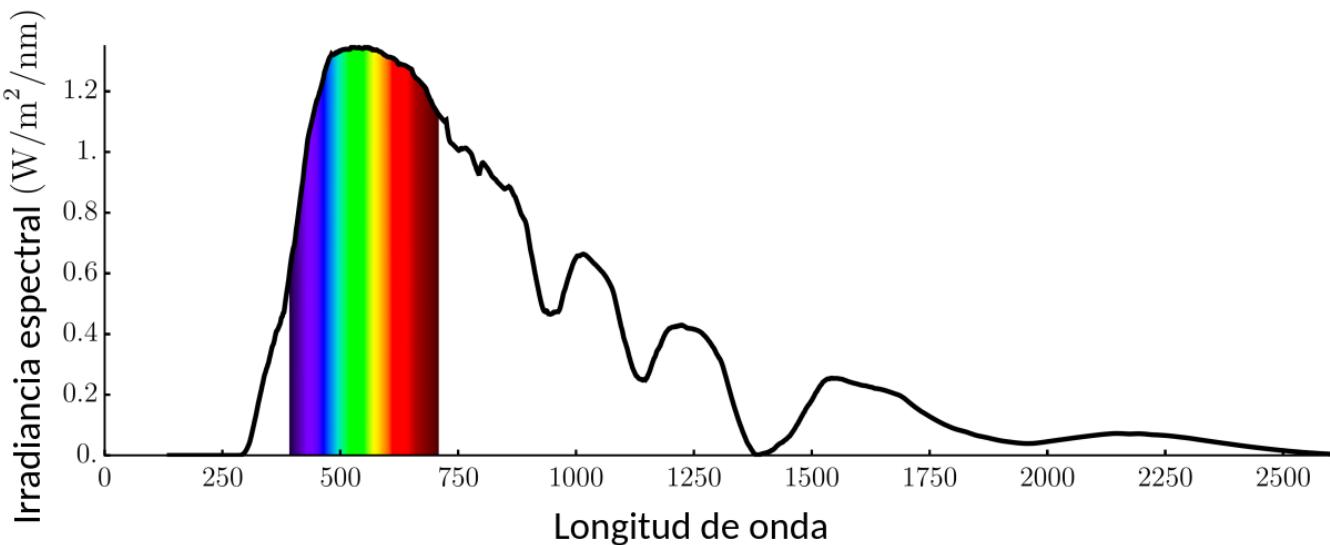
5.2.2. Propiedades espectrales de la radiación solar

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].

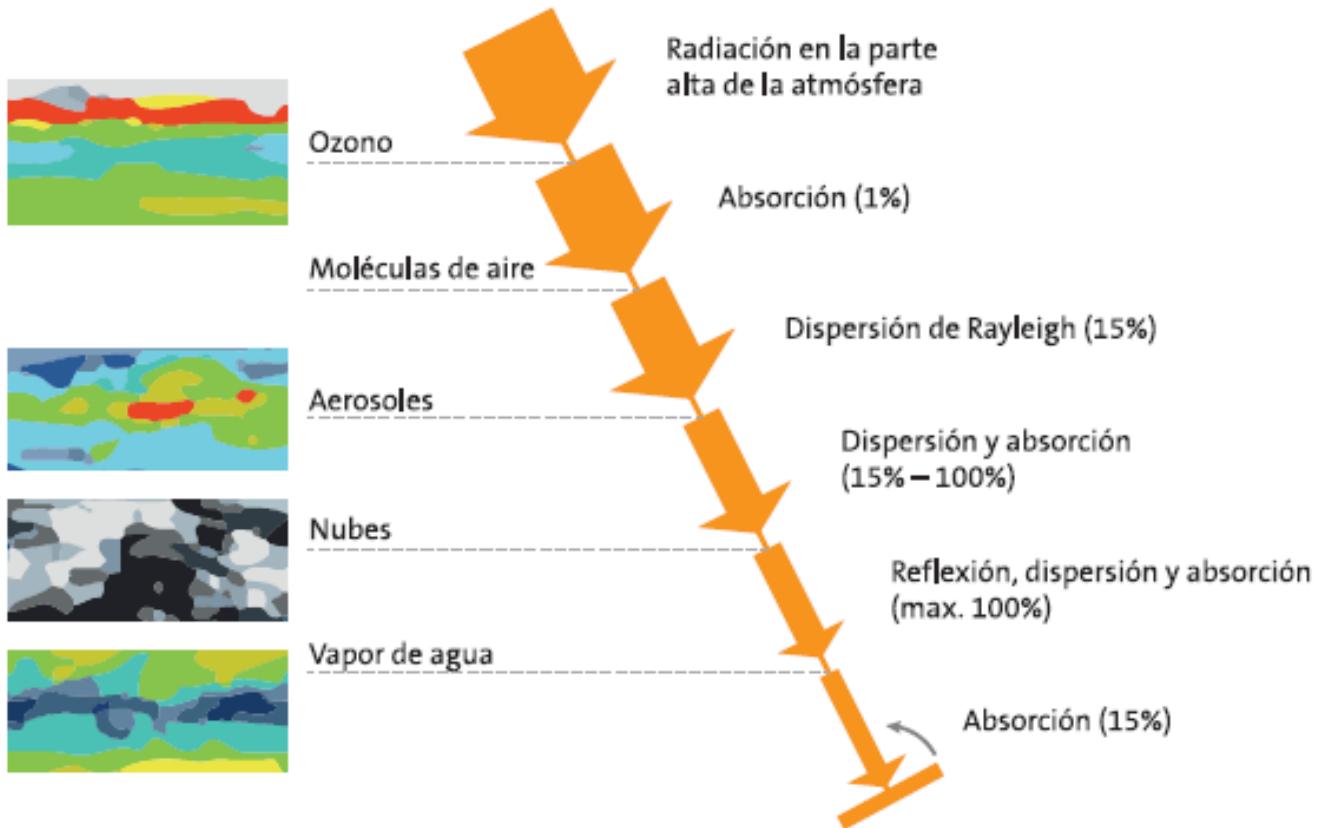


Figura 5.4: Atenuación de la radiación solar por su paso por la atmósfera

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.

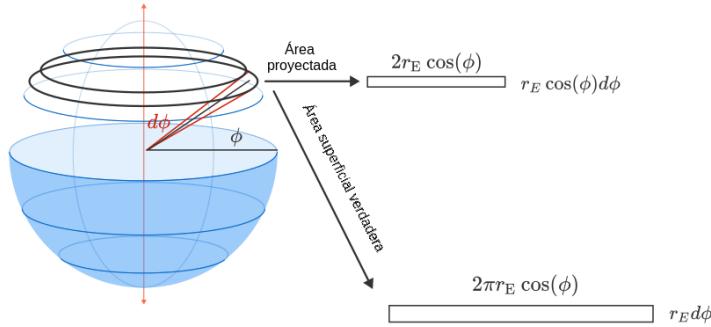


Figura 5.5: Irradiancia solar a latitud ϕ

Imagen traducida de [41]

5.2.3.2. Direccionalidad de la radiación solar

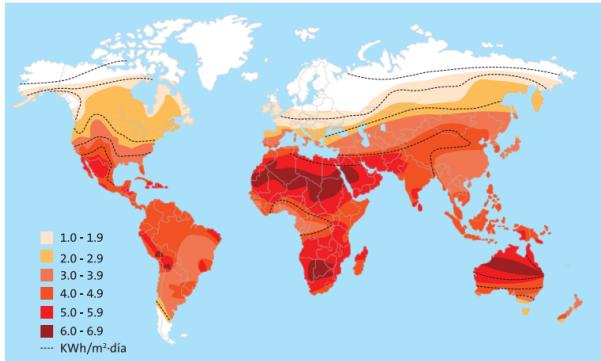
El Sol se proyecta en el cielo como un círculo, no como un punto, haciendo que sea una fuente de luz imperfecta cuyos rayos no son perfectamente colimados ya que vienen con una ligera desviación angular que se puede aproximar mediante (5.4).

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

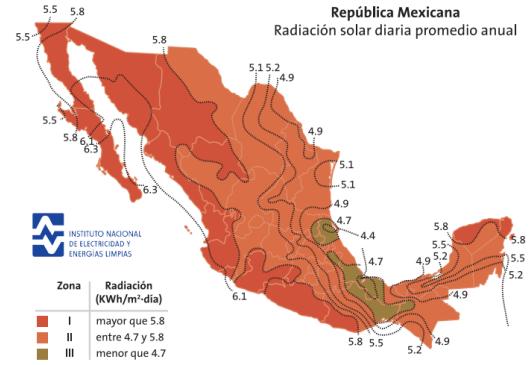
Usando (5.4) se calcula que el ángulo medio de radiación solar es $\theta_s = 0.275^\circ$.

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.

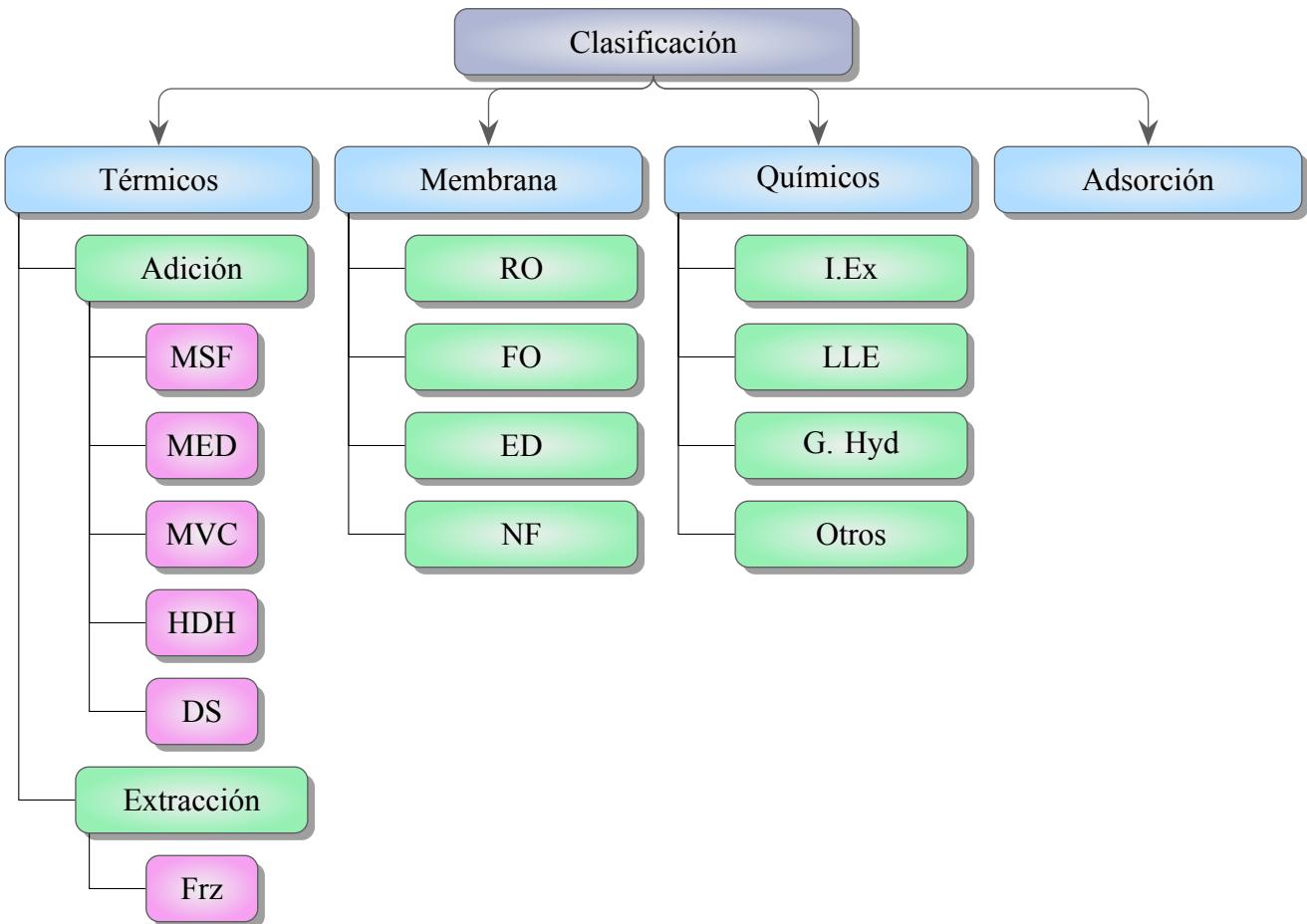


Figura 5.7: Esquematización de los diferentes métodos de desalinización

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].

