



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
“Francisco García Salinas”

Unidad Académica de Ciencias Químicas
Maestría en Ciencia y Tecnología Química

TESIS

Purificación de aguas mediante el uso de un nuevo prototipo de destilador solar

Para Obtener el Grado de
Maestro en Ciencia y Tecnología Química

Presenta:

Q.F.B. Diego Armando Alvarado Camacho

Director de Tesis: Dr. en C. Hiram Hernández López
Co-Director de Tesis: Dr. en C. Lázaro Canizalez Dávalos
Asesor Externo: Dr. en C. Raúl Adrián Martínez Orozco

Junio 2019

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo investigación, se realizó en el Laboratorio de Síntesis Orgánica de la Maestría en Ciencia y Tecnología Química (MCTQ) de la Unidad Académica de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas, contando con los apoyos financieros otorgados por la Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de la beca de maestría con número de CVU No. 862562.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo especialmente a mi mamá por su constante apoyo, lo cual ha facilitado en gran medida el logro de muchas de mis metas y espero siga siendo así durante muchos años más. A mi papá, por sus grandes consejos y enseñanzas durante la vida, sin él muchas cosas no se hubiesen logrado. A mis hermanos por estar conmigo en todo momento, generalmente regañándome, en virtud de ser una mejor persona día a día.

Agradecer también a mis amigos Ricardo, Cristóbal y Felipe, por todas esas risas y aprendizajes que tuvimos durante este tiempo, “mi Cristo le habla el moreno”.

También agradecer a mi comité tutorial por cada una de las enseñanzas impartidas, así como también regaños y corajes, que espero nos hayan servido a ambas partes y para así seguir creciendo en todos los ámbitos

Índice	
Lista de tablas	iv
Lista de figuras	v
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación de la disponibilidad de agua en el estado de Zacatecas	3
1.2. Factores que influyen en la disponibilidad del agua	6
1.2.0. Factores demográficos	6
1.2.1. Factores climáticos	7
CAPÍTULO 2	8
2.0. Principales contaminantes del agua	8
2.1 . Contaminantes biológicos	8
2.2 . Contaminantes químicos	9
2.2.1. Compuestos derivados del nitrógeno	9
2.2.2. Cloruros	10
2.2.3. Sulfatos.	10
2.3 . Efectos a la salud a causa de Metales pesados:	10
2.3.1. Mercurio (Hg)	10
2.3.1. Plomo (Pb)	11
2.3.2 Arsénico (As)	11
2.3.2. Cadmio (Cd)	11
2.3.4. Cobre (Cu)	12
2.3.5. Cromo (Cr)	12
CAPÍTULO 3	13

3.0	. Métodos actuales para la purificación de agua	13
3.0.1.	Ebullición del agua	13
3.0.2.	Desinfección con cloro	13
3.0.3.	Filtros de cerámica	13
3.0.4.	Filtro de carbón activado	14
3.0.5.	Desinfección por rayos Ultra-Violeta (UV)	14
3.0.6.	Purificación por ósmosis inversa	14
3.0.7.	Purificación por ozono	15
3.1.	Estatus fisicoquímico del agua distribuida en Zacatecas	17
CAPÍTULO 4		18
4.0	Diferentes tipos de destiladores solares pasivos existentes (ventajas y desventajas)	18
4.0.1	Destilador solar de caseta.	20
4.0.2	Destilador de cascada.	20
4.0.3	Destiladores inclinados con flujo de agua	21
4.0.4	Destilador solar esférico.	21
4.1	Diferentes tipos de destiladores solares activos existentes (ventajas y desventajas)	25
4.1.1	Destilador solar acoplado a un colector de placa plana	25
4.1.2	Destilador solar de caseta con cuenca semiesférica acoplado a un concentrador cónico con y sin material de cambio de fase (pcm)	26
4.1.3	Destilador de caseta acoplado a un colector compuesto de un serpentín de tubos de cobre	27
CAPÍTULO 5 CONSIDERACIONES GENERALES		29
5.0.	Justificación	29
5.1	Hipótesis	30
5.2	. Objetivo General	30

5.3 . Objetivos Particulares	30
CAPÍTULO 6	31
6.0. Materiales y Métodos	31
6.1. Construcción del destilador solar	31
6.1.1. Cálculo de áreas y grados de inclinación de los reflectores	31
6.2. Cálculo de la eficiencia y potencia para el destilador solar	34
6.3. Conductividad iónica del agua	35
CAPÍTULO 7	37
7.0 Discusión y Resultados	37
7.1. Construcción del destilador solar	37
CAPÍTULO 8	42
8.0. Monitoreo de la temperatura alcanzada por la estufa solar	42
8.1. Cálculo de eficiencia	45
8.2 Cálculo de potencia	46
8.3. Volúmenes del destilado	47
9.0. Conclusiones	49
CAPÍTULO 10	50
10.0 Perspectivas	50
10.1. Referencias	51
6. Anexo 1: Actividades extracurriculares (congresos, diplomados, cursos, etc).	53

Lista de tablas

Tabla 1. Límites permisibles de características biológicas.....	15
Tabla 2. Límites permisibles de compuestos químicos	15
Tabla 3. Límites permisibles de características físicas y organolépticas	16
Tabla 4. Límites permisibles de compuestos químicos según la EPA	16
Tabla 5. Valores de conductividad	35
Tabla 6. Valores de conductividad térmica de los materiales más utilizados en las estufas solares	41
Tabla 7. Valores de conductividad obtenidos.....	47

