

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

CONCENTRACIÓN DE UNA SALMUERA APLICANDO ENERGÍA SOLAR PARA LA EXTRACCIÓN DE LITIO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA:

RICARDO CHAPERO SILVERIO

TUTOR: DR. FAUSTINO JUÁREZ SÁNCHEZ SUPERVISORA TÉCNICA: MCI. ADRIANA ELIZABETH GONZÁLEZ CABRERA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2024



Universidad Nacional Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: FAUSTINO JUÁREZ SÁNCHEZ
VOCAL: JUAN MANUEL DE LA ROSA CANALES
SECRETARIO: BENJAMÍN BELTRÁN FRAGOSO
1er. SUPLENTE: WIENER FERNANDO CRUZ MÉNDEZ
2° SUPLENTE: ANDRÉS VELA AVITUA

Sitio donde se desarrolló el tema:

INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Faustino Juárez Sánchez

SUPERVISORA TÉCNICA

MCI. Adriana Elizabeth González Cabrera

SUSTENTANTE:

Ricardo Chapero Silverio

RESUMEN

El presente trabajo prende demostrar la implementación de destiladores solares en procesos de concentración por evaporación de salmueras de litio, de manera que el agua que se recupera por la condensación sea reutilizada en el proceso subsecuente de purificación de Li₂CO₃, de manera que sea sustentable. Para este estudio, el domo D, que posee una altura de 39 cm y un diámetro de 21.5 cm, logró destilar 300 ml de agua, con una recuperación del 70 % y una eficiencia energética del 20.13 %. Este domo se destacó como el más eficiente entre los cuatro domos analizados.

For the Glory of Mankind -YoRHa

AGRADECIMIENTOS

A Dorian C. especialmente porque ser quien me ha mantenido con la meta fija desde que comencé la carrera, motivándome a seguir adelante y cumplir mi promesa.

A mis padres Ricardo C. y Erika S. por la inmensurable labor que han hecho para que haya logrado llegar hasta este momento de mi trayectoria académica.

A mi tío Manuel S. y mi padrino Jaime R. quienes me han apoyado desde pequeño y me han tratado como si fuera su hijo.

A mis amigos, en especialmente a Jafet O., Steve M. y Brandhon R. por todos sus buenos aportes en mi desarrollo personal, desde física hasta mentalmente.

Al departamento de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, que me acogieron e hicieron muy amena mi estancia en el desarrollo del tema de tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	
AGRADECIMIENT	OS
ÍNDICE	
ABREVIATURAS	Y SÍMBOLOSVII
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	
OBJETIVO GENER	RAL2
OBJETIVOS PART	TICULARES2
CAPITULO 1. EL L	ITIO: GENERALIDADES
1.1 PROPIEDAD	DES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL LITIO
1.2 YACIMIEI	NTOS DE LITIO
1.3 PERFIL D	DEL LITIO EN MÉXICO
CAPITULO 2. ENE	RGÍA SOLAR
2.1 ENERGÍA	SOLAR EN MÉXICO15
3.1 TIPOS DE	E DESTILADORES SOLARES PASIVOS17
3.2 TRANSFE	ERENCIA DE ENERGÍA21
CAPITULO 4: PRC	DCESO INDUSTRIAL
4.1 EVAPOR	ACIÓN DE SALMUERAS27
4.2 PURIFICA	ACIÓN DEL Li ₂ CO ₃
4.3 MERCAD	O DEL LITIO
CAPÍTULO 5: MET	TODOLOGÍA
5.1 CARACTER	IZACIÓN DE LOS DOMOS
5.2 PRUEBAS	S DE ATENUACIÓN
5.3 PREPARA	ACIÓN DE LAS SOLUCIONES
5.4 ACONDIC	CIONAMIENTO DE LOS DESTILADORES
5.5 PRUEBAS	S EXPERIMENTALES
CAPITULO 6: RES	SULTADOS Y DISCUSIÓN
6.1 RESULTA	ADOS DE ATENUACIÓN
6.2 RESULTA	ADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES:
6.3 FLUJOS I	EVAPORATIVOS
CAPITULO 7. CON	NCLUSIONES
REFERENCIAS	
ANEXO A	
ANEXO B	
ANEXO C	

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

- $A_w = Area \ del \ recipiente \ con \ agua$
- $h_{cw} = Coeficiente de transferencia de calor convectivo$
- $h_{ew} = Coeficiente de transferencia de calor evaporativo$
- $h_{ew} = Coeficiente de transferencia de calor evaporativo$
- I = Irradiancia
- $L = Calor \ latente \ de \ evaporacion$
- $m_D = Razon de transferencia de masa$
- $P_{C} = Presion de vapor saturado a la temperatura de la cubierta de condensacion$
- $P_w = Presion \ de \ vapor \ saturado \ a \ la \ temperatura \ del \ agua$
- $Q_w = Flujo \ de \ calor \ evapoativo$
- $T_C = Temperatura de la cubierta$
- $T_w = Temperatura del agua$
- $\eta_d = Eficiencia diaria total$

INTRODUCCIÓN

En la última década la demanda de litio se ha triplicado, debido al auge de los automóviles eléctricos y la descarbonización. De los recursos primarios de litio podemos decir que se dividen en dos, minerales y salmueras, mientras que en los recursos secundarios se tienen a las pilas gastadas y desechos electrónicos. El litio proveniente del Salar de Atacama representa un 25 % del suministro a nivel mundial. La salmuera en promedio representa un 25 % sal y 75 % agua en masa, la cual es bombeada a estanques artificiales que servirán como recipientes donde se evaporara el agua, este proceso suele durar de entre 9 y 14 meses (Ejeian et al., 2021).

Cabe aclarar que los actuales procesos de evaporación ya sea para la aceleración del proceso o mediante el proceso tradicional, presentan ciertas desventajas, por mencionar algunas tenemos que las plantas de evaporación emplean combustibles fósiles, además de presentar problemas de corrosión debido a la salmuera, mientras que el proceso de evaporación tradicional es bajo debido a la impermeabilidad de la halita que la cubre además de la alta densidad de la salmuera (Schomberg y Bringezu, 2023).

La evaporación solar es un método simple y económico para la concentración de salmueras, sin embargo, se deben de cumplir algunos parámetros para que este método pueda ser aprovechado de forma eficiente, entre estos requisitos destaca el contar con un estanque extremadamente grande, dado que la irradiación solar y el viento serán los únicos aportes de energía y por último, altas tasas de evaporación; estas condiciones son fáciles de obtener en salmueras continentales, sin embargo, la aplicación de este método no es factible para la mayoría de salmueras procedentes de zonas petrolíferas, geotérmicas y/o similares. De este proceso se reporta que en promedio se vaporan 500 m³ de agua por tonelada de carbonato de litio producido, mientras que para el proceso de purificación/recuperación se necesitan 50 m³ de agua dulce por tonelada de carbonato de calcio (Spineiro, Franco y Flexer, 2020).

HIPÓTESIS

La evaporación del agua contenida en una salmuera de litio aumentará usando un destilador solar que incremente la tasa de evaporación. Aplicando una pared adiabática en la base y un domo de vidrio cubriendo el reservorio de la salmuera facilitando la condensación del vapor de agua y su recuperación.

OBJETIVO GENERAL

Identificar de entre los domos utilizados aquel que aumente la tasa de evaporación, además de recuperar el agua de la salmuera para su posible reutilización en procesos de purificación de Li₂CO₃

OBJETIVOS PARTICULARES

- Describir la transferencia de energía y masa que se da dentro del evaporador.
- Evaluar la recuperación y eficiencia de los domos empleados.
- Identificar el domo con mejor tasa de evaporación

CAPITULO 1. EL LITIO: GENERALIDADES

1.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL LITIO

El litio deriva de la palabra griega "Lithos", que significa piedra. Es el primero del grupo de los metales alcalinos, su núcleo está constituido por tres protones y tres neutrones lo que lo convierte en el metal más ligero de la naturaleza; existen 2 isotopos estables ⁶Li y ⁷Li, que representan el 7.6 % y el 96 % del litio natural respectivamente. En cuanto a sus propiedades físicas destaca su alto calor especifico, alta conductividad térmica, baja viscosidad y muy baja densidad (tabla 1.1). Dado su carácter altamente reactivo no se encuentra libre en la naturaleza, sino que aparece formando principalmente aluminosilicatos, fosfatos junto con haluros y boratos, presenta gran afinidad por el Fe, Mg y B, se puede considerar muy similar al Na por su comportamiento geoquímico (Gallego, 1992).

Símbolo	Li	
Numero atómico	3	
Peso atómico	6.94	
Densidad en solido a	534	Kg/m ³
20°C		
Punto de fusión	180.54	۵°
Punto de ebullición	1342	
Estructura cristalina	Cubico centra	ado en el cuerpo
Dureza	0.6	Escala Mohs
Resistividad eléctrica	9.5	mΩcm
Conductividad termica	85	W/mK

Tabla 1.1.1 Propiedades del Litio, tomado de British Geological Survey (2016).

1.2 YACIMIENTOS DE LITIO

El litio se encuentra presente en aproximadamente 145 especies mineralógicas, sin embargo, en la tabla 1.2.1 se muestran los minerales de mayor interés económico.

Nombre del mineral	Formula química	Contenido de litio (Li%)	Apariencia (color y lustre)
Espodumena	LiAISi ₂ O ₆	3.7	Blanco, incoloro, grisáceo, rosado, lila, amarillo o verde; vítreo
Lepidolita	K2(Li,Al)5-6{Si6-7Al2- 1O20}(OH,,F)4	1.39-3.6	Incoloro, grisáceo/blanquecino, lila, amarillo o blanco; vítreo a aperlado
Petalita	LiAISi ₄ O ₁₀	1.6-2.27	Incoloro, gris, amarillo o blanco; vítreo a aperlado
Eucriptita	LiAlSiO₄	2.1-5.53	Café, incoloro o blanco; vítreo
Ambligonita	LiAI[PO4][F,OH]	3.4-4.7	Blanco, amarillo o gris; vítreo a aperlado
Hectorita	Na _{0.3} (Mg,Li) ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	0.54	Blanco u opaco
Jadarita	LiNaSiB ₃ O ₇ (OH)	7.3	Blanco

Tabla 1.2.1 Minerales más comunes con contenido importante de litio. British Geological Survey (2016).