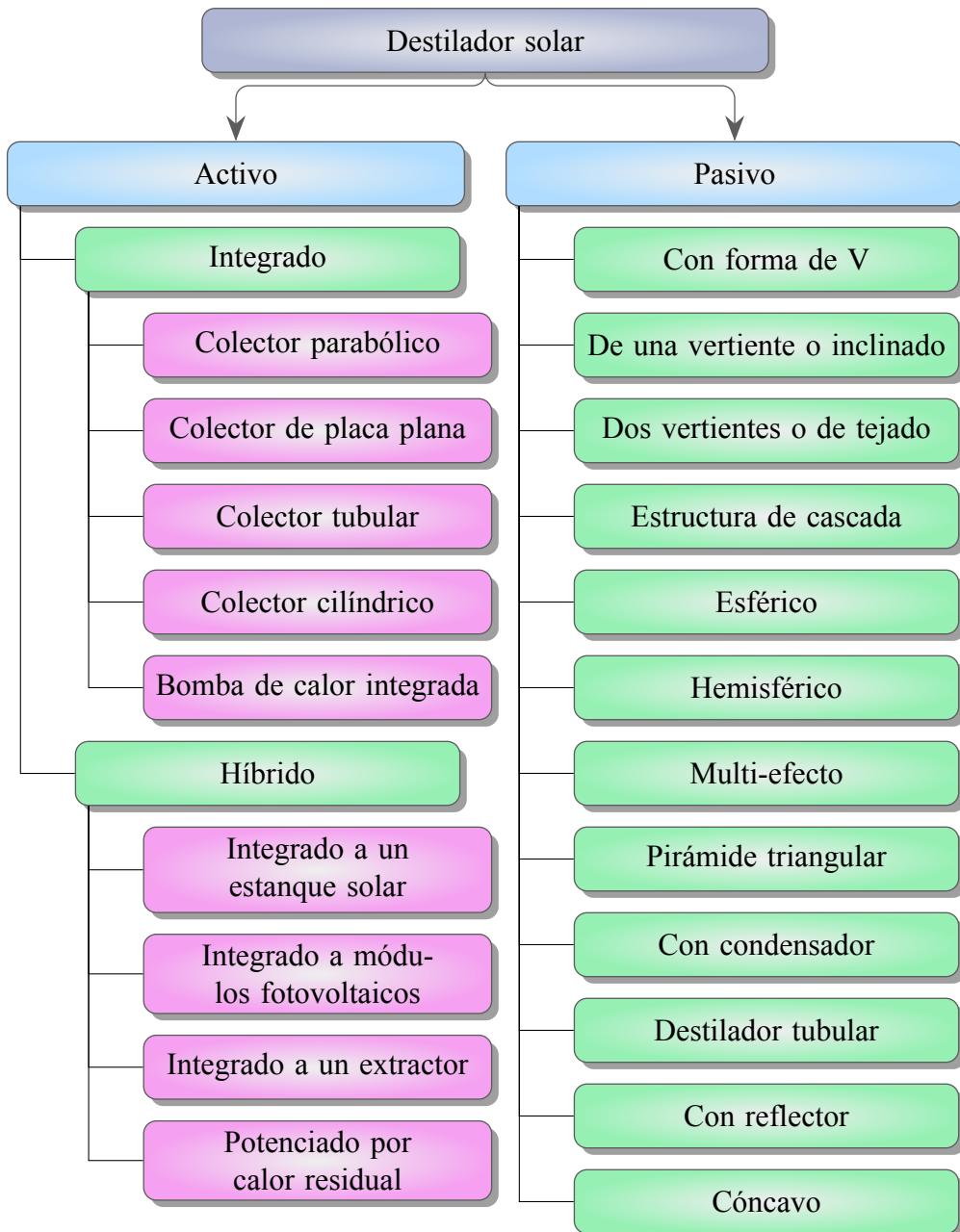


Figura 5.8: Subclasificaciones de la Destilación solar

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

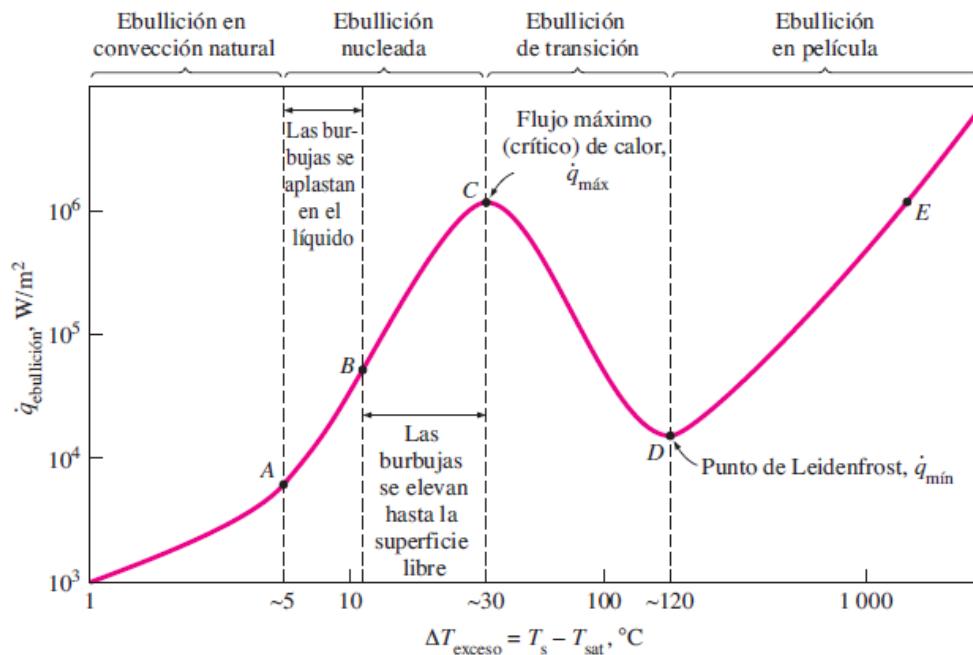


Figura 5.9: Curva típica de ebullición en estanque del agua a 1 atmósfera

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.

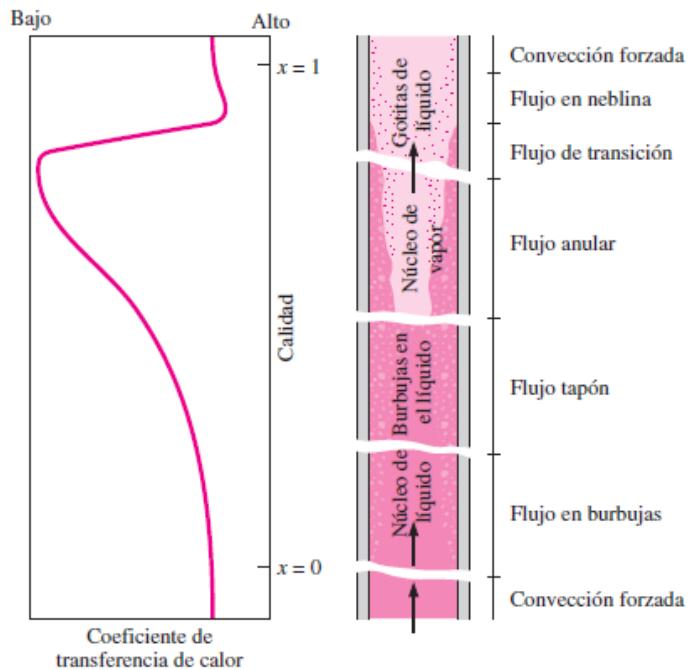


Figura 5.10: Curva típica de ebullición en estanque del agua a 1 atmósfera

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.

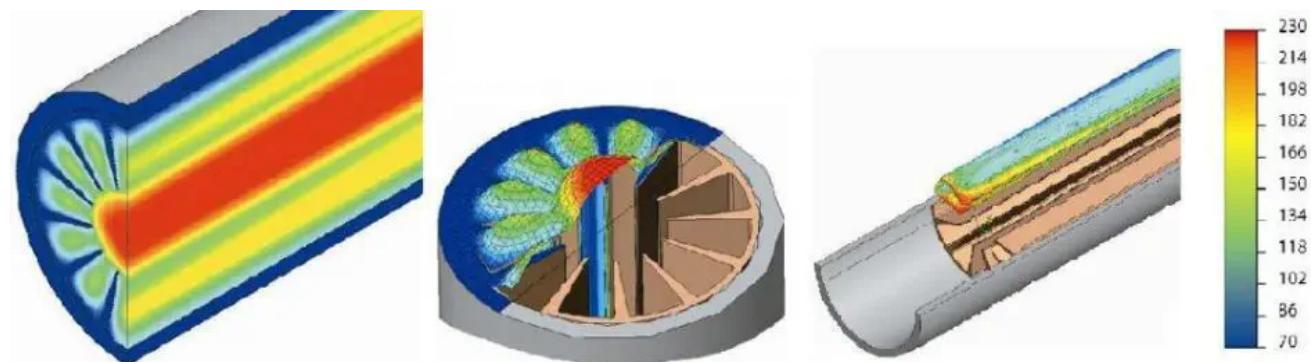


Figura 5.11: Tubo con aletas internas

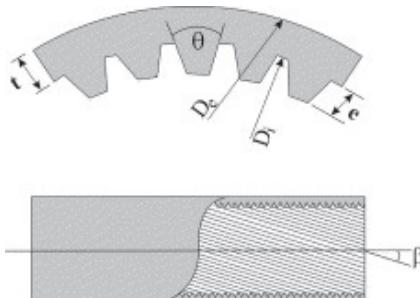
Imagen obtenida de [47]

Tubos microaletados

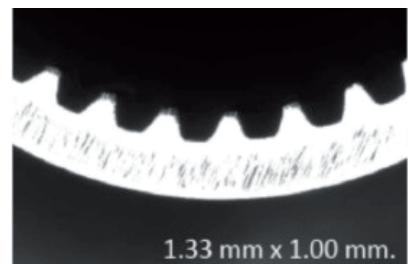
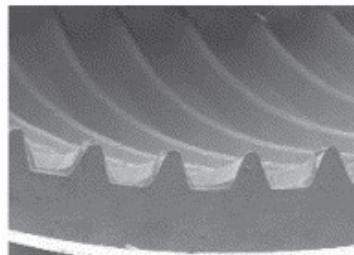
Aunque son tubos usualmente utilizados para la refrigeración y aire acondicionado [48], [49] citados por [46] pudieron mostrar que los incrementos en tubos con microaletas tienen incrementos en el intercambio de calor de 1.6 a 3.2 veces, siendo las causas principales:

- 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**.