Lista de figuras

Figura 1. Regiones y cuencas hidrológicas del estado de Zacatecas	4
Figura 2. Área que abarcan los principales acuíferos que distribuyen agua al municipio de Zacatecas	5
Figura 3. Tipos de destiladores solares y descripción.....	19
Figura 4. Destiladores solares de doble caseta, caseta sencilla y bóveda	20
Figura 5. Destilador de cascada.....	21
Figura 6. Destilador solar de tipo esférico	22
Figura 7. Representación del destilador casero	23
Figura 8. Imagen real del destilador SOLVATTEN.....	25
Figura 9. Equipo de destilación acoplado a colector	26
Figura 10. Destilador solar operante con materiales PCM	27
Figura 11. Destilador solar acoplado a un colector con tubos de cobre.....	28
Figura 12. Dimensiones para la construcción de la estufa solar tipo caja. a) Base para cubierta inferior de la caja. b) Base para reflectores laterales de la caja. c) Base para reflectores superiores.	32
Figura 13. Concentrador solar metálico recubierto de pintura negra. a) Lámina galvanizada. b) contenedor galvanizado con capacidad de 2L.....	33
Figura 14. Medidas de los materiales para construcción de la base.....	33
Figura 15. Planos estructurales de la estufa solar.	34
Figura 16. Ángulos de incidencia en las superficies reflectoras. a) Ángulo correcto de reflexión, el rayo incide de manera adecuada sobre la superficie objetivo. b) Ángulo incorrecto de reflexión, el rayo jamás incide sobre la superficie, siendo reflejado en otra dirección	38
Figura 17. Movimiento del sol a través de cada hora.....	39
Figura 18. Estufa solar ya finalizada a) Vista frontal. b) Vista lateral. c) Vista interna de la estufa solar.....	40
Figura 19. Relación entre Radiación y temperatura de la estufa solar.....	44
Figura 20. Comparativa de temperaturas alcanzadas con un destilador solar pasivo y activo	45

RESUMEN

La incidencia de enfermedades provocadas por el consumo de agua contaminada se ha convertido en un problema de salud importante en los últimos años. Por tal motivo, se han desarrollado equipos innovadores de alta eficiencia con costos de adquisición elevados, mantenimiento especializado y uso excesivo de energía eléctrica para el proceso de purificación; por lo que, en la búsqueda en nuevos dispositivos que resuelvan esta problemática, se han propuesto los purificadores impulsados por energías renovables como los destiladores solares que suelen ser económicos, con geometrías de construcción diversas, de sencillo mantenimiento y eliminación de contaminantes eficiente y con bajos rendimientos en el purificado. Por tal motivo, en este trabajo de tesis, se desarrolló un nuevo prototipo de destilador tipo caja adicionado con reflectores solares en el que se evaluó el desempeño térmico, eficiencia, poder de cocción y la capacidad de purificación.

Los resultados obtenidos muestran valores de 125 °C dentro del equipo, 160 °C en la charola y 114 °C en el agua a destilar (1.5 l); que se alcanzan dentro de los primeros 30 minutos de exposición a la radiación solar (250 w/m² promedio) y manteniéndolos durante 3 horas. Mientras que los valores de conductividad del agua (correlación con la presencia de sales disueltas), disminuyeron drásticamente, de 546.3 μs/cm a 17.4 μs/cm en el destilado, situándose por encima del límite inferior del agua potable de acuerdo a los valores recomendados por laboratorios Lentech. Así mismo, el prototipo alcanzó un 37% de eficiencia con poder de cocción del 52.90% y capacidad de purificación entre los 250 y 350 ml en 6 horas de exposición al sol. Estos datos permiten situarlo dentro de las especificaciones recomendadas a equipos similares encontrados en el mercado, inclusive superando a la estufa solar de reflectores parabólicos.

ABSTRACT

The incidence of diseases caused by the consumption of contaminated water has become a major health problem in recent years. For this reason, innovative high efficiency equipment has been developed with high acquisition costs, specialized maintenance with an excessive use of electrical energy for the purification process, so, in the search for new devices that solve this problem, purifiers driven by renewable energies have been proposed. Solar distillers which are usually economic, with geometries of diverse construction, simple maintenance and elimination of efficient pollutants and, low yields in the purified water. For this reason, in this work, a new box-type distiller prototype was developed, provided with solar reflectors and thermal performance evaluation, efficiency, cooking power and, purification capacity.

The results obtained show values of 125 °C inside the equipment, 160 °C in the tray and 114 °C in the water to be distilled (1.5 l); that are reached within the first 30 minutes of exposure to solar radiation (250 w/m² average) and keeping them for 3 hours. While the values of water conductivity (correlation with the presence of dissolved salts) decreased drastically, from 546.3 μs/cm to 17.4 μs/cm in the distillate, being the lower limit of drinking water according to the values recommended by Lentech laboratories. Likewise, the prototype reached 37% efficiency with cooking power of 52.90% and, purification capacity between 250 and 350 ml in 6 hours of sun exposure. Allowing it, to place within the recommended specifications similar equipment found in the market, inclusive overcoming the solar stove of parabolic reflectors.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Sin lugar a dudas, el agua es el factor de mayor importancia para el sustento y desarrollo humano y actualmente su disponibilidad y accesibilidad representa uno de los principales problemas que aquejan a la población mundial. A pesar de que existen regiones del mundo donde la disponibilidad del vital líquido es muy baja (entre los 100 a 1700 metros cúbicos/año/habitante). En términos reales, cerca del 38% del total de habitantes tiene acceso a agua con bajos parámetros de saneamiento mientras que un 17% dispone de agua sin ningún proceso de potabilización, lo que provoca millones de muertes anuales por ingesta de agua no apta para consumo humano [3]. Las proyecciones a futuro han determinado que los problemas con este vital líquido se harán cada vez más severos, incluso en regiones que actualmente se consideran con presencia de abundantes recursos hídricos [4]. Se estima que para el 2025, alrededor del 62% de la población mundial vivirá en países que experimenten estrés hídrico, es decir, lugares donde la demanda de agua será más alta que la cantidad de líquido disponible [5].

Las principales causas que provocan un decremento en la disponibilidad de recursos hídricos son el cambio climático y la sobreexplotación de mantos acuíferos. Un caso que evidencia la alta posibilidad de experimentar una crisis de agua en el corto plazo es el que ocurrió recientemente en Ciudad del Cabo, Sudáfrica. Los habitantes experimentaron problemas con el suministro de agua, derivado principalmente de los cambios en las condiciones meteorológicas de la región y la explosión demográfica, lo que afectó directamente la recuperación de mantos acuíferos (debido a la falta de lluvia y aumento en la temperatura lo que causó evaporación), por lo que se realizaron diferentes campañas con la finalidad de ahorrar la mayor cantidad de agua posible. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos, el gobierno local contempló la posibilidad de que la ciudad se quedaría sin agua en el presente año, lo que provocaría racionalización extrema del líquido para 4

millones de habitantes y muy probablemente conllevaría a una situación de anarquía [6-8].