Las reservas de litio de recursos terrestres están distribuidas en pocas ubicaciones geográficas como pegmatitas, arcillas, zeolitas y salmueras, reportando una reserva de 62 millones de toneladas en comparación con el agua de mar, la cual se considera una reserva de litio masiva y uniforme de aproximadamente 230 mil millones de toneladas, sin embargo, presenta concentraciones menores a 1 ppm (He, Kaur y Kostecki, 2020). La tabla 1.2.2 se resume la clasificación de los principales yacimientos de litio

Tabla 1.2.2 Clasificación de los principales yacimientos de litio, en función del ambiente de formación. Tomado de Araceli (2023).

Ambiente	Τίρο		Proceso	Localización (referencia)
				Salar de Atacama
				(Chile), Salar de
			Lixiviado de	Uyuni (Bolivia),
Sedimentario	Salmueras Sala	Salares	rocas ricas en Li	Salar del Hombre
			en zonas de	Muerto
			clima muy árido	(Argentina),
				Searles Lake y
				Salt Lake (EUA)

		Salmueras geotérmicas	Fuentes termales y géiseres que lixivian Li en la proximidad de un foco térmico	Campo geotérmico de Salton Sea (EUA)
	Salmueras en campos petroleros		Descomposición de materia orgánica y lixiviado de rocas	Pennsylvania y Michigan (EUA)
	Hectoritas		Formación de minerales ricos en Li por evaporación	Hector y Overton Valley (EUA)
Magmático	Pegmatita granitos y mi hidrote	s graníticas, neralizaciones ermales	Concentración de Li, Rb y Cs en magmas peralumínicos muy diferenciados	Kings Muntains (EUA), Greenbushes (Australia) y Tanco (Canadá)

• Salmueras

El término "salmuera" se refiere a cualquier fluido que presente un alto nivel de solidos disueltos (sales minerales), que por lo general constan de sodio, calcio, potasio, magnesio y carbonato (British Geological Survey (BGS), 2016); se puede acceder a las salmueras en la superficie o en las profundidades de extensiones salinas en regiones muy secas que permiten que las sales persistan, sin embargo, el contenido de litio puede aumentar, particularmente en geotérmicas de alta temperatura, ya que el elemento se lixivia o se extrae de las rocas circundantes (Victoria et al. 2018).

A) Salmueras continentales

Son los yacimientos más comunes, estos se ubican cerca de aparatos volcánicos, en zonas áridas de altas temperaturas, se caracterizan por sus altos contenidos en cloruros, sulfatos, carbonatos y boratos, entre los principales aniones presentes en solución se encuentran Na, Ca, K, Mg, Li, Rb, Cs (Gallegos, 1992). El litio al ser muy soluble y al contrario del Na, K y Ca no produce minerales evaporíticos cuando es concentrado por evaporación, por lo que en su caso genera salmueras residuales en la superficie. (Bartolo, 2020).

Todos los depósitos de salmueras continentales comprenden una serie de características (Bartolo, 2020) mismos que se ilustran en la figura 1.2.1:

- Rocas volcánicas terciarias, fuente de litio
- Cuenca endorreica que contiene un salar
- Subsidencia debido a la tectónica
- Actividad geotermal asociada
- Uno o más acuíferos adecuados
- Clima árido



Figura 1.2.1 Modelo esquemático de depósito de salmueras de litio que muestra parte de un sistema de cuenca cerrada que consta de subcuencas interconectadas. La subcuenca que contiene el salar es la más baja. Tomado de Bradley et al. (2013).

B) Salmueras geotérmicas

Están compuestas de una solución salina caliente que se abre paso por las rocas de la corteza terrestre con flujos extremadamente calientes que a su vez se enriquece con elementos como el boro, litio y potasio. (SMG, 2021). Suelen llevar gran cantidad de metales pesados diluidos como Mn, Zn, Cu, Ag, Pb, Ba, W.

C) Salmueras en campos petrolíferos

En el proceso de extracción de petróleo y gas inevitablemente se extrae agua o salmuera hipersalina denominada como agua producida, estas salmueras llegan a ser ricas en metales disueltos, llegando a tener una concentración de litio de media a alta junto a otros elementos como el boro, sin embargo, esta agua se considere de deshecho y, por lo general, se reinyecta al subsuelo.

• Yacimientos oceánicos

La figura 1.2.2 muestra que más del 98 % de las reservas terrestres de litio se encuentran en Chile, Argentina, China y Australia en forma mineral y salmueras, mientras que el 2 % se distribuye entre las demás naciones del mundo.



Figura 1.2.2 Diagrama esquemático de las reservas de litio en el océano y los cuatro principales países con mayores reservas en tierra. Tomado de Yang et al. (2018).

La concentración de litio presenta variaciones entre los cinco océanos de la Tierra, para el Océano Ártico presenta la más baja concentración con 184 µg/L, para el caso del Océano Pacifico y el Índico registran 186 µg/L, el Océano

Antártico con 196 μ g/L y el Océano Atlántico muestra los valores más altos de concentración de Li con 220 μ g/L. Para las zonas costeras del continente americano, en Estuario de Camarones, Chile, se presentan concentraciones entre 3500-7600 μ g/L y en el caso de sedimentos marinos, en la Laguna Costera de Patos, Brasil, con un valor máximo de 61.61 μ g/L (Barbosa et al. 2023).

Locación	Ecosistema	Li concentración [μg/L o μg/g]		μg/g]
	-	Mín.	Máx.	Prom.
India – Costa de Bhavnagar	Agua	-	160	-
Océano Pacifico Este	Agua	159	178	-
Mar Muerto	Agua	12,400	17,700	-
Mar Negro	Agua	117	178	-
Mar de Célebes	Agua	-	185	-
Mar Mediterráneo	Agua	-	204	-
Océano Índico	Agua	182	186	-
Océano Antártico	Agua	186	196	-
Océano Ártico	Agua	-	184	-
Océano Pacifico Norte	Agua	185	186	-
Océano Atlántico Sur	Agua	181	188	-
Océano Atlántico Norte	Agua	181	191	-
Océano Atlántico Norte	Agua	174	218	-
Golfo de México	Agua	170	210	-
Océano Atlántico Norte	Agua	161	174	169 ± 3
Océano Atlántico Norte	Agua	172	187	-
EE. UU. – Costa Este (Bahía	Sedimentos	-	22.3	-
Buzzards)				
Océano Pacifico Centro	Sedimentos	0.72	30.5	-
Mar Muerto	Agua	-	-	12,200 ± 500
Mar Muerto	Agua	17,000	21,000	-
Mar Interior de Japón	Agua	162	228	-
Mar de Japón	Agua	169	180	173 ± 3
Océano Pacifico	Agua	-	-	177 ± 1
Océano Índico	Agua	167	181	175 ± 3
Bélgica/Países Bajos – Estuario	Agua	16.2	162	-
de Scheldt				
Canadá – Estuario de St.	Agua	1.9	182	-
Lawrence				
EE. UU. – Estuario de	Agua	11	170	-
Mississippi				
Mar Muerto	Agua	-	13,666.83	-

Tabla 1.2.3 Presencia de litio en aguas y sedimentos marinos y costeros. Datos tomados de Barbosa et al. (2023)

Irán – Costa del Mar Caspio	Agua	-	285.97	-
EE. UU. – Costa Sureste	Agua	0.43	1.06	0.70
Canadá – Estuario de St.	Sedimentos	15 ± 2.9	35 ± 5.1	-
Lawrence				
Golfo de St. Lawrence	Sedimentos	12 ± 4.2	33 ± 7.8	-
Bahía de Fundy	Sedimentos	23 ± 5	53 ± 10.4	-
Bahía de Baffin	Sedimentos	10 ± 3.9	53 ± 15.8	-
Grecia – Costa del Mar Egeo	Sedimentos	9.74	37.1	-
Brasil – Laguna Costera de	Sedimentos	10.05	61.61	-
Patos				
Nueva Guinea – Golfo de Papúa	Agua	<6.94	>187.41	-
Este de EE. UU. – Agua de mar	Agua	50.8	125	-
costera				
Pakistán – Costa de Karachi	Agua	130	170	150
Océano Índico	Agua	174.91	178.38	176.3 ± 1.3
Reino Unido – Estuario Medway	Sedimentos	2	39	17
Azores – Estuario Povoação	Agua	1.39	235.99	-
Islandia – Estuario de	Agua	0.27	163.11	-
Borgarfjörður				
Mar Báltico – Kattegat y	Sedimentos	20	>50	-
Skagerrak				
Malasia – Costa Este	Sedimentos	27.6	51.6	39.4
Chile – Estuario Camarones	Agua	3500	7600	5159
Senegal – Costa Suroeste	Sedimentos	3.5	8.4	-
Malasia – Costa Oeste	Sedimentos	21.84	146.22	50.44
Costas del Océano Índico	Agua	-	160	-
Japón – Costa del Océano	Agua	-	1173	-
Pacifico				
Océano Atlántico Norte	Agua	-	220	-
Islas Canarias - cercanías de La	Agua	-	295	-
Palma				
Chile – Fiordo Comau	Agua	-	170	-
Portugal – Ria de Aveiro	Agua	285	300	296 ± 7

El Litio tiene un comportamiento similar al Magnesio, en los procesos de sedimentación y meteorización, lo cual muestra que el Li se presenta en los sedimentos marinos de hidrolizado. Para el caso de sedimentos evaporados se puede encontrar Li en la halita (NaCl), debido a que el litio sustituye en pequeñas cantidades al sodio (Soberón, 1986). Para el caso de México quien tiene salida al Océano Pacifico y el Golfo de México, donde este último presenta concentraciones de entre 170 y 210 µg/L de Li (tabla 1.2.2).