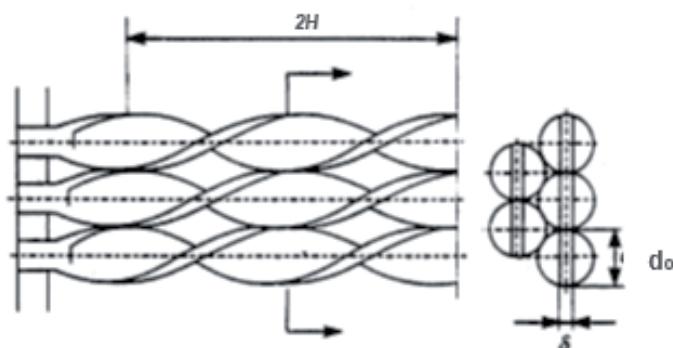


Figura 5.13: Arreglo de cintas torcidas

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}

? Se decidió incluir en el estudio a esta variable dado a que no se sabe con certeza si será necesaria para el futuro desarrollo.

6.2. Descripción de los problemas asociados a la destilación solar

Gracias a una entrevista informal con el Dr. Palomino 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.

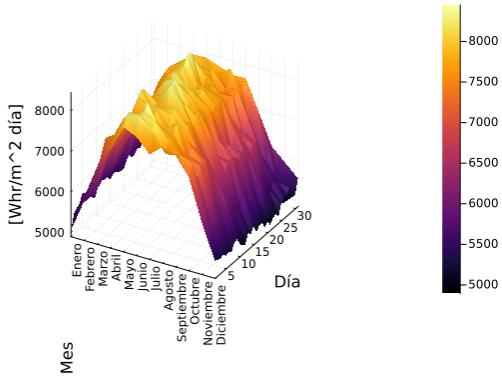
De dicho código se obtuvieron gráficas de área que nos representaban el comportamiento reportado por *The Power LaRC* en intervalos de cada hora.

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 $8 \text{ kWh m}^{-2} \text{ day}^{-1}$.

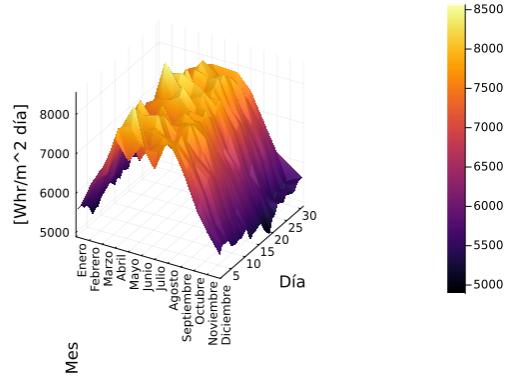
De la fig. 6.1c se observa que la irradiancia se de ROC de interés varía entre los 500 W m^{-2} a 900 W m^{-2} y se aprecia que en mayor proporción se encuentra entre 600 W m^{-2} a 700 W m^{-2} por lo que para los cálculos de operación se decide usar 650 W m^{-2} como valor de irradiancia.

ROC en condiciones de cielo despejado in 2020



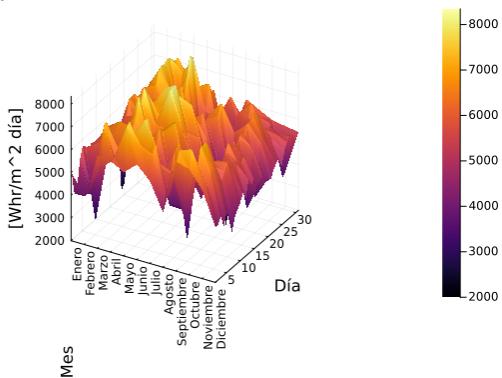
(a) Irradiación de onda corta total recibida por día en condiciones de cielo despejado durante el 2020 sobre el lugar seleccionado

ROC en condiciones de cielo despejado in 2021



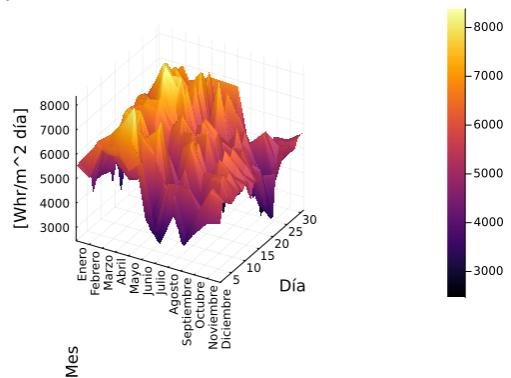
(b) Irradiación de onda corta total recibida por día en condiciones de cielo despejado durante el 2021 sobre el lugar seleccionado

ROC bajo todas las condiciones climáticas in 2020



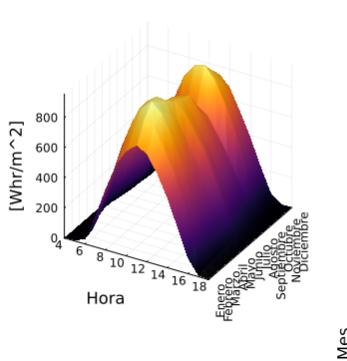
(c) Irradiación de onda corta total recibida por día bajo todas las condiciones climáticas durante el 2020 sobre el lugar seleccionado

ROC bajo todas las condiciones climáticas in 2021



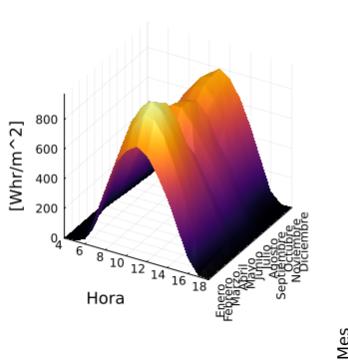
(d) Irradiación de onda corta total recibida por día bajo todas las condiciones climáticas durante el 2021 sobre el lugar seleccionado

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



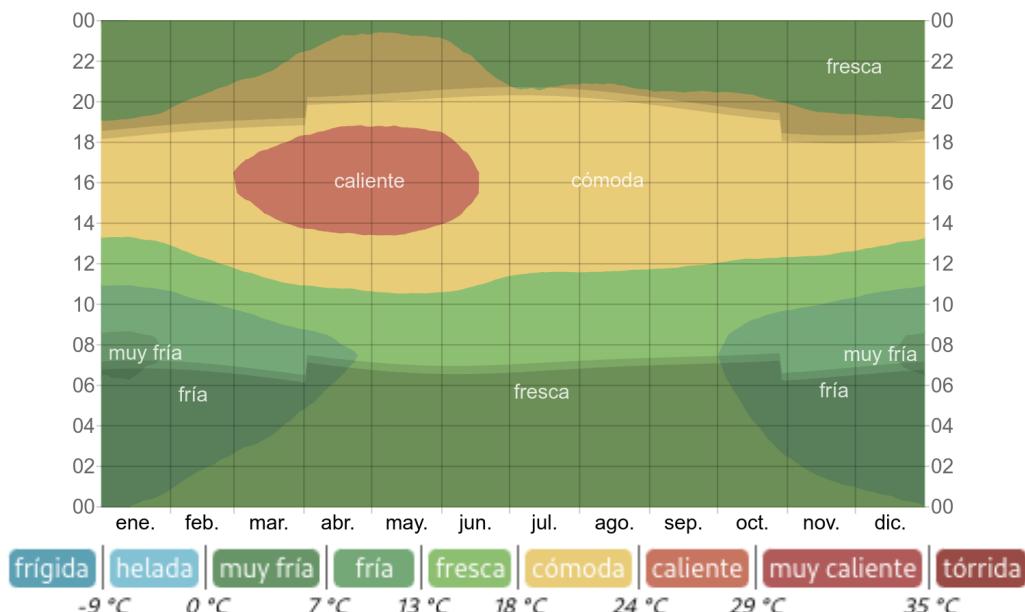
(f) Irradiación de onda corta promedio recibida por hora bajo todas las condiciones climáticas durante el 2021 sobre el lugar seleccionado

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

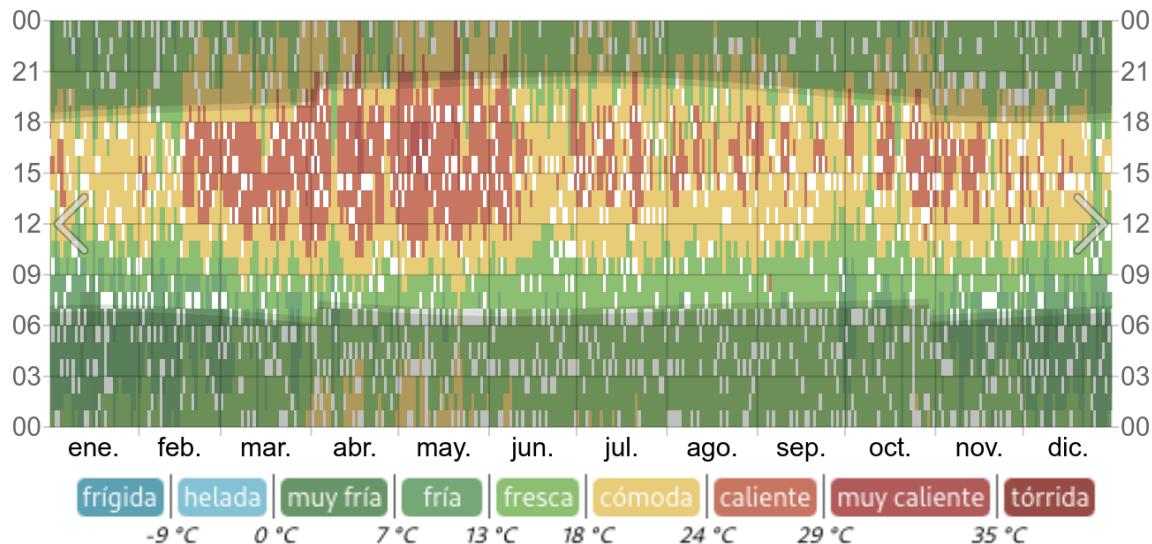
6.3.2. Temperatura

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



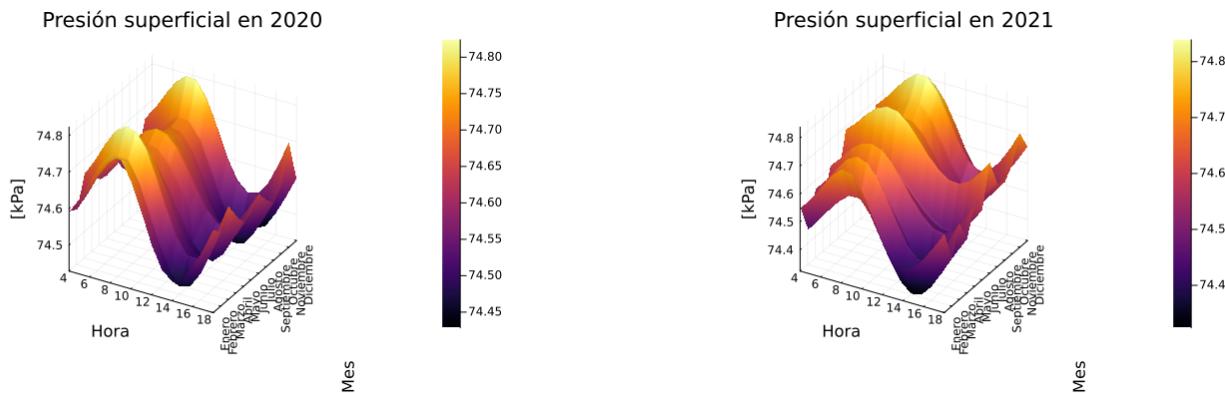
(b) Temperatura por hora del 2022 en la Ciudad de México

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 75 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} .