En México, el volumen de agua renovable per cápita es de 4,028 metros cúbicos/año/habitante lo cual se considera un rango intermedio y este número se debe a la variedad de climas encontrados en la República Mexicana [9, 10]. Por citar algunos ejemplos que evidencian estas diferencias, en los estados del norte del país (Chihuahua, Sonora) abundan los climas áridos, habita la mayor parte de la población y los eventos hidrometeorológicos no son muy frecuentes, lo que conlleva a que los poblados tengan carencia de agua, a diferencia de lo que ocurre en los estados de zona sur del país (Chiapas, Tabasco) donde habitan menos personas, los eventos hidrometeorológicos son más frecuentes y por ende la disponibilidad de agua es elevada [11]. En relación a esto, los datos publicados por la SEMARNAT, mencionan que la cobertura promedio a nivel nacional de agua potable es del 92%; en zonas urbanas asciende al 95%, mientras que en zonas rurales (localidades menores a 2,500 habitantes), ronda el 78%. El decremento tan marcado de la disponibilidad de agua en las regiones campestres se debe principalmente a la dispersión de la población y la localización de poblados rústicos en condiciones fisiográficas complejas, lo que conlleva a la dificultad técnica y/o financiera de desarrollar sistemas de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, A pesar de que los datos en nuestro país parecen alentadores, en la realidad más de 35 millones de mexicanos viven con escasez extrema de agua y cerca de 43 millones tienen disponibilidad baja de este líquido. De continuar los actuales esquemas de uso y aprovechamiento ineficiente de los recursos hídricos, México experimentaría un colapso en la disponibilidad de este recurso en el mediano plazo [12].

1.1. Situación de la disponibilidad de agua en el estado de Zacatecas

Las aguas superficiales del estado están distribuidas en cuatro regiones o cuencas hidrológicas (Figura 1), las cuales se describen como:

- RH11 Presidio-San Pedro: La cual tiene una cobertura de sólo el 3.64% de la superficie del estado, la podemos ubicar al centro-oeste de la entidad [13].
- RH12 Lerma-Santiago: Tiene un alcance del 32.68% de la superficie estatal, drenando las aguas del sur de la entidad hacia el río Grande de Santiago para desembocar finalmente en el Océano Pacífico [13].
- RH36 Nazas-Aguanaval: Cubre el 23.01% de la superficie estatal, drenando las aguas del oeste y noroeste de la entidad a través principalmente del río Aguanaval [13].
- RH37 El Salado: Cubre el 40.67% de la superficie estatal, abarcando parte del centro, el noreste y el este de la entidad [13].

1. Acuífero de Calera (3225): La zona geohidrológica Calera se localiza en la porción central del Estado de Zacatecas. El área cubre una superficie aproximada de 2,087.6 km², que representa el 2.8% del territorio estatal; ocupando en su totalidad los municipios de Gral. Enrique Estrada y Morelos, y de manera parcial a los municipios de Calera, Fresnillo, Pánuco, Veta Grande y Zacatecas [14].
2. Acuífero de Jerez (3205): El acuífero Jerez se localiza en la porción Centro Suroeste del Estado de Zacatecas, limitando al Sur con el Estado de Jalisco. El área cubre una superficie aproximada de 2,471 km², que representa el 3% del territorio estatal; ocupando de manera parcial a los municipios de Zacatecas, Fresnillo, Jerez, Villanueva, Tepetongo, Susticacán y una pequeña fracción del municipio de Calera, que corresponde a una zona topográficamente alta [15].

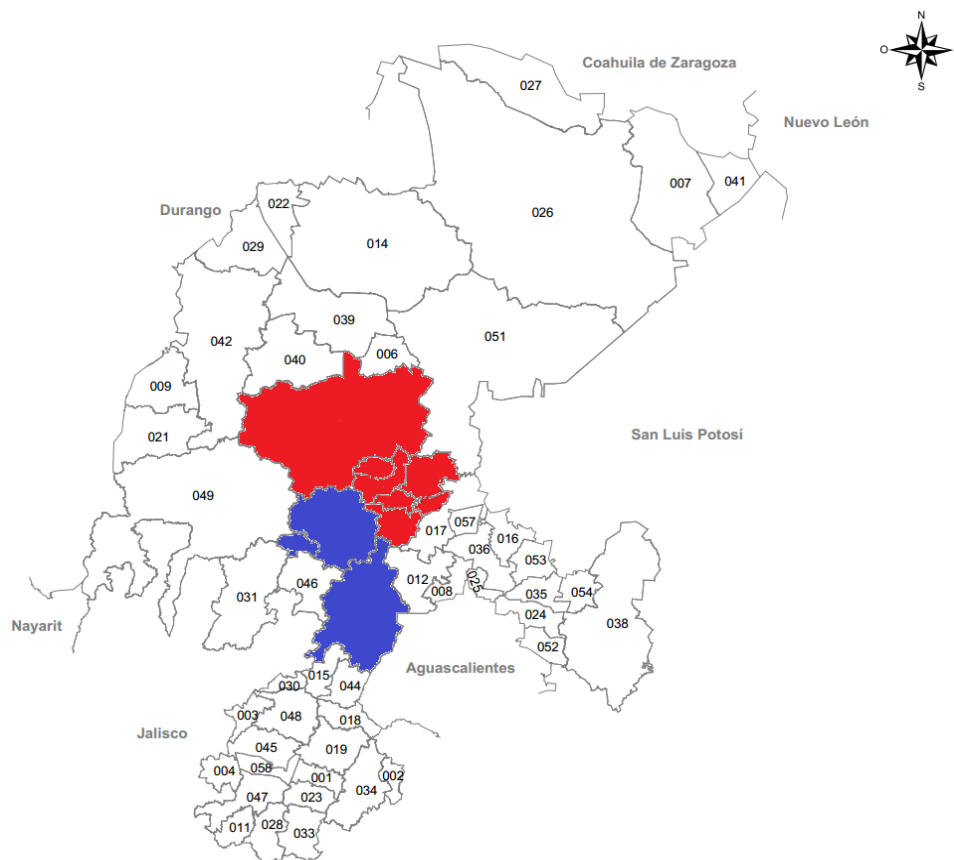


Figura 2. Área que abarcan los principales acuíferos que distribuyen agua al municipio de Zacatecas [16].