1.3 PERFIL DEL LITIO EN MÉXICO

• Hidrología de México

El subsuelo mexicano alberga una gran cantidad de acuíferos, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el 2001 fueron registrados 653 acuíferos que a su vez pertenecen a 13 zonas hidrológicas-administrativas (figura 1.3.1) delimitadas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).



Figura 1.3.1 Regiones Hidrológico-Administrativas. Tomado de SEMARNAT

La figura 1.3.2 muestra la condición de los acuíferos de México, teniendo 3 condiciones: con intrusión salina, sobreexplotados y acuíferos con disponibilidad. SEMARNAT reporta 15 acuíferos con intrusión salina que se encuentran de



Figura 1.3.2 Distribución de los diferentes tipos de acuíferos. Tomada de SEMARNAT

acuerdo con la figura 3 en las regiones hidrológico-administrativas I-Península de Baja California, II-Noroeste y X-Golfo Centro, comprendiendo los estados de Baja California, Sonora y Veracruz respectivamente.

• Manifestaciones de litio

Se reportan 57 depósitos repartidos en 18 entidades (figura 1.3.3) las cuales son: Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas; siendo Sonora quien posee la cuarta parte de estos depósitos seguida de Puebla con ocho. De los 57 prospectos, 24 localidades se presentan como salmueras de las cuales tres de ellas presentan anomalías en su concentración (tabla 1.3.1).



Figura 1.3.3 Manifestaciones de litio en México. Tomado del SGM, 2021

Tabla 1.3.1 Anomalías en salmueras. Datos tomados del SMG

Localidad	Estado	Li (ppm)	Mg	K (ppm)	B2O3	Observaciones
			(ppm)		(ppm)	
Cuitzeo	Michoacán	191	9800	10100	-	Sal de
						manantial
La Unión	Chihuahua	283	840	6200	385	Salmuera
						evaporada
Cráter	Puebla	110	16700	-	4800	Agua
Alchichica						superficial

Estas concentraciones son excepcionalmente altas, equiparables con las reportadas en Silver Peak, EE. UU. la cual tiene una concentración media de 200 ppm (SGM, 2021).

Conforme a la figura 1.3.3 las 24 localidades que presentan salmueras, la mayoría se encuentran en zonas donde la condición de su acuífero se reporta como sobreexplotado, de acuerdo con la figura 1.3.2. Estas localidades se muestran en la tabla 1.3.2. en orden geográfico de los estados del norte hacia el sur

Zona	Zona Localidad	
	Chihuahua	
1	Laguna de Palomas	Ascensión
2	La Unión	Aldama
3	Laguna Mexicanos	Cusihuiriachi
4	Laguna Paloma	Jiménez
	Coahuila	
1	Laguna de Palomas	Sierra Mojada
2	Laguna Patos	San Pedro
	Zacatecas	
1	Sutti	Jiménez de Teúl

Tabla 1.3.2 Localidades con manifestaciones de salmueras de litio. Tomado del SMG (2021).

2	Sutti 1	Jiménez de Teúl
3	Sutti 2	Jiménez de Teúl
4	Sutti 24	Fresnillo
5	Sutti 25	Fresnillo
6	Sutti 23	Villa Hidalgo
	San Luis Potosí	
7	Sutti 19	Santo Domingo
8	Sutti 20	Villa de Ramos
9	Sutti 22	Salinas
10	Sara	Salinas
11	Azafranes Sur	Moctezuma
12	Sam Moly	Moctezuma
	Puebla	
1	El Oriental 1	Oriental
2	El Oriental 2	Tepeyahualco

CAPITULO 2. ENERGÍA SOLAR

En promedio la distancia del Sol y la Tierra es de 1.5x10⁸ km, la energía recibida del sol se propaga a través de ondas, su contenido energético depende de la frecuencia con la que esta actúa. La Tierra recibe aproximadamente 180.108 PW de radiación solar, en general, la cantidad de energía recibida por la Tierra en un lugar y tiempo determinados depende de la posición relativa Sol-Tierra. Por esta razón, el tiempo y la geometría Sol-Tierra juegan un papel vital en la conversión de energía solar. Si bien la cantidad de energía proveniente del sol, fuera de la atmosfera es muy grande, esta se ve reducida en un 30% una vez entre en contacto con la atmosfera por efectos de absorción, reflexión y dispersión (Tiwari y Lovedeep, 2017).

• Irradiancia

Describe el valor de la potencia luminosa que incide en un determinado instante por unidad de área, esta comúnmente se expresa de la siguiente manera: W/m^2 .

• Irradiación solar

La energía incidente por unidad de área en una superficie, encontrada mediante la integración de la irradiancia durante un tiempo específico, generalmente una hora o un día, se expresa en las siguientes unidades Wh/m^2 .

Por su comportamiento la irradiancia se clasifica en tres tipos, directa, difusa y reflejada; la irradiación directa es aquella que se recibe directamente del sol en línea recta, sin que desvíe su trayectoria por la atmosfera; la irradiación difusa es aquella que se dispersa en la atmosfera; por último, la reflejada es la irradiancia directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies. La suma de estas tres da la Irradiancia Solar Global.

La radiación solar varía dependiendo la zona geográfica en la que se encuentre (figura 2.0.1), esto debido a la latitud lo que influye en el ángulo de incidencia de los rayos solares, las zonas más favorables están ubicadas entre 15°N y 35°N, son regiones semiáridas que pueden recibir hasta el 90 % de radiación solar directa.



Figura 2.0.1 Irradiación solar directa en el mundo. Tomado de World Bank Group (2020)

2.1 ENERGÍA SOLAR EN MÉXICO

En México los niveles de radiación anual van desde los 4.4 kWh/m² por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m² por día en el norte del país (figura 2.1.1), según la International Renewable Energy Agency (IRENA) (2015), México se encuentra entre 15° y 35° de latitud, región considerada la más favorable en recursos solares, equiparable con regiones de África, los Andes y partes de Oceanía, lo que lo vuelve un país privilegiado para el uso de energía solar. En casi el 40 % de su extensión territorial, equivalente a aproximadamente 2 millones de kilómetros cuadrados, se reciben unos 5.83 kW/m²día lo que es incluso el doble comparado con, por ejemplo, Alemania, siendo este un país con uno de los mercados de paneles solares más grandes.



Figura 2.1.1 Irradiación solar global en México. Tomado de World Bank Group (2020)

De acuerdo con el Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PROSEDEN) 2021-2035, realizaron un prospecto para la instalación de sistemas fotovoltaicos para los próximos años (figura 2.1.2), esperando alcanzar en el 2035 los 13.8GW provenientes del recurso solar.



Figura 2.1.2. Evolución estimada de la capacidad instalada acumulada de generación distribuida. Tomado de PRODESEN (2021).

CAPITULO 3. DESTILADOR SOLAR

La destilación solar fue uno de los primeros procesos utilizados para intentar producir agua dulce a partir de agua salada, basándose en el efecto fototérmico para evaporar agua, separando el agua dulce de la salmuera. La desalineación solar ha perdido la atención frente a métodos modernos como el DSME y la osmosis inversa, sin embargo, estos consumen mucha energía y dependen de la energía fósil para poder operar (López, 2014); por lo que de los 22 millones de m³ de agua dulce que se producen en el mundo proveniente de procesos de desalineación, solo el 1 % se realiza por energía solar.

3.1 TIPOS DE DESTILADORES SOLARES PASIVOS

Con el paso del tiempo los destiladores solares han sufrido diversas modificaciones con el fin de aumentar su eficiencia y adaptándose al lugar donde se requieren implementar. En la figura 3.1.1 se pueden clasificar en dos tipos, directos o pasivos e indirectos o activos. En el caso de los destiladores directos, la radiación solar es la única energía que alimenta al sistema, calentando el agua imitando el ciclo hidrológico, para estos sistemas se reportan eficiencias de entre 30 y 45 %. Para la destilación indirecta hace uso de diferentes dispositivos que aporten energía térmica adicional para calentar el agua salina, estos sistemas se vuelven más sofisticados y a su vez más.



Figura 3.1.1 Clasificación de los destiladores solares (Shukla, 2014).

• Características técnicas de un destilador solar pasivo

Uno de los elementos principales en los destiladores solares pasivos, es la superficie donde va a estar contenida el agua, esta misma normalmente es de un material metálico, transformando la energía solar en un incremento de la temperatura del agua para poder evaporarla, por lo que para aumentar la captación de la radiación visible e infrarroja, se colocan capas de materiales con alta absortividad, la mayoría de absorbedores se aproximan a un cuerpo negro, el cual absorbe y emite en la misma proporción (Hermosillo, 1989). El incremento en la temperatura del agua dará pie a su evaporación por lo que necesita ser condesada, así que se coloca una cubierta de un material semitransparente que tiene dos funciones importantes, permitir el paso de la radiación solar hacia el absorbedor y fungir como condensador, este último principio tiene como vital importancia que la temperatura en la cubierta sea menor que la del vapor para condensarlo (Flores, 2015).

• Destilador solar de capa única.

Este es una de las configuraciones más comunes y empleadas, consiste en una caseta de vidrio, acrílico o un material trasparente o semitransparente, con una inclinación notable la cual permitirá que las gotas condensen y escurran hacia una canaleta que las llevara a los contenedores de salida (figura 3.1.2).



Figura 3.1.2 Destilador solar de pendiente única. Tomado de Chávez (2013).

Khalifa (2011) en su estudio sobre el efecto del ángulo de inclinación en las cubiertas de los destiladores solares simples concluye que el ángulo de la cubierta debe ser grande en el invierno y pequeño en el verano, además, el ángulo de inclinación optimo debe ser cercano al ángulo de latitud del sitio.