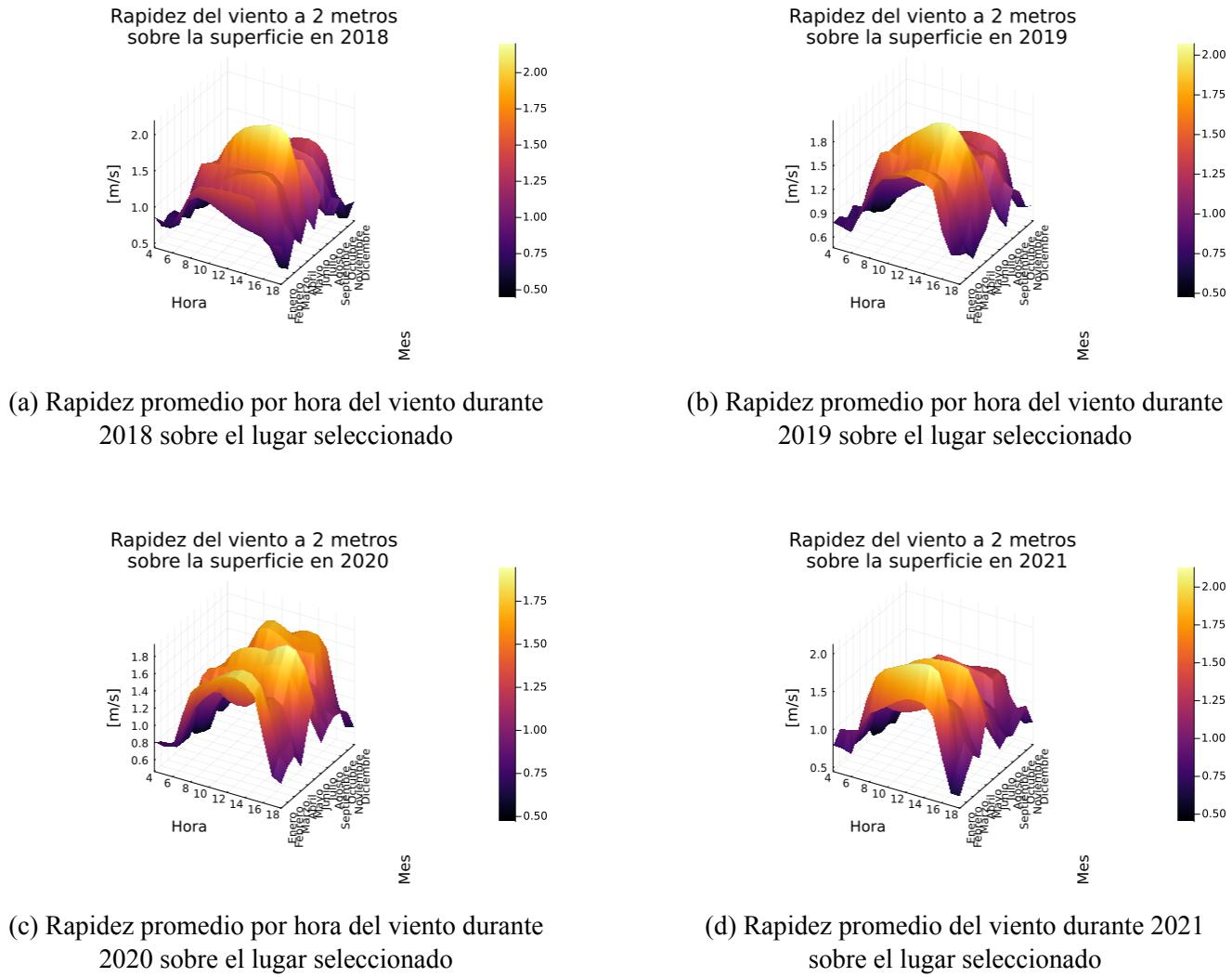


Figura 6.4: Rapidez promedio por hora del viento sobre el lugar seleccionado

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).

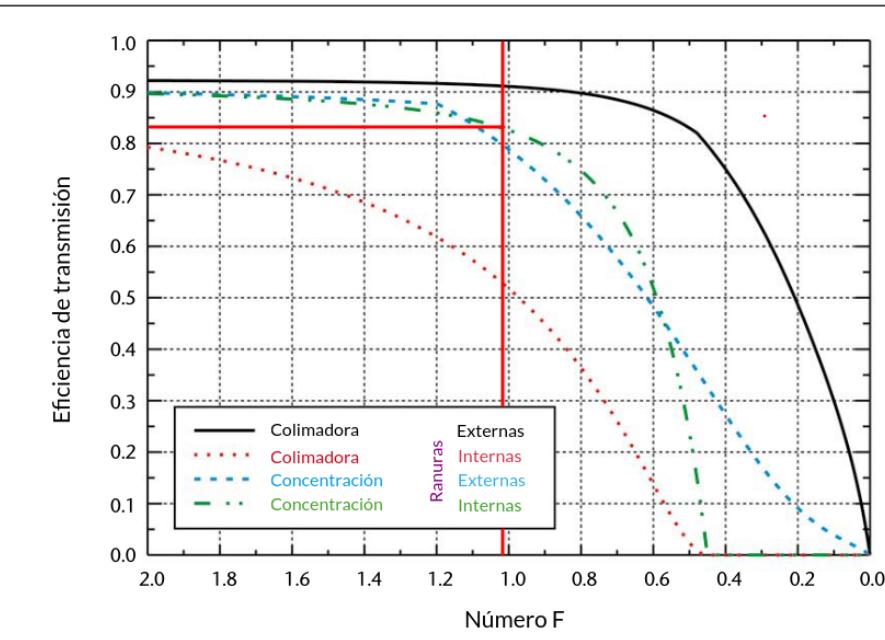


Figura 6.5: Valores de eficiencia idealizados de lentes de Fresnel calculadas en la reflexión de las superficies y otras pérdidas comunes.

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 66.02 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 receptor 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. Para solventar el inconveniente descrito, se aplicará un recubrimiento que potencie sus características como receptor solar usando el principio de selectividad espectral.

Se considera que el recubrimiento de óxido negro resulta ser 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 idóneo.

Este recubrimiento resulta favorable en términos de rendimiento, duración y preservación de propiedades del cobre; a pesar de ello, si no se puede acceder a este recubrimiento, las pinturas negras de uso industrial pueden ser una opción viable.

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

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

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 [53] y [54] 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 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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: aeroigel, fibra de sílice, fibra cerámica.

Tabla 6.8: Propiedades de los materiales aislantes térmicos

Parámetro	Unidades	Aeroigel	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	$^{\circ}\text{C}$	-200 a 1000	-200 a 700	Hasta 1427
Ignífugo	—	Sí	Sí	Sí
Hidrófobo	—	Sí	No	Sí

Como se observa, el aeroigel y la fibra cerámica son excelentes candidatos, la decisión de usar aeroigel 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

Se contempla 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	$^{\circ}\text{C}$	127 a 140
Temperatura de fusión	$^{\circ}\text{C}$	278 a 285

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).

$$\dot{m} = \frac{66.02 \text{ W}}{2493.97 \text{ kJ kg}^{-1}} \quad \dot{m} = 0.026 \text{ g s}^{-1}$$

Se observa que el caudal (1.04 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 $12.54 \text{ mL min}^{-1}$

$$\dot{m} = \frac{43.28 \text{ W}}{[3.9895 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} (94.7^{\circ}\text{C} - 15.5^{\circ}\text{C})]} = 0.21 \text{ g s}^{-1} \quad (6.18)$$

6.4.3.2. Materiales

Se considera que de acuerdo al caudal, una bomba peristáltica sería la opción adecuada ya que permiten trabajar con fluidos altamente agresivos. En la tabla 6.10 se describen algunos modelos encontrados.

*De acuerdo al diámetro de tubo seleccionado

Tabla 6.10: Propiedades de modelos de bombas peristálticas

XFGWFCQM7B		
Parámetro	Unidad	Valor
		Continúa en la siguiente página

Tabla 6.10: Propiedades de modelos de bombas peristálticas (Continuación)

Alimentación	V	12
Caudal mínimo	mL min^{-1}	11 a 80*
Masa	g	82
Tamaño	mm	70 x 60 x 45
Precio aproximado	MXN	180
1 DYNWAVEMX		
Parámetro	Unidad	Valor
Alimentación	V	12
Caudal mínimo	mL min^{-1}	2 a 19*
Caudal máximo	mL min^{-1}	17 a 100*
Masa	g	No hay detalles
Tamaño	mm	30 x 60
Precio aproximado	MXN	211

Para las tuberías se considera que el uso de mangueras de plástico de diámetro exterior de 4 mm o de 3/16 in es suficiente para las partes ajena a la cámara de concentración solar. Para el tramo que toca directamente al recipiente solar se plantea el uso de tubo flexible de cobre. El uso de este material se justifica únicamente durante la caracterización del sistema, ya que la disponibilidad en diámetros es mayor que en el caso de tubos flexibles de acero galvanizado e inoxidable.

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 tabla 6.11.

Tabla 6.11: Propiedades de modelos de extractores

UF3A3-700B		
Parámetro	Unidad	Valor
Alimentación	V	3
Potencia	W	0.29
Caudal	mL min^{-1}	3000
RPM	rpm	17000
Tamaño	mm	10 x 10 x 3
Masa	g	0.91
Protección IP	—	IP58
Precio aproximado	MXN	13.50

Capítulo 7

Resultados

7.1. Diseño del sistema desalinizador

Después de un profundo análisis se logró un diseño modular vertical cuyos componentes principales se pueden observar en el apéndice D. En la fig. 7.1 se puede contemplar el ensamblado propuesto.

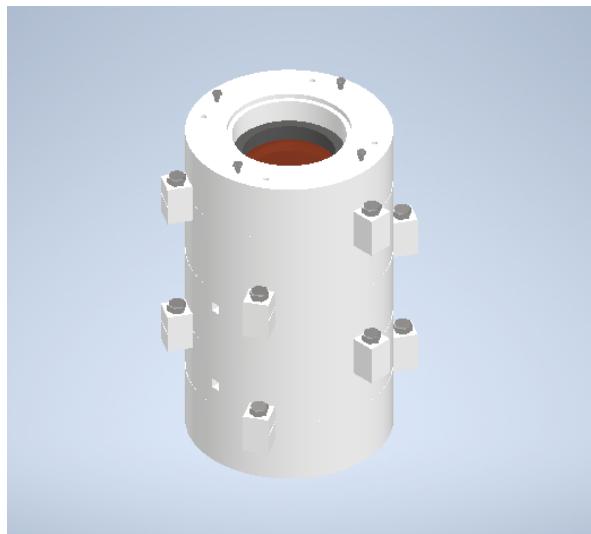


Figura 7.1: Propuesta del sistema desalinizador

En las secciones siguientes se detallarán los elementos que componen a este sistema, para lo cual se debe considerar que en las imágenes siguientes el etiquetado **T** hace referencia a las uniones con tornillos y el etiquetado **A** al espacio designado para el aislante térmico.

7.1.1. Contenedor de agua de mar

Su función básica es contener el agua a desalinizar y servir al mismo tiempo como depósito para la retroalimentación del sistema. Los elementos principales etiquetados en la fig. 7.2 se detallan a continuación: 1) Entrada del suministro de agua. 2) Orificio de succión para la entrada a la bomba peristáltica. 3) Orificio para la tubería conectada a la salida de la bomba peristáltica. 4) Canales de retroalimentación provenientes de la cámara de evaporación.