1.2. Factores que influyen en la disponibilidad del agua

Existen diversos factores que se involucran directamente con la disponibilidad de agua adecuada para el consumo humano, los cuales se describen a continuación:

1.2.0. Factores demográficos

El crecimiento de la población y la urbanización tienen un impacto profundo en la disponibilidad de agua, puesto que estos dos eventos aumentan de forma dramática la demanda del vital líquido en las actividades diarias. En diversas ciudades de primer mundo el abastecimiento de agua potable experimenta situaciones de crisis importantes debido a la cantidad de personas y actividades industriales que ahí se realizan. Es por esto que, alrededor del mundo, se han realizado campañas o proyectos en los cuales se incita a reutilizar y/o tratar la mayor cantidad de agua, con la finalidad de corregir los problemas que se tienen con el abastecimiento de la misma [17]. Un ejemplo particular donde se evidencia el efecto del incremento de la población en los requerimientos de agua potable es el caso de la India. En los años 60's su población rondaba los 445 millones de habitantes y la demanda del vital líquido fue de 277 billones de metros cúbicos, mientras que para el año 2000 los habitantes incrementaron a 1044 millones y la demanda incrementó 145%. Las proyecciones para el año 2025 estiman que habrán 1 451 millones de habitantes, por lo que la demanda aumentará en otros 150 billones de metros cúbicos, situación que podría representar un problema de suma importancia para los habitantes de este país por un posible agotamiento de los mantos acuíferos [18].

1.2.1. Factores climáticos

Los cambios en el medio ambiente causados directa o indirectamente por las actividades humanas por lo general influyen en el cambio climático global, lo que a su vez impacta en los suministros y demandas regionales de agua. Se ha registrado que dichos cambios en las condiciones ambientales influyen muy probablemente en un aumento o disminución de la precipitación o bien en un incremento en las tasas de evaporación aumentando la escasez del vital líquido en determinadas localidades [19].

CAPÍTULO 2

2.0. Principales contaminantes del agua

Como se ha descrito previamente, el agua es un factor determinante para el desarrollo humano, siempre y cuando cumpla con las características mínimas de seguridad que permitan su uso. Sin embargo, si se encuentra contaminada, puede convertirse en una amenaza latente o en un problema importante, por el hecho de que puede provocar epidemias y enfermedades crónicas [20, 21]. Por tal razón, es de suma importancia conocer los contaminantes del agua, con el objetivo de tener la posibilidad de eliminarlos para lograr que el líquido pueda ser potabilizado de forma eficiente.

Los contaminantes más comunes del agua se clasifican en biológicos y químicos. Los primeros se relacionan con microorganismos o bien sus productos metabólicos, mientras que los segundos pueden ser compuestos o elementos químicos.

2.1. Contaminantes biológicos

Las bacterias más comunes en el agua, pertenecen a los géneros *Vibrio* y *Escherichia*. Las que pertenecen al género *Vibrio* son anaerobias facultativas y además tienen como característica importante la inducción de crecimiento mediada por sodio, el cual es un ión muy común en diversos cuerpos de agua. Diversas especies son capaces de infectar al ser humano incluyendo *V. fluvialis*, y *V. mimicus*, las cuales pueden causar diarrea o infecciones del tracto gastrointestinal [20, 22, 23]. Por otra parte, las bacterias del género *Escherichia* son anaerobias facultativas y la especie más común en el agua es *E. coli*, la cual produce un cuadro clínico caracterizado por una diarrea profusa que dura varios días y que a menudo conduce a la deshidratación y la desnutrición sobre todo en niños pequeños [20].

2.2. Contaminantes químicos

2.2.1. Compuestos derivados del nitrógeno

El nitrógeno es un elemento clave para diversos procesos biológicos y se relaciona principalmente con el crecimiento de las plantas. En condiciones normales, diversas bacterias del género *Rhizobium* se encargan de fijar el nitrógeno atmosférico en la tierra para que pueda ser usado por las plantas. Sin embargo, debido a las prácticas humanas relacionadas con la producción agrícola que incluyen, entre otras cosas, el uso de fertilizantes nitrogenados, la disponibilidad del nitrógeno ha sobrepasado las necesidades de la vegetación y los remanentes han terminado por contaminar el agua subterránea. Los derivados nitrogenados que se han relacionado principalmente con efectos contaminantes son los nitritos, nitratos y amonios. Se ha reportado que estos compuestos y sus metabolitos en altas concentraciones son perjudiciales para la salud humana y particularmente dañinos en los infantes. Para que el agua pueda ser considerada para el consumo humano, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece concentraciones máximas de nitrato de 10 mgN/l, nitrito de 0.03 mgN/l y Amonio de 0.4 mgN/l. No obstante, se tiene registro que el nitrato en el agua subterránea de algunas regiones como México, E.U.A y algunos países de Europa llegan a valores que rondan los 50 mgN/l [24, 25]. Una de las enfermedades características ocasionada por una exposición prolongada a los compuestos derivados del nitrógeno es la metahemoglobinemia, la cual produce hipoxia tisular y en casos extremos, la muerte. Esto ocurre porque los eritrocitos pierden la capacidad de transportar oxígeno y liberarlo de forma adecuada en los tejidos, debido a un incremento en la concentración de metahemoglobina, la cual contiene Hierro oxidado (Fe^{+3}) que se produce cuando los nitritos en altas concentraciones provenientes del agua de consumo oxidan al Fe^{+2} del grupo prostético de la hemoglobina [26].

2.2.2. Cloruros

Los cloruros son compuestos ubicuos del agua y presentan concentraciones que varían desde pocas ppm hasta varios gramos por litro. El agua arrastra a estos iones al interaccionar con el suelo, ya que forma parte importante del mismo. En los humanos, el consumo elevado de iones cloruro provoca problemas a la salud, principalmente en el sistema cardiovascular, siendo las personas con obesidad y edad avanzada las más susceptibles. Por otra parte, se ha documentado que en mujeres postmenopáusicas la ingestión elevada de estos iones podría facilitar la aparición de osteoporosis, al aumentar la pérdida de calcio [27].

Aunado a los efectos perjudiciales sobre la salud, la presencia elevada de cloruros en el agua puede dañar el sistema de distribución de la misma, ya que puede promover la corrosión de los metales que la componen y de igual forma, el riego de cultivos con agua con niveles elevados de cloruros evita su crecimiento idóneo, por lo cual este ión puede afectar no solo cuestiones de salud, sino también impacta directamente en aspectos económicos [27].