• Destilador solar de doble vertiente (caseta).

Es un diseño que opera con las mismas condiciones que el de una sola inclinación, solo que ahora el líquido se desliza por dos cubiertas inclinadas. Esta variante de destilador solar aumenta la captación de radiación solar, dependiendo la estación del año se pueden modificar el área de cada una de las cubiertas, así como sus ángulos de inclinación (Figura 3.1.3).



Figura 3.1.3 Destilador solar de doble vertiente. Tomado de Martínez (2018).

• Destilador solar cónico

Como su nombre lo dice, la cubierta es un cono de material transparente, teniendo la ventaja que la radiación incide por todas partes y no proyecta una sombra al interior del recipiente. Gad et al. (2015) en su artículo titulado: Análisis térmico del rendimiento de un destilador solar cónico: un estudio experimental, hace una comparativa entre el destilador solar cónico (DSC) y el de capa única (DCU), donde en sus resultados muestra que la temperatura que alcanza el agua en el DSC es 20° mayor que la del DCU, también que la producción de agua el DSC es 1.5 veces mayor que en el destilador de capa única.

Por su parte Elnaby et al. (2023) (Figura 3.1.4) en su artículo titulado: Mejora del rendimiento de un destilador solar cónico optimizando el ángulo de inclinación, concluye que la mejor inclinación de la cubierta cónica es de 30° con una recuperación de 5.95 kg/m² de agua y que cuanto mayor inclinación, menor recuperación se genera como en su caso, con el cono de 60°, sin embargo, no

menciona una relación de estas inclinaciones con el ángulo de latitud siendo el lugar donde se desarrolló el experimento en El Oued, Algeria con latitud 30° 21' 21" N.



Figura 3.1.4 Destilador solar cónico. Tomado de Elnaby et al. (2023).

• Destilador solar hemisférico o domo

Se caracteriza por sus bordes curvos, si bien puede ser una cubierta de media esfera también se pueden ocupar domo alargados donde la base es rectangular y la parte superior es circular, su ventaja como en el caso de los destiladores cónicos, es que no proyecta una sombra interna en el recipiente de agua salina, además de permitir la incidencia de los rayos solares por todas las direcciones.

En la literatura podemos observar que muchos investigadores han recurrido a diversas técnicas para aumentar la productividad y eficiencia de los destiladores solares, para el caso de los hemisféricos, Attia et al. (2021a) (Figura 3.1.5) informa en un estudio sobre el uso de recipientes de acero, zinc y cobre, el cómo influyen sobre la producción de agua dulce. Attia et al. (2021b) en otro estudio muestra el efecto de colocar reflectores en las paredes internas de los recipientes, estos reflectores estarían hechos de vidrio y aluminio, además, reporta el efecto de adicionar granos de fosforitas a dos diferentes granulometrías. Por su parte Solanki, Sonie y Patel (2014) informan que al agregar tinta color negro al agua

salina puede aumentar hasta un 25% la recuperación de agua, sin que está tenga que pasar por un proceso de purificación secundario.



Figura 3.1.5 Ejemplos de destiladores solares hemisféricos. A) Tomado de Solanki, Sonie y Patel (2014), B) Tomado de Adewole, Arambi y Asere (2020) y C) Tomado de Attia et al. (2021).

3.2 TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

La transferencia de calor que se da en un sistema de destilación solar se puede clasificar en términos generales como: transferencia de calor interna y transferencia de calor externa (figura 3.2.1). Para este trabajo se hará hincapié en las ecuaciones de transferencia de energía y fenómenos que sucedan meramente en destiladores solares hemisféricos.



Figura 3.2.1 Esquema de la transferencia de calor interna y eterna. Tomado de Tiwari (2017).

Los mecanismos de transferencia interna de calor están dados por evaporación, convección y radiación, por su parte los mecanismos de transferencia externa de calor implican conducción, convección y radiación. En la cavidad del destilador solar, la transferencia de calor se logra por medio del vapor que se forma sobre la superficie del agua, a través de una mezcla de aire y vapor. El mecanismo interno de transferencia de calor es responsable del transporte del agua pura en forma de vapor, separándola de las impurezas, en este caso de las sales; mientras tanto el calor externo que se transfiere a través de la cobertura de vidrio es responsable de la condensación del vapor como destilado.

Convección

Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas que está en movimiento, estos comprenden los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos, por el contrario, es llamada convección natural si el movimiento del fluido es causado meramente por fuerzas de empuje causadas por el cambio de densidad debido a variaciones en la temperatura. A pesar de la complejidad

de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento:

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \tag{1}$$

Donde *h* es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A_s es el área a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_{∞} es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie.

Conducción

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de su interacción. La conducción se puede dan en sólidos, líquidos y gases, en líquidos y gases se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos es debido a las vibraciones de sus moléculas y al transporte de energía de los electrones libres. La ecuación de la conducción de las conducción de calor:

$$\dot{Q} = -kA\frac{dT}{dx} \tag{2}$$

Donde k es la conductividad térmica del material, A es el área, dT/dx es el gradiente de temperatura.

Ecuaciones de transferencia de energía

Tiwari (2006) muestra la siguiente forma para obtener las ecuaciones que describen la convección, conducción y evaporación en un destilador solar pasivo, en general para la transferencia de calor, la siguiente ecuación puede ser aplicable para la tasa de transferencia de calor por convección:

$$\dot{Q} = h_{cw} * A(T_s - T_{\infty}) = h_{cw} * A * \Delta T$$
⁽³⁾

Donde h_{cw} es la transferencia de calor convectivo.

La siguiente relación del número adimensional Nusselt, lleva el coeficiente de transferencia de calor convectivo como:

$$Nu = \frac{h_{cw}}{\lambda} L_{v} = C(Gr * Pr)^{n} \qquad o \qquad h_{cw} = \frac{\lambda}{L_{v}} * C(Gr * Pr)^{n}$$
⁽⁴⁾

Donde Gr y Pr son el número de Grashof y Prandlt respectivamente y esta dados por las expresiones:

$$Gr = \frac{BgL_v^3 \rho^2 \Delta T}{\mu^2} \tag{5}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \tag{6}$$

Para las incógnitas de C y n, se determinan mediante un análisis de regresión utilizando datos experimentales y siguiendo el modelo de Kumar y Tiwari (1996). El coeficiente de transferencia de calor por convección h_{cw} se evalúa con los valores de C y n obtenidos con el modelo antes mencionado, obteniendo una ecuación similar a las que reportan Fallahzadeh et al (2020), Adewole et al. (2020) y Attia et al. (2020):

$$h_{cw} = 0.884 \left[T_w - T_c + \frac{(P_w - P_c)(T_w + 273)}{268.9x10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}}$$
(7)

Donde T_w es temperatura del agua en el recipiente, T_c es la temperatura de la cubierta interna, P_w es la presión de vapor saturado a la temperatura del agua y P_c es la presión de vapor saturado parcial a la temperatura de la cubierta de condensación.

Fallahzadeh et al. (2020) sugiere que para calcular las pérdidas de calor por convección se emplee la siguiente ecuación:

$$Q_{cw} = h_{cw}A_w(T_w - T_c) \tag{8}$$

Donde Q_c es la transferencia de calor por unidad de tiempo (W) y A_w es el área de la superficie del agua. Por lo que la perdida de calor convectivo (Q_{cw}) de la cubierta transparente al aire del ambiente es determinada por la ecuación:

$$Q_{ca} = h_{ca}(T_c - T_a) \tag{9}$$

Donde h_{ca} es el coeficiente de transferencia de convección forzada expresado como:

$$h_{ca} = 2.8 + 3.6\nu \tag{10}$$

Donde v es la velocidad del viento en m/s.

Para el flujo de calor evaporativo Fallahzadeh et al (2020), Adewole et al. (2020) y Attia et al. (2020) reportan:

$$\dot{q}_{ew} = h_{ew}(T_w - T_c) \tag{11}$$

Donde Kumar y Tiwari (1996), Monakar et al. (2018) y Attia et al. (2020) reportan que h_{ew} es el coeficiente de calor evaporativo expresado como:

$$h_{ew} = 0.01623 * h_{cw} * \left(\frac{P_w - P_c}{T_w - T_c}\right)$$
⁽¹²⁾

Donde la presión de vapor saturado a la temperatura del agua es:

$$P_w = \exp[(25.317) - \left(\frac{5144}{273 + T_w}\right)]$$
⁽¹³⁾

La presión de vapor saturado parcial a la temperatura de la cubierta de condensación es:

$$P_{\rm c} = \exp[(25.317) - \left(\frac{5144}{273 + T_c}\right)] \tag{14}$$

Sin embargo, Aurunkumar et al. (2012) reporta que para el coeficiente de calor evaporativo, basta con acortar la ecuación de la siguiente manera:

$$h_{ew} = 0.01623 * h_{cw} \tag{15}$$

Al haberse encontrado solo un artículo donde la expresión para h_{ew} es simplificada como el ejemplo anterior, no se tomará en cuenta y se opta por la de los autores antes mencionados.

Adewole et al. (2020) también menciona que para contemplar las perdidas por calor radiativo, se emplee la siguiente ecuación:

$$Q_r = E_{ff} \sigma A_w (T_w^4 - T_c^4)$$
⁽¹⁶⁾

Donde Q_r es el calor transferido por unidad de tiempo (W), σ es la constante de Stefan Boltzmann (5.6703x10⁻⁸ W/m^2K^4) y E_{ff} es la emisividad efectiva expresada como:

$$E_{ff} = \frac{1}{\frac{1}{E_w} + \frac{1}{E_c} - 1}$$
(17)

Donde E_w es la emisividad del agua y E_c es la emisividad de la cubierta.

Por último, para evaluar la eficiencia térmica del sistema, Monakar et al. (2018) y Attia et al. (2020) reportan la siguiente expresión:

$$\eta_{daily} = \frac{\Sigma m_{ew} L}{\Sigma I(t) A_w * 3600} * 100$$
⁽¹⁸⁾

Donde I(t) es la intensidad de la irradiación (W/m²), m_{ew} es la masa de agua destilada y L es el calor latente de evaporación.