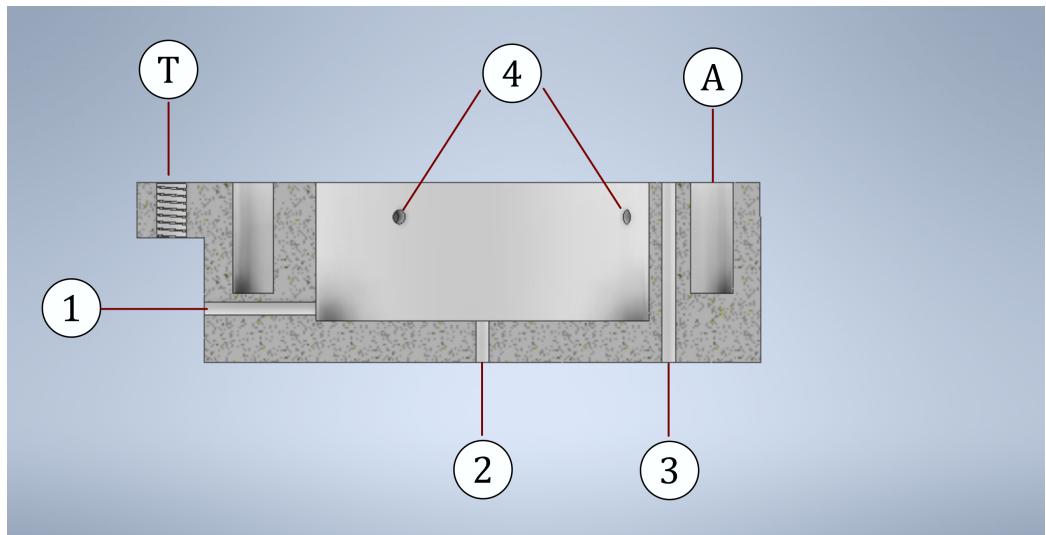


Figura 7.2: Contenedor de agua de mar. Corte 1

7.1.2. Contenedor de agua destilada

Su función básica es contener el agua a desalinizada y promover la condensación del vapor con intercambio de calor entre la misma cámara y la de agua de mar. Los elementos principales etiquetados en las figs. 7.3 y 7.4 se detallan a continuación: 1) Entrada de vapor. 2) Salida de agua altamente salina proveniente de la cámara. 3) Salida de agua destilada. 4) Continuación del canal de alimentación hacia la cámara de concentración. I) Roscado para el intercambiador de calor propuesto.

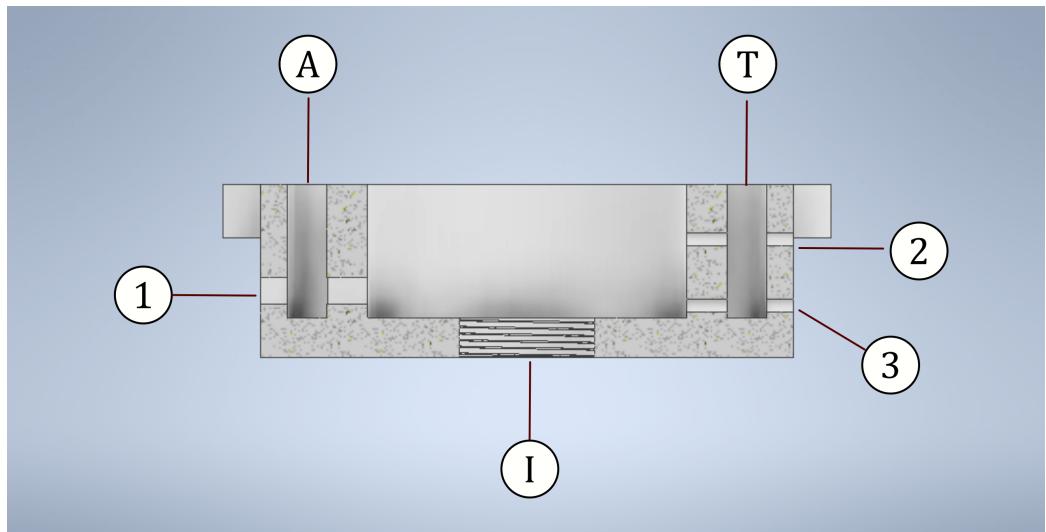


Figura 7.3: Contenedor de agua destilada. Corte 1

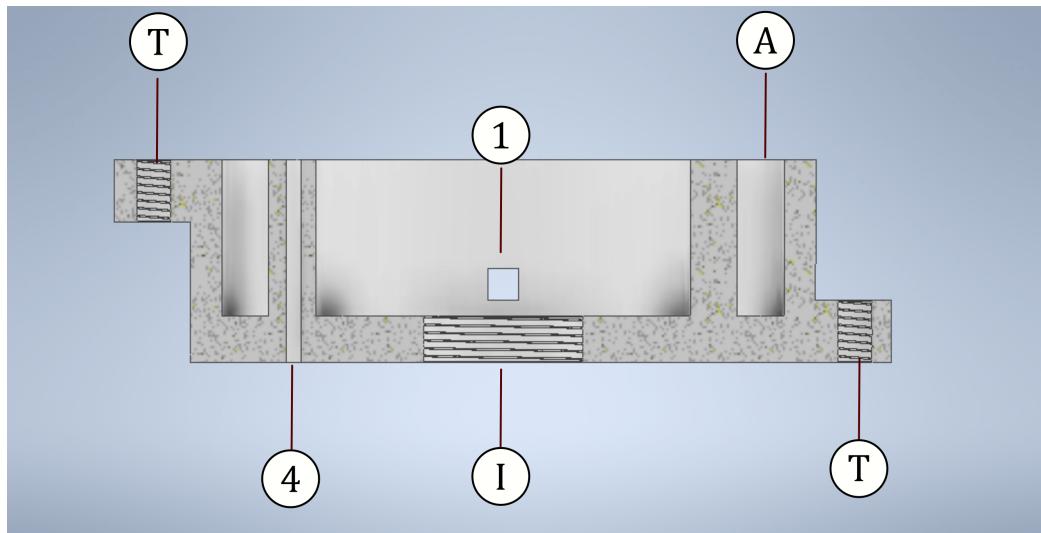


Figura 7.4: Contenedor de agua destilada. Corte 2

Aunque no se observa en los cortes sugeridos, en las paredes de la cámara se encuentra la continuación de los canales de retroalimentación entre la cámara de evaporación y la cámara de agua de mar. Los detalles se pueden observar en el dibujo isométrico disponible en el apéndice D.

7.1.3. Cámara de evaporación

Su función básica es favorecer el proceso de evaporación aumentando el área superficial por unidad de volumen del agua de mar a su vez de mantener retroalimentación por gravedad hacia la cámara de agua de mar. Los elementos principales etiquetados en las figs. 7.5 y 7.6 se detallan a continuación: 1) Salida de agua altamente salina 2) Continuación del canal de alimentación hacia la cámara de concentración. 3) Salida de vapor hacia la cámara de condensado. D) Canales de desagüe para evitar la acumulación de agua salina.

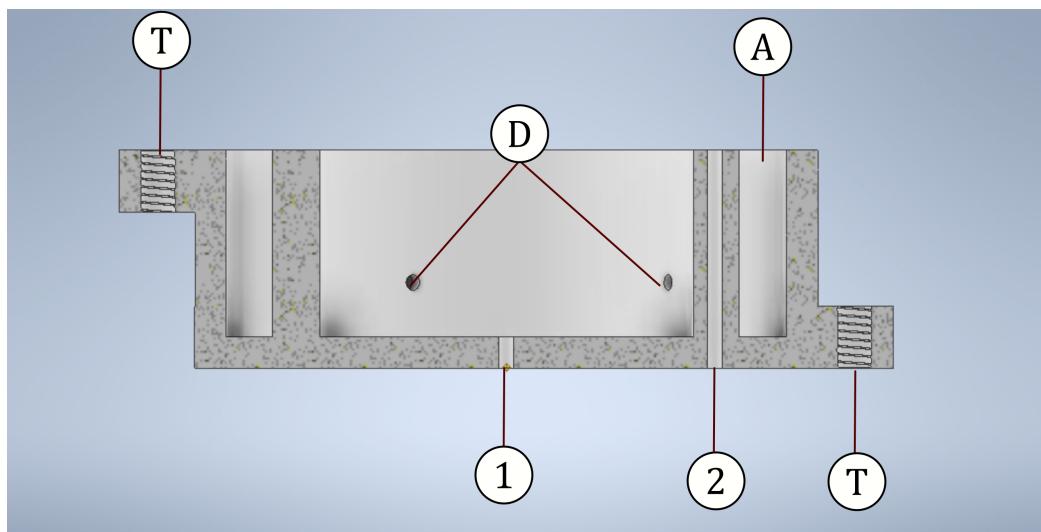


Figura 7.5: Cámara de evaporación. Corte 1

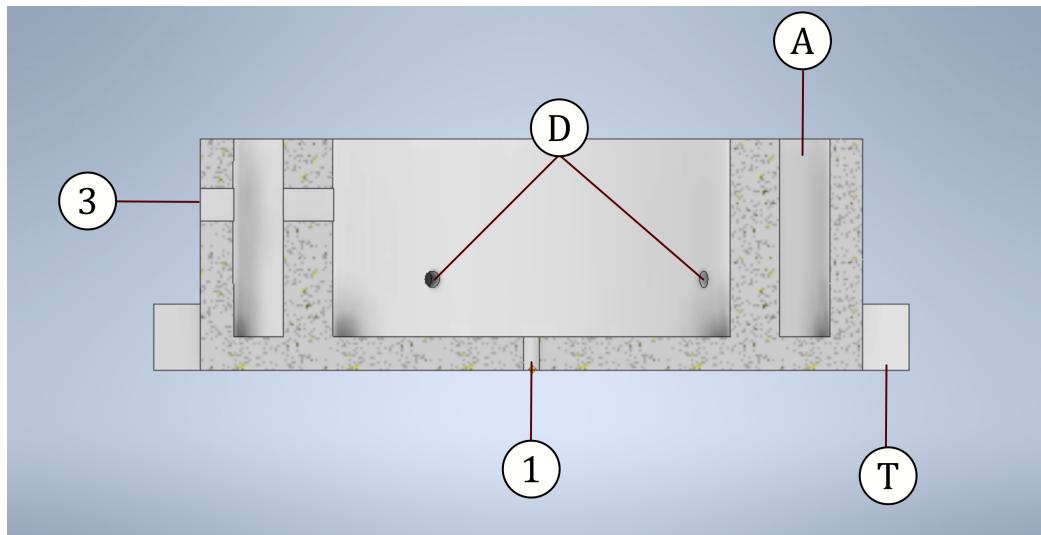


Figura 7.6: Cámara de evaporación. Corte 2

7.1.4. Cámara de concentración

7.1.4.1. Parte inferior

Su función básica es favorecer el proceso de evaporación aumentando el área superficial por unidad de volumen del agua de mar a su vez de mantener retroalimentación por gravedad hacia la cámara de agua de mar. Los elementos principales etiquetados en las figs. 7.7 y 7.8 se detallan a continuación: 1) Entrada del agua de mar. 2) Salida del agua de mar.