2.2.3. Sulfatos.

Los sulfatos son compuestos constituidos por oxígeno y azufre y su presencia en el agua es ubicua. Se obtiene por el arrastre de algunos minerales que se encuentran en la tierra y es común encontrarlo en las aguas subterráneas. La ingestión de agua con altos niveles de sulfatos se ha relacionado principalmente con diarrea y se presenta en personas que están expuestas a valores por encima de 250 mg/L [27, 28].

2.3. Efectos a la salud a causa de Metales pesados:

2.3.1. Mercurio (Hg)

El mercurio y algunos de sus derivados se han relacionado con efectos importantes en la salud y su toxicidad varía según el tipo de compuesto mercúrico

que se ingiere, la dosis y la tasa de exposición [29, 30]. El mercurio elemental tiene la capacidad de atravesar la barrera hematoencefálica y puede causar afecciones en el Sistema Nervioso Central provocando temblores, cambios en la personalidad, pérdida de memoria, depresión, delirios y alucinaciones [31, 32].

2.3.1. Plomo (Pb)

Posterior a la ingestión, el plomo es absorbido y almacenado en diversos tejidos, principalmente en huesos y sangre. Con el paso del tiempo, estos tejidos de almacén se encargan de liberarlo constantemente y causa efectos adversos tales como retraso del desarrollo mental e intelectual de niños, hipertensión y otras enfermedades cardiovasculares [30, 33, 34].

2.3.2 Arsénico (As)

El arsénico es un elemento que en fechas recientes ha sido estudiado intensamente debido a los diversos casos reportados de envenenamiento. Su toxicidad se relaciona principalmente con el tipo de arsénico ingerido (elemental o en complejo) aunque a la fecha se desconoce en gran medida el mecanismo mediante el cual produce patologías. Diversas investigaciones afirman que el arsénico promueve el deterioro de la respiración celular a través de la interferencia con la fosforilación oxidativa causada por la inhibición de varias enzimas mitocondriales, lo cual ocasionará diferentes alteraciones en el organismo principalmente a nivel bioquímico, tales como diabetes, carcinomas, problemas neurológicos, pulmonares y cardíacos [35-38].

2.3.2.Cadmio (Cd)

La exposición crónica a este metal produce anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis, osteomalacia, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos (cefalea, vértigo, alteración del sueño, temores, sudoración, contracciones musculares involuntarias), pérdida de peso y apetito, cáncer de

próstata y pulmón. En intoxicación aguda hay neumonitis y edema pulmonar, gastroenteritis, náuseas, vómito, dolor abdominal, diarrea, fallo renal e incluso puede provocar aberraciones cromosómicas, efectos teratogénicos y congénitos [30, 39].

2.3.4. Cobre (Cu)

La exposición aguda al sulfato de cobre puede producir necrosis hepática que puede conducir a la muerte [30].

2.3.5. Cromo (Cr)

Principalmente puede causar complicaciones respiratorias, gastrointestinales e incluso se le ha relacionado con la aparición de neoplasias principalmente de pulmón o gastrointestinales todo depende del tipo de exposición [40].

CAPÍTULO 3

3.0. Métodos actuales para la purificación de agua

Como se describió en la sección anterior, los contaminantes del agua son diversos y pueden causar efectos deletéreos importantes. En este sentido se han desarrollado diversos procedimientos basados en metodologías tanto físicas como químicas, enfocados en la eliminación total o parcial de estos contaminantes. A continuación, se describirán algunos de estos métodos.

3.0.1. Ebullición del agua

Este es un método sencillo y económico para la desinfección y consiste en hervir el agua durante 15 a 30 minutos, con el objetivo de eliminar bacterias. El incremento de la temperatura provoca la lisis de los microorganismos contaminantes por diversos mecanismos, incluyendo la desnaturalización de proteínas bacterianas y el rompimiento de membranas plasmáticas. Su principal desventaja es la concentración de minerales debido a la evaporación [41].

3.0.2. Desinfección con cloro

La cloración suele ser económica, eficaz y rápida para la eliminación de bacterias en el agua. El cloro es un agente altamente oxidante que atraviesa la membrana plasmática de los microorganismos patógenos para luego oxidar y/o desnaturalizar diversos compuestos celulares tales como lípidos, ácidos nucleicos o proteínas, particularmente las enzimas que se relacionan con el proceso de respiración. La concentración que se considera efectiva para eliminar patógenos e inocua para el ser humano ronda los 2mg/L, la cual se agrega por norma al agua de proveniente de la red de distribución [41].

3.0.3. Filtros de cerámica

Su función principal es la de separar la materia sólida y algunos microorganismos del líquido en base al tamaño del poro que poseen. El principal

inconveniente es que pueden promover eventualmente el desarrollo de colonias de microorganismos, por lo que requiere la adición de plata iónica, que presenta un efecto germicida y contrarresta el desarrollo de bacterias [41].

3.0.4. Filtro de carbón activado

El filtro de carbón activado posee poros microscópicos que son capaces de capturar y romper moléculas contaminantes. Es un método eficiente para eliminar sabores, olores e incluso retener sólidos pesados. Su principal desventaja radica en el hecho de que puede taparse y contaminarse con microorganismos por lo que su mantenimiento debe realizarse en periodos cortos [41].

3.0.5. Desinfección por rayos Ultra-Violeta (UV)

La radiación UV es capaz de provocar daños irreversibles al DNA de las bacterias contaminantes del agua. Esto ocurre gracias a que los ácidos nucleicos absorben la energía de la luz UV y provocan la formación de dímeros de timina, que bloquean el proceso de replicación de DNA y además pueden promover daños genéticos importantes en las bacterias. Ambos eventos limitan la capacidad infectiva y reproductiva de los microorganismos [41].

3.0.6. Purificación por ósmosis inversa

En este proceso se utiliza una membrana semipermeable que separa y elimina del agua los sólidos, sustancias orgánicas, virus y bacterias disueltas en el agua. Puede eliminar alrededor del 95% de los sólidos disueltos totales y el 99% de todas las bacterias. Por efecto de la presión, el agua sin purificar va atravesando membranas de tamaño de poro específico que limitan el paso de iones y microorganismos, por lo que el agua que se obtiene al final del proceso está libre de todos estos elementos contaminantes [41].