CAPITULO 4: PROCESO INDUSTRIAL

4.1 EVAPORACIÓN DE SALMUERAS

Los depósitos de salmueras ricas en litio se encuentran por lo general en las profundidades de grandes extensiones salinas en regiones desérticas, llamados lagos salados o salares, el litio se mezcla con grandes cantidades de NaCl, la mayor cantidad de aniones está dada por Cl^- , en menor medida CO_3^- , SO_4^- y diferentes boratos; A parte de Na^+ y Li^+ los cationes presentes incluyen K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , entre otros (Flexer et al., 2018). El actual proceso de extracción de salmueras conocido como tecnología evaporítica consiste en la perforación del subsuelo hasta el acuífero rico en litio, este será bombeado hacia una serie de grandes estanques poco profundos, la salmuera se concentra mediante evaporación solar/eólica, esto es posible ya que la mayoría de las salmueras se encuentran a gran altitud, por encima de los 2000 metros sobre el nivel del mar, con varios depósitos situados a 3500 (Baspineiro et al., 2020). También hay que considerar que están en zonas desérticas, con precipitaciones anuales y humedad del aire muy bajas.



Figura 4.1.1 Estanques de evaporación, Salar de Atacama. Tomado de stock.adobe.com [24/02/2024]

A medida que las sales de la salmuera se concentran cada vez más, se produce una cristalización fraccionada de la mayoría de ellas, estos precipitados consisten principalmente en mezclas de sales. Para que el procesos sea rentable, se construyen diversos estanques (figura 4.1.1), esto debido a que la tasa de evaporación se ve disminuida cuanto más concentrada esta la salmuera, además, al tener varios estanques se tendrá la cristalización de diferentes sales, lo que indica los diferentes colores en cada uno de ellos y, por último, la cadena de producción no se ve afectada cuando uno de los estanques este fuera de servicio para la recolección de las sales, este proceso solo ocurre cuando la concentración de litio es mayor o igual a 6000 ppm, lo cual ocurre cuando la salmuera ha perdido aproximadamente el 90 % de su volumen en agua. (Flexer et al., 2018).

4.2 PURIFICACIÓN DEL Li₂CO₃

La salmuera concentrada se manda a una planta de tratamiento, antes de la purificación de carbonato de litio, se deben eliminar los elementos indeseables, por ejemplo, se adiciona cal para precipitar los cationes de magnesio y por aparte se agregan disolventes orgánicos para eliminar los boratos. Siguiendo con el proceso principal, el carbonato de litio se precipita a través de la adición de carbonato de sodio, muy a menudo el Li₂CO₃ primario se redisuelve y vuelve a ser precipitado para obtener la pureza deseada, los detalles específicos del proceso difieren entre cada instalación y por lo general las empresas a cargo no suelen divulgarlos (Baspineiro et al., 2020). La figura 4.2 muestra un esquema del proceso.



Figura 4.2.1 Procesos de evaporación y purificación del carbonato de litio. Tomado de Baspineiro et al. (2020).
Las ventajas con el actual proceso son:

- Bajo costo de operación
- Bajo consumo de energía
- Proceso siempre en cuanto a la medición de concentraciones y control de los estanques

Entre las principales desventajas:

- Alto tiempo de concentración de sales
- Enormes pérdidas de masa de agua
- Bajo control en cuanto a parámetros técnicos (humedad relativa, temperatura, tasa de evaporación, etc.)
- Huella hídrica en la zona debido al bombeo de la salmuera y de agua dulce para su purificación

4.3 MERCADO DEL LITIO

La tabla 4.3.1 muestra los principales depósitos de salares continentales, así como la producción anual de Li₂CO₃ que manejan.

País	Nombre del	Reservas	Nombre de	Contenido	Capacidad
	deposito	(tonelada	la operación	de Li⁺ en	de
		kilométrica		ppm	producción
		de Li			(Li ₂ CO ₃
		metálico			ton/año)
		equivalente)			
Argentina	Salar de Olaroz	1203	Sales de	690	17500
			Jujuy		
Argentina	Salar del Hombre	800	FMC Lithium	620	12000
	Muerto				Li ₂ CO ₃ +
					7730 LiCI
Chile	Salar de Atacama	3000	Sociedad	1500	48000
			Química y		Li ₂ CO ₃ +
					6000 LiCl

Tabla 4.3.1 Datos sobre la extracción de salmueras de litio. Tomado de Flexer et al. (2018).

			Minera de		
			Chile S.A		
Chilo	Salar da Atacama	2000	Albomarla	1500	27000
Chile	Salar de Alacama	3000	Albemane	1500	27000
					Li ₂ CO ₃ +
					4500 LiCl
China	Chaerhan Salt Lake	1000	Qinghhai	210-350	5000
			Lanke		(Li ₂ CO ₃ +
			Lithium		LiCl)
			Industry		
China	West Taijinar	2680	CITIC Guoan	100-300	5000
			Lithium		(Li ₂ CO ₃
			Science &		+LiOH)
			Technology		
China	Zhabuye	1000	Tibet Mineral	1000	5000
			Development		
EUA	Claytin Valley (Silver	300	Rockwood	230	6000
	Park)		Holdings,		
			Inc.		

Se estima que en el 2021 se extrajeron casi tres veces más de litio que en 2010, cuando la producción había ascendido a 28 mil 100 toneladas. Se prevé que para 2050 se necesitara una producción anual de 11.2 millones de toneladas de carbonato de litio (Juaréz, 2022).

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA

Las pruebas experimentales se suscitaron en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, UNAM, con coordenadas 19.3262°N, 99.1761°W. En la siguiente figura se esquematiza la metodología.



Figura 5.0.1 Diagrama de la metodología

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS DOMOS

Se ocuparon cuatro domos de cristal y cuatro diferentes recipientes de aluminio, cada uno con capacidad de 150 ml, cubiertos con una capa de pintura negra mate (tabla 5.1.1).

	Do	mos			
	Altura [cm]	Diámetro [cm]	Grosor [mm]		
Α	31	14	3		
В	25	15.8	3		
С	30	18	3		
D	39	21.5	3		
	Recipientes				
	Altura [cm]	Diámetro [cm]			
Α	3	10			
В	3	18			
С	3	16			
D	3	12			

Tabla 5.1.1 Medidas de domos y recipientes.



Figura 5.1.1 Domos empleados



Figura 5.1.2 Recipientes colocados en cada domo

5.2 PRUEBAS DE ATENUACIÓN

Para conocer la irradiancia que realmente pasa a través de los domos, se colocó un piranómetro dentro de cada uno. Las pruebas fueron llevadas a cabo en el siguiente orden: Domo C el día 20/02/2024, Domo D 21/02/2024, Domo B 23/020/2024 y Domo A 28/02/2024; se dejaron por varias horas para observar el fenómeno de atenuación de la irradiancia global debida al cristal. Debido al cable que conecta al piranómetro, los domos fueron alzados ligeramente sobre la base, esto no afecto el propósito inicial de la prueba.



Figura 5.2.1 Pruebas de atenuación.

5.3 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES

Partiendo de una solución de 190 ml de agua de mar artificial, bajo la norma británica BS2011-2.1Kb, adicionada con una concentración inicial de 15000ppm de Li provenientes de haber disuelto 132.14g de LiNO₃. Se aforó a un litro, posteriormente se tomaron 175.42 ml de solución para nuevamente aforar a un litro, repitiendo este paso 6 veces, teniendo en cada una de estas seis soluciones una concentración final de 500ppm, vaciándolas en botellas de plástico pintadas de negro mate.

Las tapas de cada botella fueron perforadas con equipos de venoclisis, los cuales fungirían como los alimentadores hacia los recipientes de los domos, por medio de un goteo controlado.



Figura 5.3.1 Sistema de alimentación

5.4 ACONDICIONAMIENTO DE LOS DESTILADORES

El destilador solar hemisférico estuvo compuesto de una placa de unicel de tres pulgadas de grosor que sirvió como base principal, en su parte interna se ranuró para la implementación de un vaso de precipitados de 150 ml al que se le incorporó una manguera por donde se extraería el agua almacenada, sobre este se colocaría una charola de plástico, la cual, se deformaría con calor para realizar una hendidura por donde se tendría una salida hacia el vaso de precipitados.

El recipiente de aluminio fue colocado en el centro de la charola de tal forma que no tapara la salida del agua y tampoco tocara las paredes del domo, este último se montó sobre la charola de plástico y fue sellado con plastilina epoxica.



Figura 5.4.1 Componentes del destilador solar hemisférico

Se utilizaron un total de doce termopares tipo K, los cuales fueron distribuidos entre los 4 domos, implementando tres termopares en cada uno de los destiladores, distribuidos de la siguiente manera: agua, altura media interna del domo y punta interna del domo.



Figura 5.4.2 Arreglo de los termopares en los destiladores solares

Los destiladores serian colocados con vista hacia el sur con una inclinación de 15° por lo que el sistema de alimentación y los termopares fueron colocados en la parte trasera (norte geográfico) de los destiladores, perforando la charola plástica y posteriormente sellando la abertura con silicón frio.



Figura 5.4.3 Sistema de alimentación de los destiladores solares

Por último, el equipo con el que se realizarían las mediciones minuto a minuto fue un CR1000X CAMPBELL SCIENTIFIC con número de serie 26597, el código del programa diseñado para este equipo se muestra en el Anexo A.