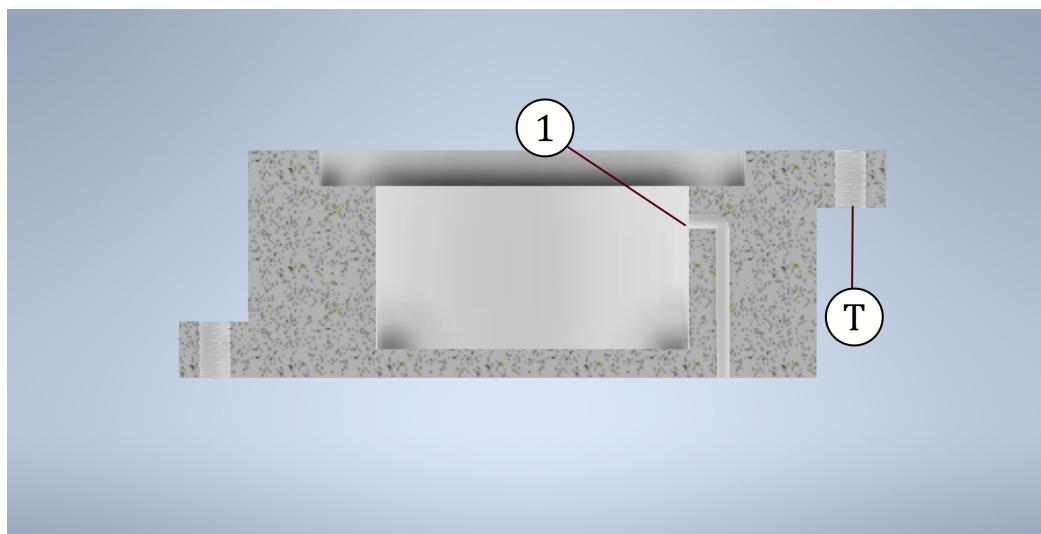


Figura 7.7: Cámara de concentración; parte inferior. Corte 1

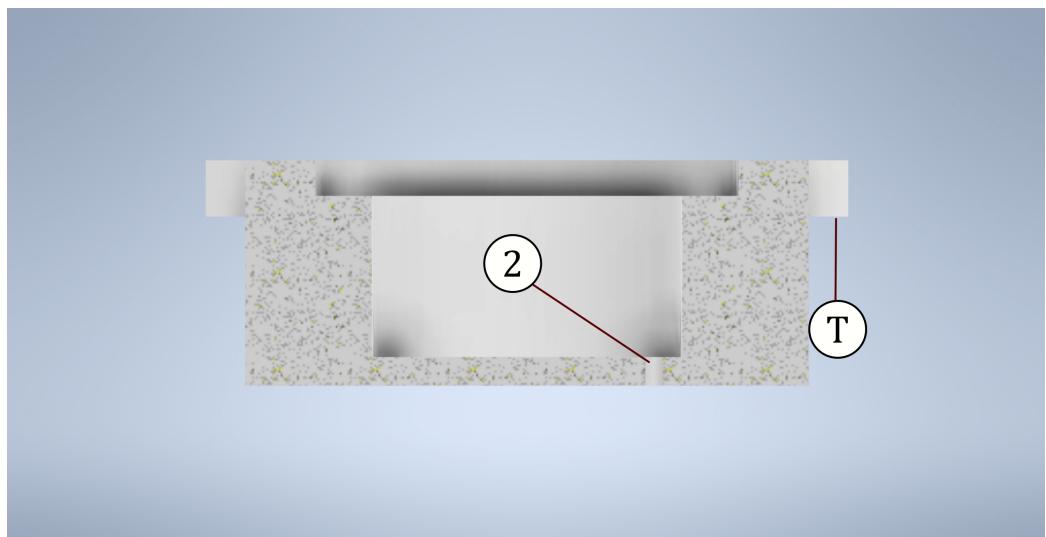


Figura 7.8: Cámara de concentración; parte inferior. Corte 2

7.1.4.2. Parte superior

La parte superior de la cámara de concentración consta de la tapa que ayuda a la de sujeción del cristal de cuarzo y el recibidor solar. Estos se unen a la cámara inferior

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 [55], [56].

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

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

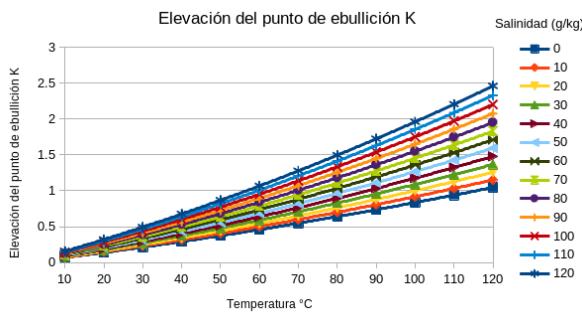
T [°C]	Salinidad												
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	2500.9	2475.9	2450.9	2425.9	2400.9	2375.9	2350.8	2325.8	2300.8	2275.8	2250.8	2225.8	2200.8
10	2477.2	2452.5	2427.7	2402.9	2378.1	2353.4	2328.6	2303.8	2279	2254.3	2229.5	2204.7	2180
20	2453.6	2429	2404.5	2379.9	2355.4	2330.9	2306.3	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}

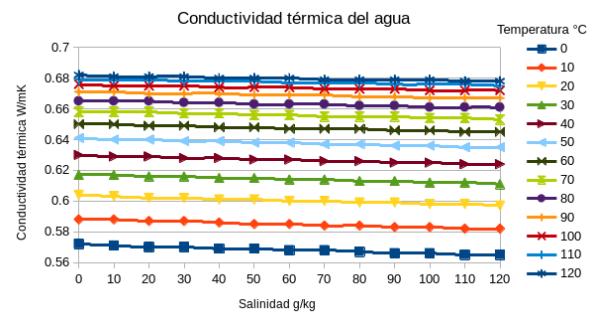
Tabla A.4: Calor específico del agua según su salinidad

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-HillHigher 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