3.0.7. Purificación por ozono

El ozono emplea diversos mecanismos para la eliminación de bacterias entre los que destacan el rompimiento de membranas plasmáticas y la interferencia en el metabolismo de los microorganismos, a través de la inhibición y el bloqueo de la operación del sistema de control enzimático, eventos que ocurren por el hecho de que el ozono es un compuesto con alta capacidad oxidante. Además de la eliminación de microorganismos, el ozono también reduce de manera importante el aspecto turbio, mal olor y el sabor que pueda contener el agua [41, 42].

A pesar de que los sistemas antes mencionados son efectivos en lo que respecta a la eliminación de diversos contaminantes, es imposible que la purificación pueda llegar al 100%, razón por la cual se han establecido los límites mínimos para considerar que el agua es apta para consumo humano. La evaluación de la calidad del agua potable en nuestro país, se basa en la norma NOM-127-SSA1-1994 en donde se establecen los límites permisibles de microorganismos (Tabla 1) y diversos compuestos químicos (Tabla 2), así como las características físicas y organolépticas (Tabla 3) que debe presentar el agua para ser considerada para consumo humano [43].

Tabla 1. Límites permisibles de características biológicas [44]

Característica	Límite permisible.
Organismos coliformes totales	2 NMP/100ml 2 UFC/100ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100ml Cero UFC/100ml

Tabla 2. Límites permisibles de compuestos químicos [44]

Características	Límite permisible (mg/l)	Características	Límite permisible (mg/l).
Aluminio	0.20	Manganeso	0.15
Arsénico	0.05	Mercurio	0.001
Bario	0.70	Nitratos	10.00
Cadmio	0.005	Nitritos	0.05
Cianuros (como CN-)	0.07	Nitrógeno amoniacal	0.50
Cloruro residual libre	0.2-1.50	DDT (total de isómeros)	1.00

Cloruros (como Cl-)	250.00	Plomo	0.025
Cobre	2.00	Sodio	200.00
Cromo total	0.05	Sólidos disueltos totales	1000.00
Dureza total (como CaCO3)	500.00	Sulfatos (como SO4=)	400.00
Fierro	0.30	Zinc	5.00
Fluoruros (como F-)	1.50		

Tabla 3. Límites permisibles de características físicas y organolépticas [44]

Característica	Límite permisible.
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptan aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Cada país tiene sus parámetros particulares para establecer la inocuidad del agua y al ser comparados entre sí, en algunas ocasiones presentan discrepancias importantes. Esto obedece a que las actualizaciones de estas normas se realizan con mayor o menor frecuencia. En el caso de la Norma Oficial Mexicana no se ha actualizado desde hace algunas décadas, lo que explica las diferencias con respecto a las normas oficiales de Estados Unidos de América (Tabla 4).

Tabla 4. Límites permisibles de compuestos químicos según la EPA [45]

Compuesto	Criterio máximo µg/L	Criterio continuo µg/L.
Arsénico	360m	190m
Cadmio	3.7e	1.0e
Cianuro	22	5.2
Cloruro residual	0	0
Cloruros	0	0
cobre	17e	11e
cromo	550e	180e
Mercurio	21m	0.012ip
DDT	1.1g	0.001g
Plomo	65e	2.5e

Zinc	110e	100e
------	------	------

3.1. Estatus fisicoquímico del agua distribuida en Zacatecas

Como se describió previamente, existen dos cuerpos de agua principales que proveen del vital líquido a la ciudad de Zacatecas que son los acuíferos de Calera y Jerez. Con respecto al de Calera los análisis fisicoquímicos indican que es de buena calidad para todo uso. El contenido de sólidos totales disueltos (STD) varían de 309 a 1,339 partes por millón (ppm), con un promedio de 498 ppm. Por lo que el agua puede ser catalogada de acuerdo a la clasificación de Wilcox como C2 - S1, que consiste en aguas de salinidad media y poco sodio. Se observa que las concentraciones más bajas se ubican en las porciones Occidental y Sur de la zona, de donde se deduce que existe aportación subterránea de agua de reciente infiltración procedente de esas porciones. La concentración salina del agua se incrementa paulatinamente en dirección Este y Norte del valle [14]. En lo que respecta al acuífero de Jerez, el agua proveniente del mismo es de buena calidad, teniéndose concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) que varían de 130 a 764 partes por millón (ppm). La concentración de cloruros varía de 10 a 60 mg/l. Los valores más altos, de 50 a 60 mg/l, se presentan en la porción oeste del valle, y los menores en el centro del mismo, a lo largo del curso del Río Jerez. La concentración de sulfatos varía de 50 a 250 mg/l. En la porción norte del valle, el incremento en la concentración ocurre de la periferia hacia el centro del valle; en la porción Sur, las concentraciones más bajas en sulfatos ocurren a lo largo del Río Jerez, y se incrementan hacia el Poniente. Los bicarbonatos varían de 50 a 400 mg/l. Existe un incremento en los valores de Norte a Sur, coincidiendo con la dirección predominante del flujo subterráneo. El contenido del ión calcio varía de 10 a 130 mg/l, en general, a lo largo del Río Jerez se presentan valores más bajos que en las márgenes del mismo. Las concentraciones de sodio varían de 15 a 150 mg/l, los valores más bajos ocurren en la periferia del valle, incrementándose hacia el centro del mismo. La mayoría de las muestras quedan dentro de la clasificación C2 - S1, que corresponde a salinidad media y contenido de sodio bajo [15].

CAPÍTULO 4

4.0 Diferentes tipos de destiladores solares pasivos existentes (ventajas y desventajas)

Actualmente se ha optado por el desarrollo de métodos de purificación alternativos a los ya descritos, los cuales emplean energía solar para el destilado de aguas residuales con un alto grado de salinidad e incluso con la presencia de metales pesados, dichos dispositivos se conocen con el nombre de destiladores solares [1]. Existen de varias formas, ya que el principio es el mismo (aprovechar la energía solar para evaporar el agua y posteriormente precipitarla en forma de agua “potable”) dichos dispositivos se mencionarán de forma resumida [1]. Sin embargo, es importante mencionar que dentro de estos tipos de destiladores solares existen clasificaciones principales como son:

- Solares pasivos, los cuales utilizan el calor interno del mismo para llevar a cabo el proceso de evaporación del agua [1].
- Alambiques activos, utilizan otro tipo de mejoras que van desde la incorporación de colectores solares hasta concentradores más elaborados, con la finalidad de lograr mayor eficiencia [1].