5.5 PRUEBAS EXPERIMENTALES

La primera prueba experimental se realizó el día 5 de marzo del 2024, en un día despejado sin intervalos nubosos, se colocaron los domos D y C, siendo estos los de mayor diámetro, con una orientación hacia el sur y una inclinación de 15° además, se preparó un recipiente que evaporaría al aire libre; el equipo con el que se midieron las temperaturas fue un CR1000X, mientras que la humedad relativa, irradiancia, velocidad del viento y temperatura ambiente, fueron tomados de la estación del Observatorio de Radiación Solar UNAM, mismo en donde se llevaron a cabo todas las pruebas, estas estuvieron expuestas a la irradiación de 8:40 am hasta las 17:50 pm.

La segunda prueba experimental se llevó a cabo el día 7 de marzo de 2024, para los domos A y B, implementando nuevamente un recipiente que evaporaría en

condiciones ambientales; era un día despejado sin intervalos nubosos, la prueba duro de 10:00 am a 17:56 pm.

La última prueba fue realizada el día 15 de marzo de 2024, para los cuatro domos: A, B, C y D. La prueba fue realizada en día con ligeros intervalos nubosos, empezando a las 9:48 am y terminando a las 17:02 pm.



Figura 5.5.1 Prueba experimental del 15/03/2024, domos A, B, C y D, en orden de izquierda a derecha



Figura 5.5.2 Prueba experimental del 15/03/2024, vista trasera y delantera de los destiladores solares

CAPITULO 6: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

6.1 RESULTADOS DE ATENUACIÓN



Los resultados de atenuación para cada domo se presentan a continuación:

Figura 6.1.1 Atenuación del domo A



Figura 6.1.2 Atenuación del domo B



Figura 6.1.3 Atenuación del domo C



Figura 6.1.4 Atenuación del domo D

Los valores promedios de atenuación para los domos fueron los siguientes: domo A 0.11 %, domo B 0.12 %, domo C 0.19 % y domo D 0.16 %; la variación del % Atenuación es debido a que la estructura de los domos no es regular, teniendo zonas donde la luz incidente puede ser reflejada o difractada, haciendo que el piranómetro en la parte interna no pueda captar esas ondas. El domo B (figura 6.2) mantiene un %atenuación alto, casi constante de entre 0.225 a 0.3 en un periodo prolongado que va de 12:30 a 13:30, en comparación con los otros domos que muestran cambios abruptos y oscilaciones muy marcadas.

Los objetos que tienen atenuaciones mayores a 0.1 % se consideran semitransparentes y para valores mayores a 0.9 % se consideran opacos; bajos valores de atenuación permiten la entrada de los rayos haciendo que no se calienten de la misma forma que un objeto opaco.

6.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES:

Las condiciones de los días en los que se llevaron a cabo las pruebas experimentales se resumen en la tabla siguiente:

Dia	Irradiancia Máx. [W/m²]	Irradiancia promedio. [W/m²]	Temperatura ambiente Máx. [°C]	Temperatura ambiente promedio. [°C]	Velocidad promedio del viento [m/s]
05-mar	1019.18	702.17	33.08	26.36	1.86
07-mar	1037.22	774.93	32.69	28.17	2.76
15-mar	1046.89	787.33	28.13	25	2.57

Tabla 6.2.1 Condiciones ambientales promedio

Las figuras que muestran el comportamiento de la velocidad del viento y la irradiancia se muestran en la sección de Anexo B.

Los días 5 y 7 fueron días sin intervalos nubosos, siendo estos los que mayores temperaturas ambiente tuvieron, con 33.08 y 32.69°C respectivamente, el comportamiento de la irradiancia correspondiente a estos dos días es sinusoidal (Anexo B), sin mostrar perturbaciones destacables llegando a sus máximos valores entre las 12:30 y las 13:30.

El día 15-mar tuvo ligeros intervalos nubosos, registrando la temperatura ambiente más baja con 28.13 °C, por otro lado, obtuvo la mayor cantidad de irradiancia con 1046 W/m^2 , sin embargo, la irradiancia muestra un

comportamiento parabólico hasta las 15:00 (Anexo-1), pasada esta hora empieza una fluctuación de entre 200 y 600 W/m^2 , esto debido a que cúmulos de nubes empezaron a formarse y desplazarse, por lo que la irradiancia global se ve opacada como suministro de energía radiante.





Figura 6.2.1 Parámetros medidos para el domo A el 07-mar



Figura 6.2.2 Parámetros medidos para el domo A el 15-mar

El domo A tuvo la temperatura interna más alta en el día 07-mar (figura 6.2.1), donde en el periodo de las 12:30 a 15:20 estuvo 12 °C por encima de las temperaturas del agua y la cubierta, este efecto no se repitió para la experimentación del 15-mar donde en general se tuvieron en promedio diferencias de solo 5 °C entre las 3 temperaturas medidas.



Domo B

Figura 6.2.3 Parámetros medidos para el domo B el 07-mar



Figura 6.2.4 Parámetros medidos para el domo B el 15-mar

Las temperaturas medidas para el domo B difieren en tan solo 1°C para ambos días, las temperaturas del agua y la cubierta son muy similares, siendo esta última ligeramente más baja.



Domo C

Figura 6.2.5 Parámetros medidos para el domo C el 05-mar



Figura 6.2.6 Parámetros medidos para el domo C el 15-mar

Para el domo C en el día 5-mar (figura 6.2.5) la diferencia entre la temperatura de la cubierta y la del agua es un poco más notable siendo en promedio de 3 °C, para el caso del día 15-mar sus temperaturas son casi las mismas en toda la experimentación.



Domo D

Figura 6.2.7 Parámetros medidos para el domo D el 05-mar



Figura 6.2.8 Parámetros medidos para el domo D el 15-mar

La diferencia entre la temperatura del agua y la cubierta del domo D para ambos días, es en promedio de 3 °C siendo la cubierta la de menor temperatura lo que ayuda para aumentar la condensación.

Las temperaturas alcanzadas en cada domo se resumen en la tabla siguiente:

	Temperatura		Temperatura		
Día	promedio en el agua		promedio en la		
	[°C]		cubierta [°C]		
	C	Domo A			
7-mar	48.62	49.8	46.87		
15-mar	45.97	45.12	47.24		
	Domo B				
7-mar	49.62	48.3	49.25		
15-mar	47.8	47.1	47.37		
Domo C					
5-mar	43.98	45.92	46.82		
15-mar	47.97	48.51	47.97		
Domo D					
5-mar	46.48	44.49	43.13		
15-mar	48.6	48.06	45.23		

Tabla 6.2.2 Temperaturas promedio registradas en el agua, mitad y punta de los domos.

Para el caso de los domos A y B el día que obtuvieron las temperaturas promedio más altas fue el 07-mar, caso contrario para el 15-mar donde fueron 2 °C más bajas; este suceso cambia para los domos C y D, donde la diferencia de las temperaturas entre un día y otro fueron en promedio 4 °C, siendo el 15-mar donde se alcanzaron las mayores temperaturas.

En el caso de los domos A, B y C, este último solo en el día 15-mar, muestran un calentamiento mayor de la cubierta en comparación al agua, ya sea por pequeños lapsos o por tiempos prolongados llegando hasta las 5 horas (figuras 6.3.1 y 6.3.3) como en el caso de los domos A y B del día 15-mar.

El domo D es el que mostró una mayor diferencia de temperaturas entre l el agua y la cubierta, con una diferencia promedio de 3 °C en ambos días. Por su parte

el domo el domo C en el día 05-mar la temperatura de su cubierta fue mayor que la del agua a lo largo de la experimentación.

Los días 5 y 7 de marzo en todos los domos muestran un descenso de la temperatura de forma gradual, comparado con el día 15-mar, donde después de las 15:00 muestra en todos los destiladores ascensos y descensos abruptos de temperatura (figuras 6.2.2, 6.2.4, 6.2.6 y 6.2.8).

6.3 FLUJOS EVAPORATIVOS

Los flujos de calor evaporativo son una relación del coeficiente de transferencia convectivo y evaporativo estos últimos están expresados en función de la temperatura del agua, la cubierta y las presiones parciales a las temperaturas de estas dos, se pueden consultar en el Anexo C. Los flujos evaporativos para cada domo se muestran a continuación:



Figura 6.3.1 Flujos de calor evaporativo para el domo A

El domo A muestra un menor flujo evaporativo que ronda entre los 0 y 100 W/m^2 , para el día 07-mar; en su segundo día, el incremento es bastante notable, teniendo un rango de 0 a 350 W/m^2 y mostrando una caída abrupta en el periodo de 14:00 a 15:30.



Figura 6.3.2 Flujos de calor evaporativo para el domo B

El flujo de calor evaporativo del domo B para ambos días se encuentra en un rango de 0 a 100 W/m^2 , sin embargo, en la mayor parte de la experimentación se mantienen en un rango de 0 a 20 W/m^2 .



Figura 6.3.3 Flujos de calor evaporativo para el domo C

El flujo del día 05-mar se ve incrementado pasando las 14:20, además de tener un rango ligeramente más amplio en comparación al segundo día de experimentación, el cual se encuentra entre 0 y 20 W/m^2 , teniendo un incremento de hasta 90 W/m^2 entre las 14:30 y las 15:30.



Figura 6.3.4 Flujos de calor evaporativo para el domo D

El domo D para el día 05-mar tuvo un rango de entre 20 y 80 W/m^2 en sus primeras 6 horas de exposición a la irradiancia solar, para el segundo día el rango se ve ampliado, siendo de entre 0 a 110 W/m^2 .

Durante el funcionamiento de los destiladores la radiación solar entra en contacto con la cubierta atravesándola, siendo absorbida por el agua y el material de la base, esta energía calienta el agua salina y la bandeja, transfiriendo calor al agua, produciendo su evaporación e incrementando la humedad del aire cercano a la superficie del agua, lo que genera corrientes convectivas dentro del destilador. El aire húmedo y caliente sube por densidad hasta la cubierta de cristal, donde parte del vapor de agua se condensa en forma de gotas que por gravedad escurren por las paredes, mismas que son enfriadas por el aire exterior, favoreciendo la condensación.