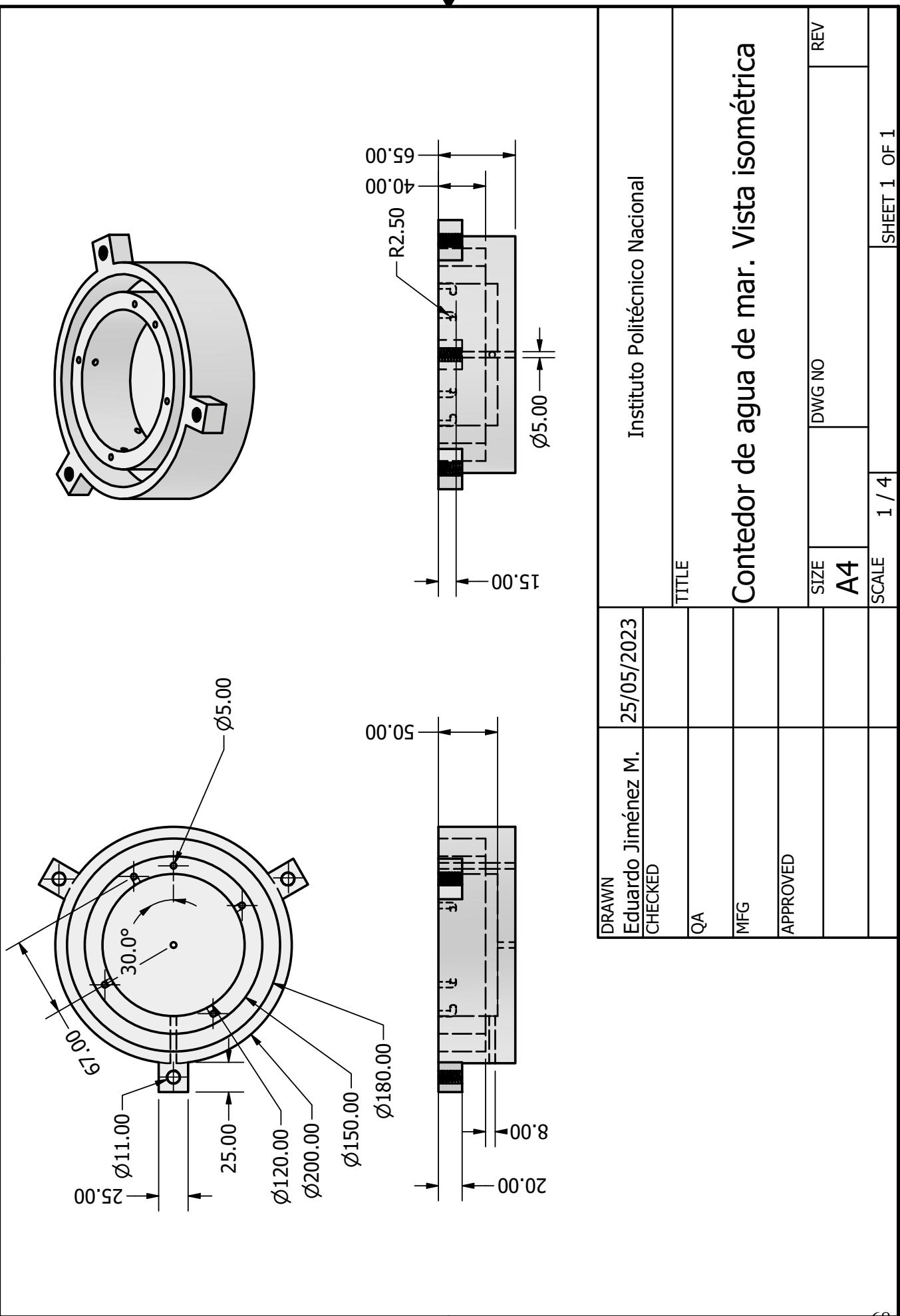
```

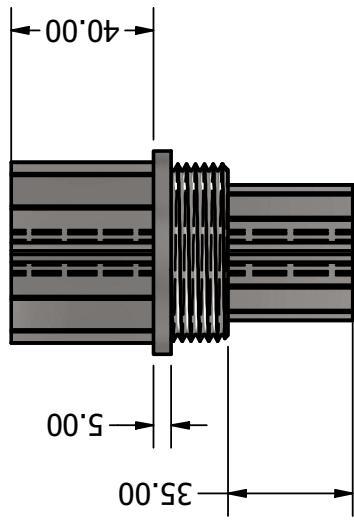
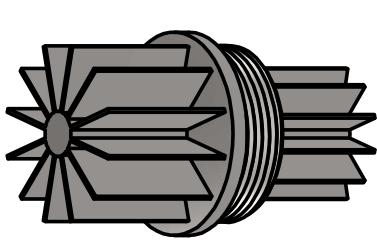
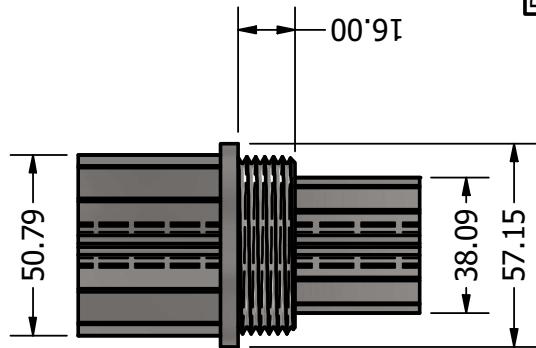
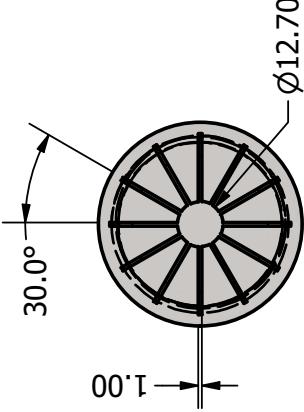
```
    end  
end  
end
```

Apéndice D

Dibujos isométricos del sistema propuesto

Nota importante: Aunque los esquemas fueron dibujados sobre una hoja A4, los aquí mostrados fueron redimensionados al tamaño del papel de impresión. Por favor tome en cuenta el factor extra que se debe aplicar a la escala.



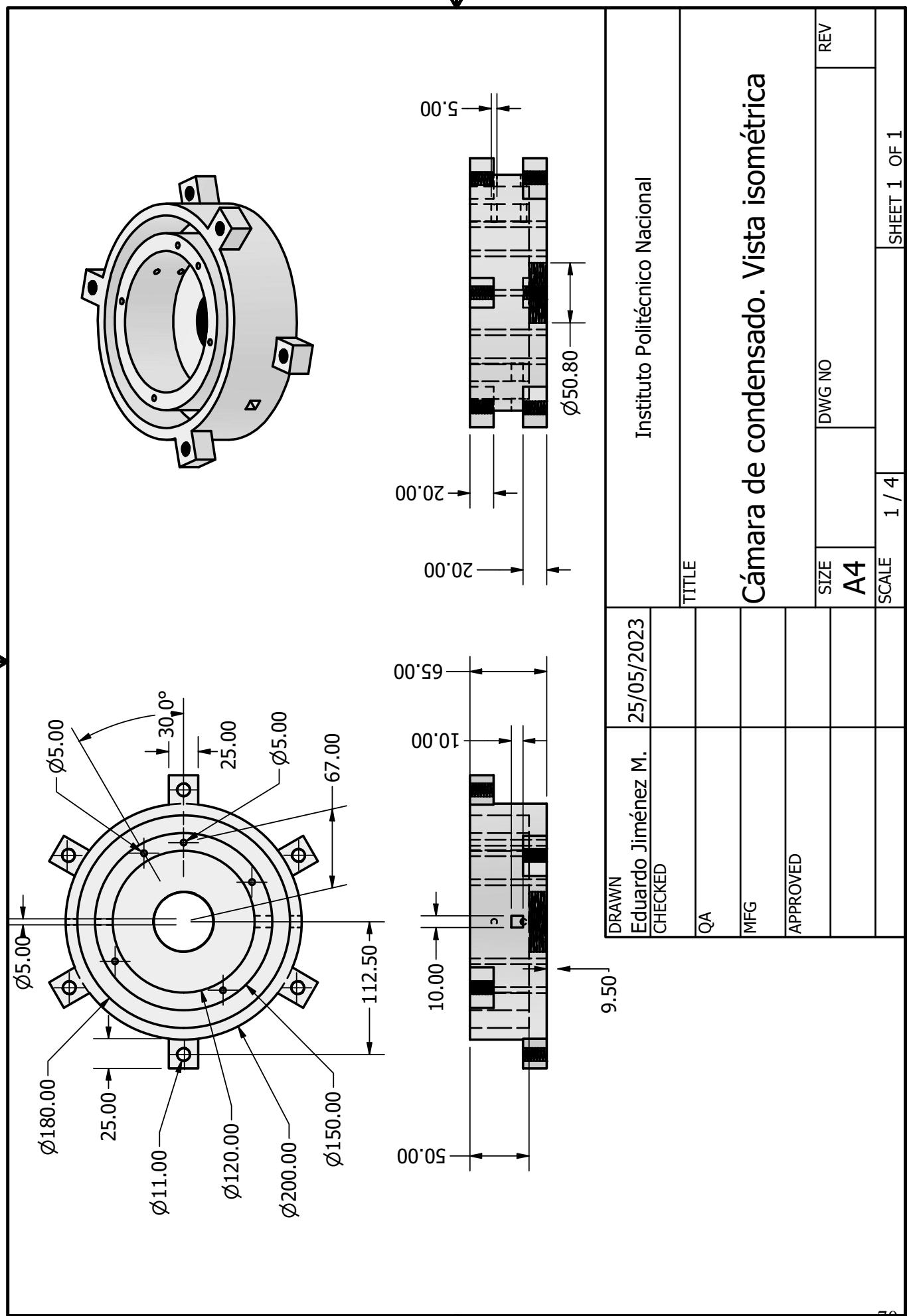


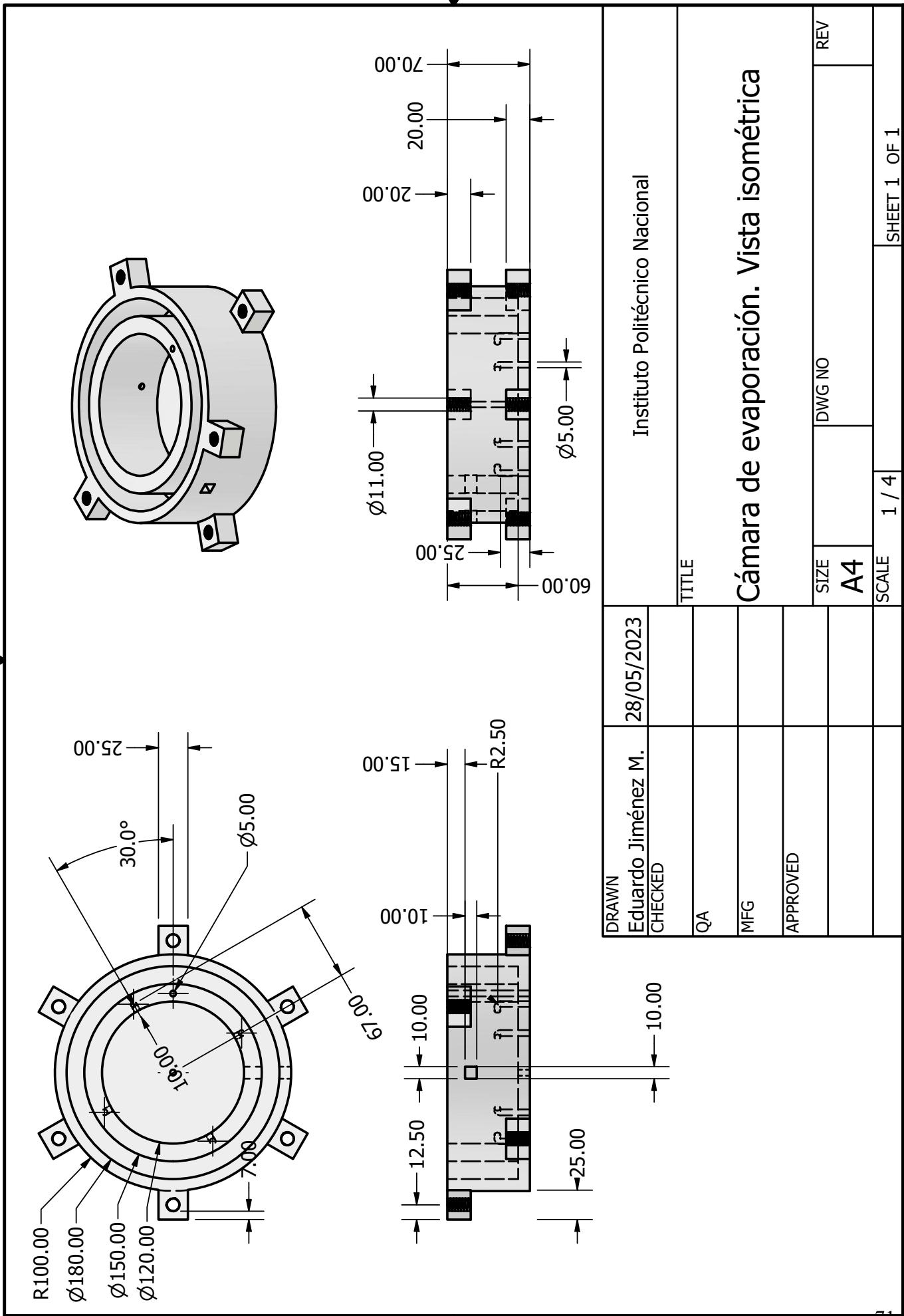
DRAWN
Eduardo Jiménez M.
CHECKED
28/05/2023

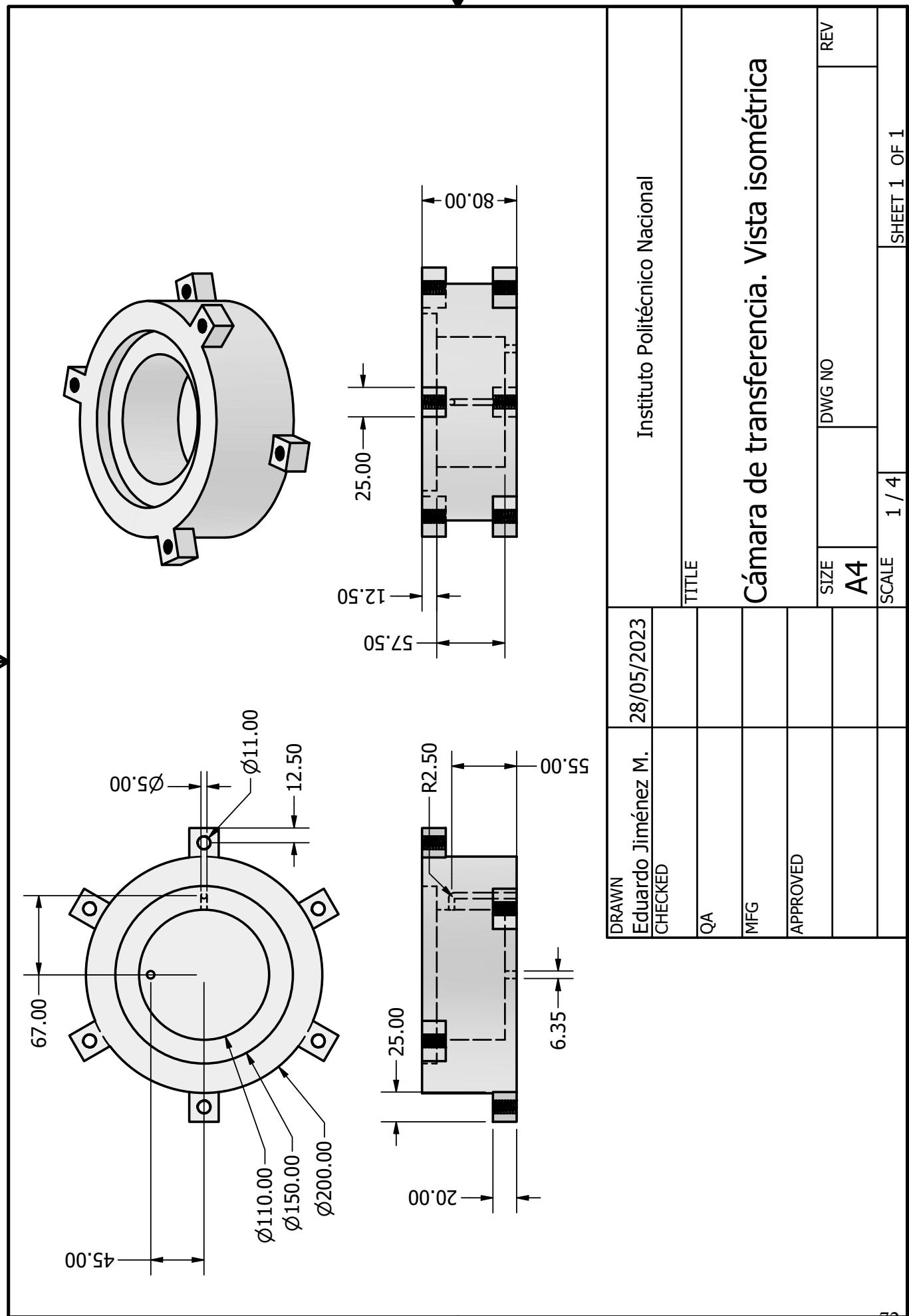
Instituto Politécnico Nacional
TITLE