Para ejemplificar de mejor manera este tipo de diseños o tipos de destiladores solares se representan enseguida en forma esquemática:

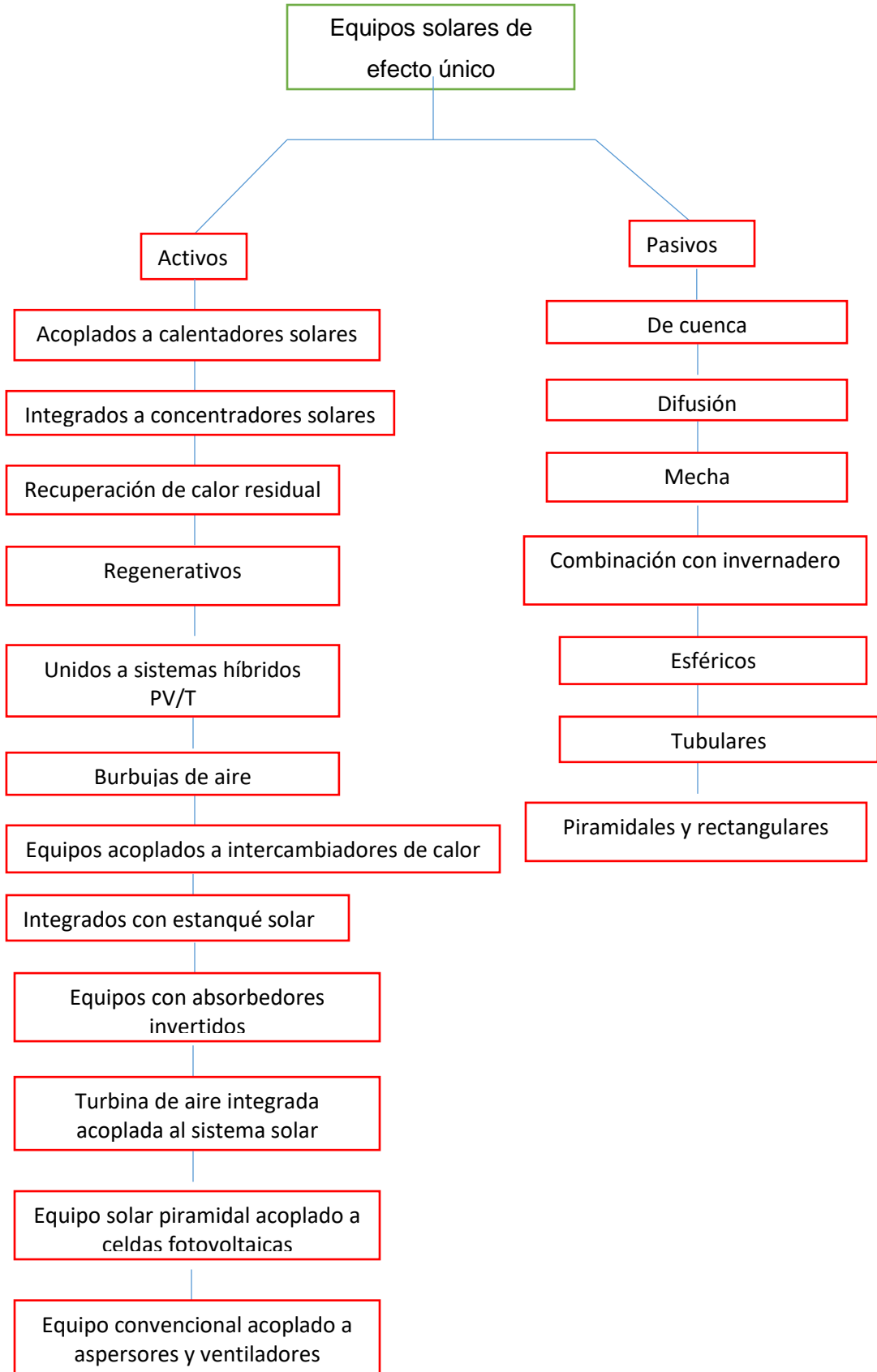


Figura 3. Tipos de destiladores solares y descripción [1, 2]

4.0.1 Destilador solar de caseta.

Es el más conocido y difundido en el mundo y consiste en una caseta elaborada de un material transparente, comúnmente vidrio, que se coloca sobre una bandeja de metal, generalmente pintada de color negro, donde se colocará el agua para destilar. Por la forma de la caseta y de cómo es que recibe la energía solar (calor), se conocen como destiladores de tipo invernadero. De los cuales existen de caseta sencilla, doble caseta y de bóveda (Figura. 4). Si bien son fáciles de construir y económicos, su principal desventaja radica en su pobre eficiencia debido a que solo produce unos cuantos mililitros al día, por lo que es más utilizado en simulaciones o pruebas [46, 47].

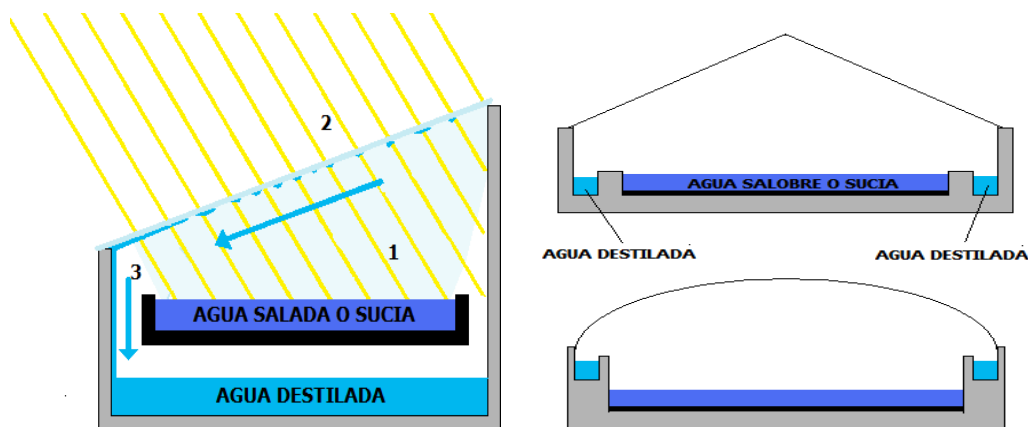


Figura 4. Destiladores solares de doble caseta, caseta sencilla y bóveda [47].