El flujo de transferencia de calor evaporativo está asociada a su vez con la tasa de destilación, por lo que sus comportamientos son similares. La intensidad en el flujo de calor evaporativo depende de la diferencia de temperaturas de la cubierta y el agua, diferencias muy marcadas indican un mayor flujo de energía, el caso óptimo es que el vapor de agua ceda energía en forma de calor sensible a la cubierta, esta al estar a menor temperatura transforma este calor sensible en calor latente, por lo que el agua condensara. Cuando tienen temperaturas iguales Q_{ew} cae, indicando que se está en equilibrio y no hay condensación.

Solo el domo A en el día 15-mar tuvo flujos evaporativos de hasta $250 W/m^2$, para los otros domos en ciertas horas apenas superaron los $100 W/m^2$, esta energía se relaciona con el flujo de masa que se da de por evaporación, para observar de mejor manera este concepto, se presentan las tasas de evaporación de cada domo.



Figura 6.3.5 Tasas de evaporación del domo A

La tasa de destilación del domo A en el día 15-mar es notablemente mayor que la del día 07-mar, especialmente en las primeras 4 horas, ya que a las 14:00 decae hasta valores de 0 ml y vuelve a incrementar pasadas las 15:30, mientras que, para el primer día, si bien la evaporación es baja, se mantiene de forma casi constante a lo largo de la experimentación.



Figura 6.3.6 Tasas de evaporación del domo B

La tasas de evaporación para ambos días del domo B se encuentran en un rango de 0 a 4 ml, para el primer día la mayor tasa de evaporación se dio entre las 14:00 y 16:30, por su parte, el segundo día tuvo su mejor evaporación solo en la primera hora comenzado el experimento, sin embargo, ambas tasas de evaporación son bastante bajas.



Figura 6.3.7 Tasas de evaporación del domo C

Para el primer día del domo C la tasa de evaporación estuvo entre 0 y 4.5 ml, teniendo en promedio 1.9 ml, teniendo su mejor evaporación pasadas las 14:30h. Para el segundo día la tasa de evaporación se posiciono entre 0 y 5 ml, siendo en promedio 0.9 ml y teniendo su máximo de evaporación entre las 15:20 y 15:40.



Figura 6.3.8 Tasas de evaporación del domo D

El domo D demostró tener una mayor consistencia que los otros domos, en su tasa de evaporación para el primer día se encontraba entre 1 y 4 ml, teniendo un promedio de 2.25 ml y para su segundo día tuvo una tasa de evaporación promedio de 2.74 ml, siendo entre las 13:00 y 15:30 el lapso donde mejor evaporación tuvo.

En la siguiente tabla se muestran los promedios de las tasas de destilación, así como el porcentaje de recuperación, la cantidad de destilado al final de cada día y su eficiencia.

Día	Tasa de destilación promedio [ml]	Destilado final [ml]	%Recuperación	Eficiencia	
		Domo A			
07-mar	1.7	50	76	11.83	
15-mar	5.6	47	54	9.37	
	Domo B				
07-mar	0.5	100	60	16.43	
15-mar	0.8	60	67	11.61	
		Domo C			
05-mar	1.9	160	33	13.47	
15-mar	0.7	108	64	10.68	
Domo D					
05-mar	2.25	300	40	20.13	
15-mar	2.74	140	70	11.16	

Tabla 6.3.1 Resultados de destilación

Como se observa en la tabla 6.3.1, quien tuvo mayor tasa de destilación fue el domo A en el día 15-mar, pero solo logro condensar 47 ml, esto se debe a que si bien el agua evaporaba a un buen ritmo, la cubierta tenía una temperatura por encima de este vapor, suministrando energía en forma de calor sensible impidiendo la condensación.

Nótese que el 15-mar al ser el día con mayor irradiancia alcanzada aumentó la tasa de evaporación en tres de los cuatro domos, sin embargo, para ese mismo día la irradiancia directa se vio abruptamente eclipsada por las nubes que llegaron aproximadamente a las 15:15. También se puede observar que en la mayoría de los casos el destilado final se vio reducido en un 50% en comparación con el primer día de experimentación.

Los domo C y D fueron los que mayor agua evaporaron, pero el domo B y D en su primer día de experimentación alcanzaron eficiencias del 16.43 y 20.13% respectivamente, esta eficiencia se relaciona al área del recipiente con la salmuera, al tener diámetros diferentes el área que recibiría la irradiancia sería más chica para los domos A y B con 0.0078 y 0.011m² respectivamente, y para el caso de los domos C y D que tenían los diámetros más grandes sus áreas fueron de 0.02 y 0.025m² respectivamente.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

- El porcentaje de atenuación interviene directamente entre la irradiancia y la temperatura del agua, de manera que el domo por su atenuación puede calentarse en mayor o menor medida por lo que su eficiencia como condensador vario con el porcentaje de atenuación.
- Los medios de transferencia de energía presentes en los destiladores solares fueron: radiativa, evaporativa y convectiva siendo esta ultima la más importante, donde la temperatura de la cubierta debe ser menor a la del agua para que la eficiencia en la condensación sea mayor.
- La transferencia de masa puede ser medida por medio de los flujos evaporativos, mostrando los mililitros que se pueden evaporar en cada momento, sin embargo, estos no se corresponden con los mililitros que se pueden condensar.
- La evaporación del agua contenida en una salmuera de litio aumento para los 4 casos donde se colocaron los domos.
- El domo D obtuvo las mayores tasas de destilación con 2.25 ml y 2.74 ml en promedio para su primer y segundo día respectivamente
- El domo D obtuvo la mayor eficiencia con 20.13% y una recuperación del 70% del agua destilada.

REFERENCIAS

- Adewole, B. Z., Arabambi, A. E. y Asere, A. A., (2020). Influence of temperature difference (water-cover surface) on the performance of a compact hemispherical solar still. *Nigerian Journal of Technology* [en línea]. **39**(3), 792–799. Disponible en: doi: 10.4314/njt.v39i3.19
- Álvarez Arellano, A.D. y Gaitán Morán, J., (-). Lagunas costeras y el litoral mexicano: Geología.
- Attia, M. E. H., Kabeel, A. E., Abdelgaied, M. y Shmouty, A. R., (2021a). Enhancing the hemispherical solar distiller performance using internal reflectors EI and Oued sand grains as energy storage mediums. Environmental Science and Pollution Research [en línea]. 29(15), 21451-21464. Disponible en: doi: 10.1007/s11356-021-17367-9

- Attia, M. E. H., Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., Essa, F. A. y Omara, Z. M., (2021b). Enhancement of hemispherical solar still productivity using iron, zinc and copper trays. *Solar Energy* [en línea]. **216**, 295–302. Disponible en: doi: 10.1016/j.solener.2021.01.038
- Attia, M. E. H., Kabeel, A. E., Bellila, A., Manokar, A. M., Sathyamurthy, R., Driss, Z. y Muthusamy, S., (2021c). A comparative energy and exergy efficiency study of hemispherical and single-slope solar stills. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea]. 28(27), 35649–35659. Disponible en: doi: 10.1007/s11356-021-13161-9
- Barbosa, H., Soares, A. M. V. M., Pereira, E. y Freitas, R., (2022). *Lithium: A review on concentrations and impacts in marine and coastal systems. Science of The Total Environment* [en línea]. 159374. Disponible en: doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159374
- Baspineiro, C. F., Franco, J. y Flexer, V., (2020). Potential water recovery during lithium mining from high salinity brines. *Science of The Total Environment* [en línea]. **720**, 137523. Disponible en: doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137523
- Comisión Nacional del Agua (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna de Mexicanos (0809), Estado de Chihuahua. México: CONAGUA
- De la Lanza Espino, G. J., Ortiz Pérez, M. A. y Carbajal Pérez, J. L., (2013). Diferenciación hidrogeomorfológica de los ambientes costeros del Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas* [en línea]. (81). Disponible en: doi: 10.14350/rig.33375
- Ejeian, M., Grant, A., Shon, H. K. y Razmjou, A., (2021). Is lithium brine water? *Desalination* [en línea]. **518**, 115169. Disponible en: doi: 10.1016/j.desal.2021.115169
- Elnaby Kabeel, A., Abdelgaied, M., Attia, M. E. H., Arıcı, M. y Abdel-Aziz, M. M., (2023). Performance enhancement of a conical solar still by optimizing inclination angle. *Solar Energy* [en línea]. **264**, 112001. Disponible en: doi: 10.1016/j.solener.2023.112001
- Fagundo Castillo, J. R., (2005). *Hidrogeoquímica*. La Habana, Cuba: Ministerio de Salud Pública.
- Flexer, V., Baspineiro, C. F. y Galli, C. I., (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of The Total Environment* [en línea]. 639, 1188–1204. Disponible en: doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.223
- Franco Magadan, F., (1976). *Estudio de un sistema de concentración de salmueras por evaporación solar.* Trabajo Fin de Grado. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Gallego Garcia M.D., (1992). Trabajo de Doctorado. Universidad Complutense de Madrid.
- He, X., Kaur, S. y Kostecki, R., (2020). Mining Lithium from Seawater. *Joule* [en línea]. 4(7), 1357–1358. Disponible en: doi: 10.1016/j.joule.2020.06.015