QA
MFG
APPROVED

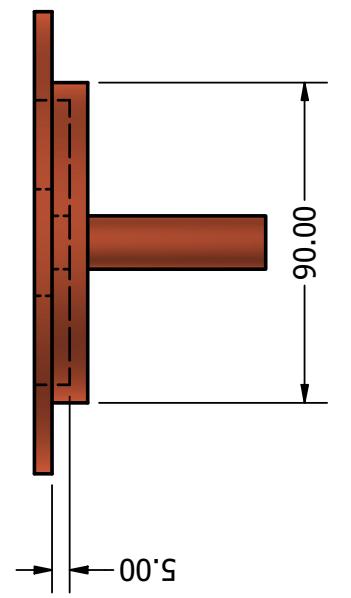
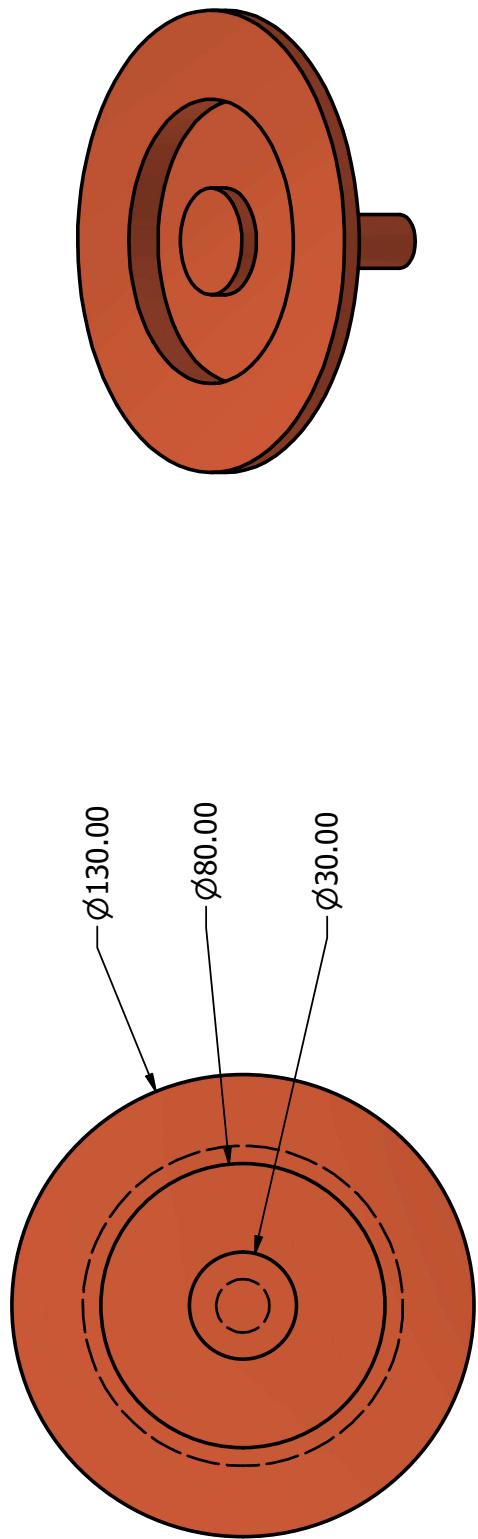
Intercambiador de calor. Vista isométrica

SIZE	DWG NO	REV
A4	1 / 2	









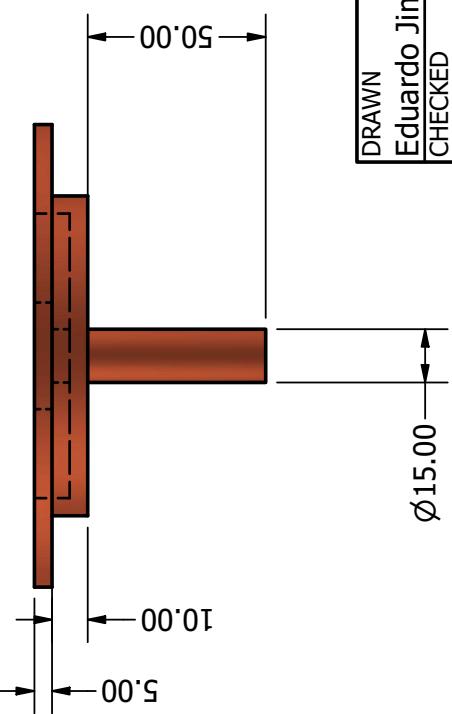
DRAWN	Eduardo Jiménez M.	28/05/2023
CHECKED		
QA		
MFG		
APPROVED		

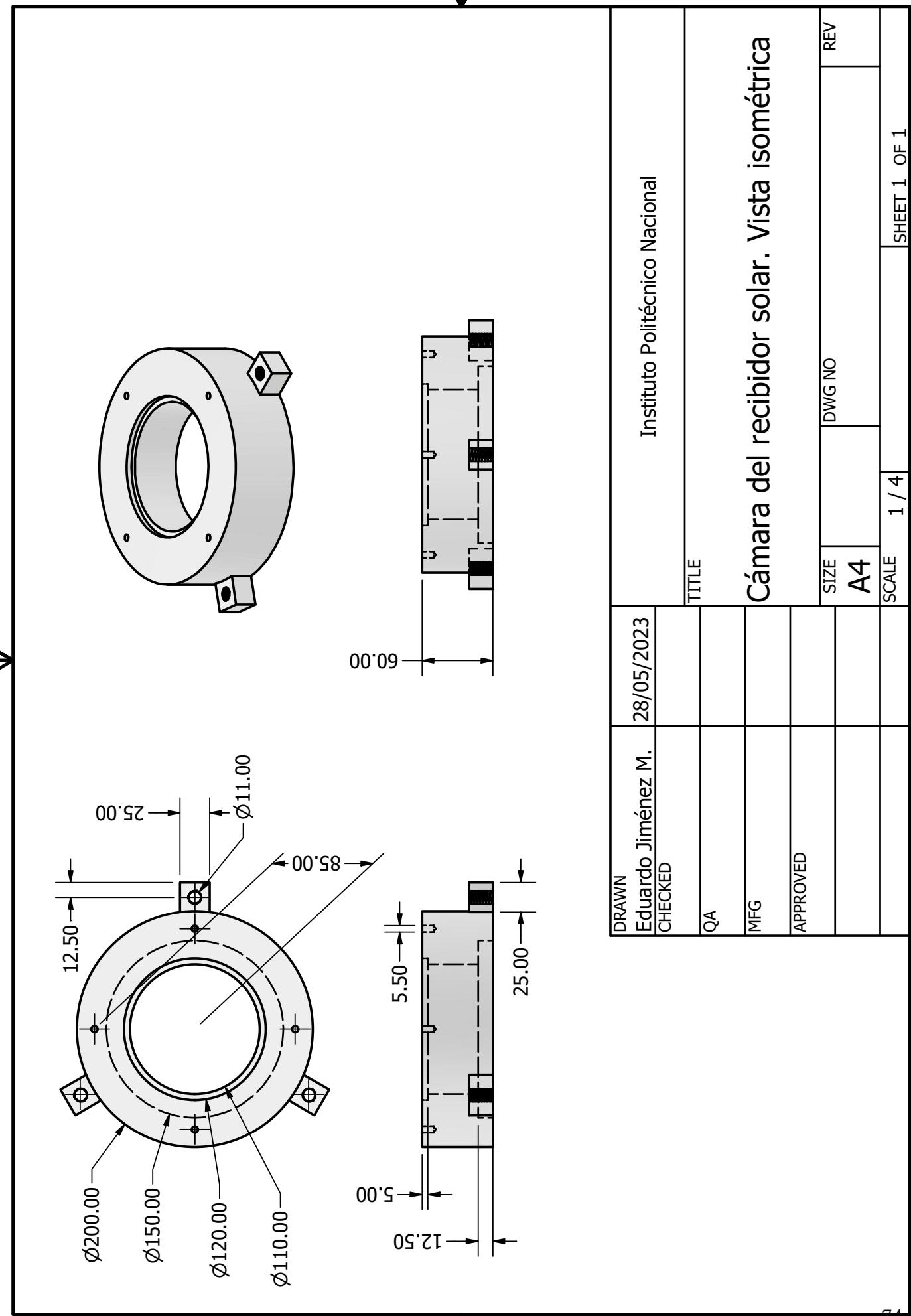
Instituto Politécnico Nacional

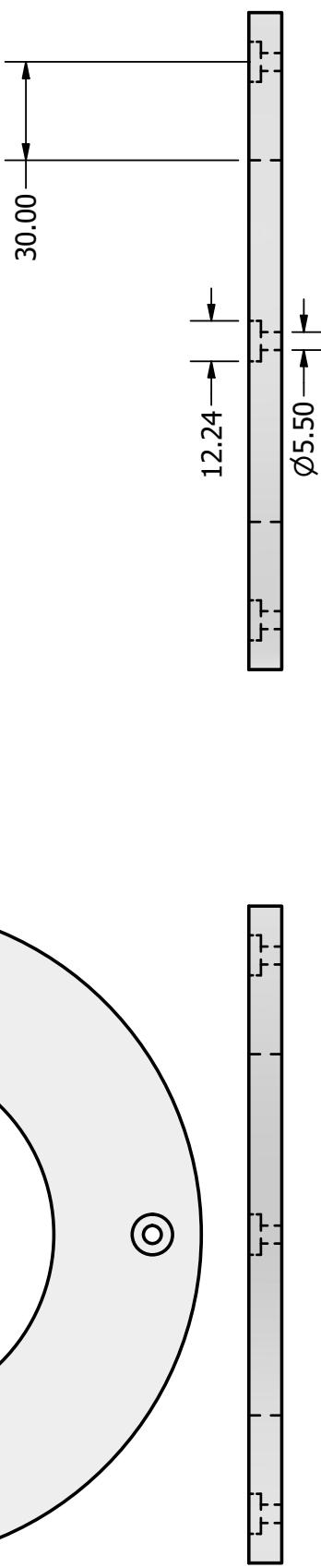
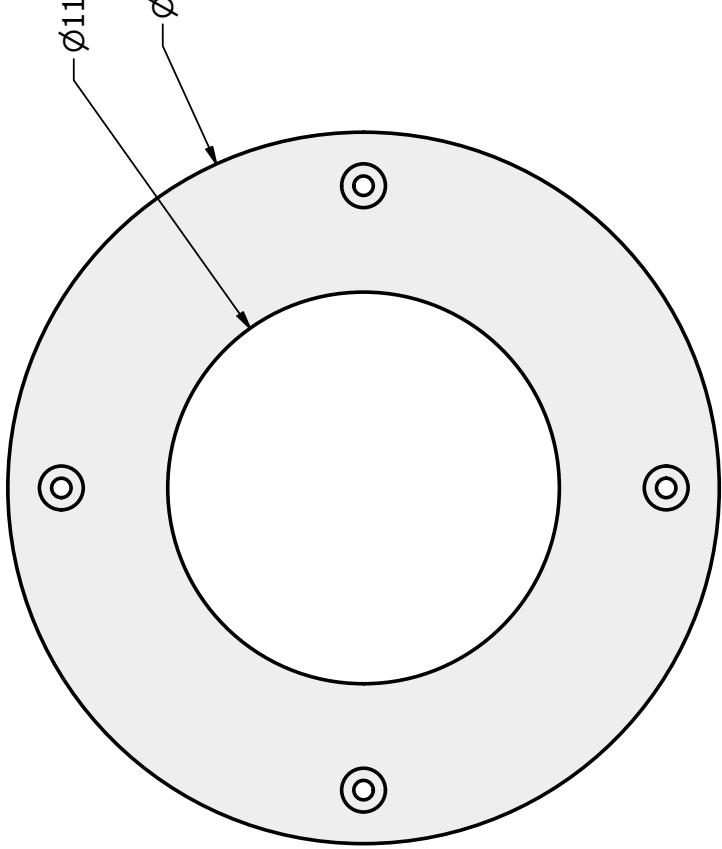
TITLE

Absorbedor solar. Vista isométrica

SIZE	DWG NO	REV
A4	absorbedor	
SCALE 1 / 2		SHEET 1 OF 1







DRAWN	Eduardo Jiménez M.	28/05/2023
CHECKED		
QA		
MFG		
APPROVED		

TITLE

**Tapa de la cámara del receptor solar. Vista
isométrica**

SIZE	SCALE	DWG NO	REV
A4	1 / 2		SHEET 1 OF 1