- Hermosillo Villalobos, J.J., (1989). *Destilación Solar.* México: COFE.
- Kabeel, A. E. y Abdelgaied, M., (2017). Observational study of modified solar still coupled with oil serpentine loop from cylindrical parabolic concentrator and phase changing material under basin. *Solar Energy* [en línea]. **144**, 71–78. Disponible en: doi: 10.1016/j.solener.2017.01.007
- Khalifa, A. J. N., (2011). On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes. *Energy Conversion and Management* [en línea]. **52**(1), 431–436. Disponible en: doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.018
- Liu, C., Li, Y., Lin, D., Hsu, P.-C., Liu, B., Yan, G., Wu, T., Cui, Y. y Chu, S., (2020). Lithium Extraction from Seawater through Pulsed Electrochemical Intercalation. Joule [en línea]. 4(7), 1459–1469. Disponible en: doi: 10.1016/j.joule.2020.05.017
- Lovedeep Sahota, T. (2017). *Advanced Solar-Distillation Systems*. Nueva Delhi: Springer.
- Madhav, S., Bahadur Singh, V., Manoj, K. y Sing, S., (2023). *Hydrogeochemestry of aquatic ecosystems.* E.E.U.U: Wiley.
- Manokar, A. M., Winston, D. P., Kabeel, A. E. y Sathyamurthy, R., (2018). Sustainable fresh water and power production by integrating PV panel in inclined solar still. *Journal of Cleaner Production* [en línea]. **172**, 2711– 2719. Disponible en: doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.140
- Manrique-Carreño, J., Martínez-Villa, É., Calderón-Maza, É. y Guamán-Jaramillo, G., (2023). Geochemical characterization of Lithium-bearing brines from Guaranda, Ecuador. *Boletín de Geología* [en línea]. 45(2). Disponible en: doi: 10.18273/revbol.v45n2-2023005
- Martínez, F. T. A. K., (2016). *Caracterización hidrogeoquímica del sistema de manantiales termales de Ixtapan de la sal Tonatico, Estado de México*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Martínez, F. T. A. K., (2020). Estudio hidroquímico e isotópico de los manantiales termales del Estado de México. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Omara, Z. M., Hamed, M. H. y Kabeel, A. E., (2011). Performance of finned and corrugated absorbers solar stills under Egyptian conditions. *Desalination* [en línea]. 277(1-3), 281–287. Disponible en: doi: 10.1016/j.desal.2011.04.042
- Padilla Sotelo, L. S., (2000). La población en la región costera de México en la segunda mitad del siglo XX. Investigaciones Geográficas [en línea]. 1(41). Disponible en: doi: 10.14350/rig.59105
- Pérez Santiago, A., (2023). *Caracterización de salares con posible potencial de Litio en Laguna Salada y Tulecheck, Baja California, México.* Tesis Fin de Grado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pilatowsky Figueroa, I. y García Valladares, O., (2017). *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residenciales, servicios e industria.* México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- PROMÉXICO, (2017). La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México. México: Secretaría de Economía.

- R. Fallahzadeha N. Gholamiarjenakib Z. Nonejadb M. Fallahzadehc M. Saghi, (2020). Mathematical modeling and experimental study of a modified hemispherical solar still. *Journal of Engineering Research and Application*. **10**(Issue 02 (Series -I)).
- Secretaria de Energía, (2021). Programa para el desarrollo para el sistema eléctrico nacional (PRODESEN). México: Secretaria de energía.
- Servicio Geológico Mexicano, (2011). *Inventario físico de los recursos minerales de la Carta Guzmán H13-A42.* Chihuahua, México: Secretaría de Economía.
- Servicio Geológico Mexicano, (2020). *Depósitos de litio en México.* México: Secretaría de Economía.
- Singh, G., Singh, P. K., Saxena, A., Kumar, N. y Singh, D. B., (2023). Investigation of conical passive solar still by incorporating energy metrics, efficiency, and sensitivity analyses for sustainable solar distillation. *Journal* of *Cleaner Production* [en línea]. 139949. Disponible en: doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139949
- Soberon Mobarak, M.J., (1986). Factibilidad de una industria de litio en México. Trabajo Fin de Grado, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Tiwari, A. K. y Tiwari, G. N., (2006). Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition. *Desalination* [en línea]. **195**(1-3), 78–94. Disponible en: doi: 10.1016/j.desal.2005.11.014
- Tiwari, A. K. y Tiwari, G. N., (2006b). Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition. *Desalination* [en línea]. **195**(1-3), 78–94. Disponible en: doi: 10.1016/j.desal.2005.11.014
- Velasco García, J.A., (2009). *Ambientes geológicos costeros del litoral de la bahía de La Paz, Baja California Sur, México.* Trabajo de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- Viatcheslav Tikhomirov, T., (2016). *Hydrogeochemistry fundamentals and advances*. Canada: Wiley
- Xiong, Y., Zhou, J., Lu, P., Yin, J., Wang, Y. y Fan, Z., (2022). *Electrochemical lithium extraction from aqueous sources. Matter* [en línea]. **5**(6), 1760–1791. Disponible en: doi: 10.1016/j.matt.2022.04.034
- Yang, S., Zhang, F., Ding, H., He, P. y Zhou, H., (2018). Lithium Metal Extraction from Seawater. *Joule* [en línea]. 2(9), 1648–1651. Disponible en: doi: 10.1016/j.joule.2018.07.006
- Younis, O., Hussein, A. K., Attia, M. E. H., Rashid, F. L., Kolsi, L., Biswal, U., Abderrahmane, A., Mourad, A. y Alazzam, A., (2022). Hemispherical solar still: Recent advances and development. *Energy Reports* [en línea]. 8, 8236–8258. Disponible en: doi: 10.1016/j.egyr.2022.06.037

ANEXO A

Código de programación del equipo CR1000X

Public Temp_agua_B Public Temp_mitad_B Public Temp_punta_B Public Temp_agua_C Public Temp_mitad_C Public Temp_punta_C Public Temp_agua_D Public Temp_mitad_D Public Temp_punta_D Public Rs Public X Const alfa=3.9080*10^-3 Const beta=-5.8019*10^-7 Const Rf=9800 Units BattV=Volts Units PTemp_C=Deg C Units Temp_agua_A=Deg C Units Temp_mitad_A=Deg C Units Temp_punta_A=Deg C Units Temp_agua_B=Deg C Units Temp_mitad_B=Deg C Units Temp_punta_B=Deg C Units Temp_agua_C=Deg C Units Temp_mitad_C=Deg C Units Temp_punta_C=Deg C Units Temp_agua_D=Deg C Units Temp_mitad_D=Deg C Units Temp_punta_D=Deg C Define Data Tables DataTable(Registro,True,-1)

> DataInterval(0,1,Min,10) Sample(1,Temp_agua_A,FP2) Sample(1,Temp_mitad_A,FP2) Sample(1,Temp_punta_A,FP2) Sample(1,Temp_agua_B,FP2)

Sample(1,Temp_mitad_B,FP2) Sample(1,Temp_punta_B,FP2) Sample(1,Temp_agua_C,FP2) Sample(1,Temp_mitad_C,FP2) Sample(1,Temp_punta_C,FP2) Sample(1,Temp_agua_D,FP2) Sample(1,Temp_mitad_D,FP2) Sample(1,Temp_punta_D,FP2)

EndTable

'Main Program

BeginProg

'Main Scan

Scan(30, Sec, 1, 0)

'Default CR1000X Datalogger Battery Voltage measurement 'BattV' Battery(BattV)

'Default CR1000X Datalogger Wiring Panel Temperature measurement 'PTemp_C' PanelTemp(PTemp_C,60)

BrHalf (X,1,mV5000,3,Vx1,10,4000,True ,0,60,1.0,0)

Rs=Rf*X/(1-X)

Temp_agua_C=(-alfa+SQR(alfa^2-4*beta*(-Rs/100+1)))/(2*beta)

'Turn AM16/32 Multiplexer On

PortSet(C2,1)

Delay(0,150,mSec)

'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel

PulsePort(C1,10000)

'Type K Thermocouple measurements 'Temp_agua_1' on the AM16/32 Multiplexer

TCDiff(Temp_agua_A,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)

'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel

PulsePort(C1,10000)

'Type K Thermocouple measurements 'Temp_mitad_1' on the AM16/32 Multiplexer TCDiff(Temp_mitad_A,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)

'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel

PulsePort(C1,10000)

'Type K Thermocouple measurements 'Temp_punta_1' on the AM16/32 Multiplexer

TCDiff(Temp_punta_A,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)

'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel

PulsePort(C1,10000)

'Type K Thermocouple measurements 'Temp_agua_1' on the AM16/32 Multiplexer TCDiff(Temp_agua_B,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)

'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel

PulsePort(C1,10000)

'Type K Thermocouple measurements 'Temp_mitad_1' on the AM16/32 Multiplexer

	TCDiff(Temp_mitad_B,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)
	'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel
	PulsePort(C1,10000)
	'Type K Thermocouple measurements 'Temp_punta_1' on the AM16/32 Multiplexer
	TCDiff(Temp_punta_B,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)
	'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel
	PulsePort(C1,10000)
	'Type K Thermocouple measurements 'Temp_mitad_1' on the AM16/32 Multiplexer
	TCDiff(Temp_mitad_C,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)
	'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel
	PulsePort(C1,10000)
	'Type K Thermocouple measurements 'Temp_punta_1' on the AM16/32 Multiplexer
	TCDiff(Temp_punta_C,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)
	'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel
	PulsePort(C1,10000)
	'Type K Thermocouple measurements 'Temp_agua_1' on the AM16/32 Multiplexer
	TCDiff(Temp_agua_D,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)
	'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel
	PulsePort(C1,10000)
	'Type K Thermocouple measurements 'Temp_mitad_1' on the AM16/32 Multiplexer
	TCDiff(Temp_mitad_D,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)
	'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel
	PulsePort(C1,10000)
	'Type K Thermocouple measurements 'Temp_punta_1' on the AM16/32 Multiplexer
	TCDiff(Temp_punta_D,1,mV200C,1,TypeK,PTemp_C,True,0,60,1,0)
	'Switch to next AM16/32 Multiplexer channel
	'Turn AM16/32 Multiplexer Off
	PortSet(C2,0)
	Delay(0,150,mSec)
	'Call Data Tables and Store Data
	CallTable Registro
NextSc	an
EndProg	

ANEXO B

Relación de la temperatura ambiente, irradiancia y velocidad del viento de los días en los que se llevaron a cabo las experimentaciones













ANEXO C

Coeficientes de transferencia de calor evaporativo y convectivo de cada domo



• Domo A



Domo B





Domo C





Domo D