4.0.2 Destilador de cascada.

Sus características principales son: una posición inclinada que le permite captar mejor la energía solar; la cercanía entre las charolas evaporadoras y la cubierta condensadora favorece el proceso de destilación (Figura. 4). Algunas de sus ventajas son: su eficiencia térmica, su fácil instalación y mantenimiento. Sus desventajas residen en el proceso de alimentación y el control de niveles de agua, por estas razones, resulta más complicado de trabajar que el destilador de caseta y

más propenso a producir contaminación del destilado, debido a la existencia de escurrimientos y salpicaduras hacia el destilado que se obtiene en la parte de abajo, así como su baja eficiencia del 30% según datos reportados en la literatura [46, 47].

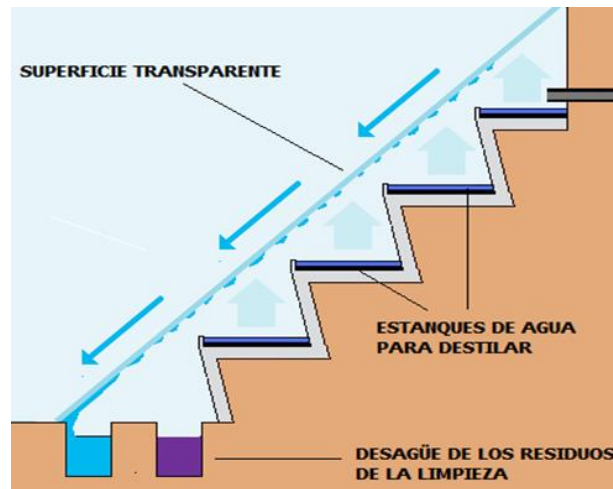


Figura 5. Destilador de cascada [48].

4.0.3 Destiladores inclinados con flujo de agua

Fue construido por primera vez en 1966 por Tleimat y Howe. Los diseños son múltiples y variados. Una de las características de los destiladores de flujo es drenar el agua que ha alcanzado la más alta temperatura en el interior del destilador, es decir, se recircula el agua hacia la alimentación [48].

4.0.4 Destilador solar esférico.

Se basa en la forma esférica del material transparente, así como en la introducción de un brazo mecánico que limpia su cara interna y que esta accionado por un motor. En una bandeja con fondo de color oscuro situada en la parte central de la esfera se coloca el agua que se va a destilar. La forma esférica busca favorecer la captación de la energía solar, evitando el sombreado y aumentando el rendimiento de calor producido por la energía solar (Figura. 5) [46, 48].

Los problemas principales que se han encontrado con estos destiladores son el requerimiento de una fuente de energía extra, que, aunque es pequeña, se utiliza para mover el motor del limpiador. Otro aspecto importante es que el material

acrílico se raya por el efecto mecánico del elemento limpiador, lo cual nos produciría constantes gastos [47].

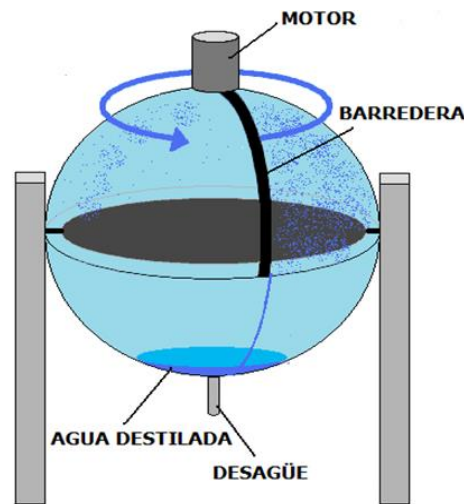


Figura 6. Destilador solar de tipo esférico [48].

El equipo de destilación solar diseñado en la UNAM es principalmente utilizado para la desalación de agua de mar, mismo que fue puesto a prueba en el estado de baja california, debido a la escases de agua dulce en esta zona de la república mexicana. Aunado a esta iniciativa el gobierno de dicho estado, prevé la construcción de un dispositivo de esta naturaleza para el abastecimiento de agua con el cual una población recibiría alrededor de 1m^3 de agua potable al día por medio de las energías eólica y solar.

El agua marina o salmuera se extrae de un pozo en la playa y no directamente del mar, debido a los bruscos cambios de nivel producidos por el oleaje.

El agua de mar es alimentada a un tanque por medio de una bomba neumática; las corrientes de aire mueven un dispositivo multiaspas o "margarita", el cual provee el trabajo necesario para elevar la salmuera unos cuantos metros. El líquido del tanque desciende por acción de la gravedad hasta un depósito previo al destilador. Su función consiste en abastecer a este último de cantidades fijas de agua, lo que se puede lograr si el nivel del líquido permanece constante. Con este

fin se ha incluido una válvula que cierra el paso del agua cuando ésta supera cierto nivel [49].

El destilador tiene en su parte inferior una sección plana que se encuentra ligeramente inclinada y es por donde fluye la salmuera. Los rayos solares favorecen únicamente la evaporación del agua, las sales permanecen depositadas en la fracción líquida del agua. El techo es una cubierta transparente de tipo invernadero; ahí se condensa el agua libre de sales, que previamente se evaporó y que posteriormente se escurre hasta unos canales laterales, y luego hasta un recipiente de almacenamiento [49].

Si bien se habla de una gran cantidad de agua destilada, se ha observado que varios factores ambientales o de diseño influyen sobre la eficiencia del destilador. Destacan la longitud total que recorre la salmuera, la velocidad del flujo, su temperatura, el calor suministrado por el sol y las pérdidas de energía [49].

Se han propuesto otros dispositivos en México que tienen como principal característica ser más económicos como el destilador solar que se muestra en la figura 5, el cual es de construcción casera [50].



Figura 7. Representación del destilador casero [50].

Este destilador está compuesto de materiales que pueden encontrarse fácilmente en un entorno de bajos recursos, el agua es tratada sin utilizar productos químicos, por lo tanto, no altera ninguna de las características del agua y además

tiene acoplada a su estructura una lámpara que emite radiación ultra violeta, la cual ayudaría aún más con la desinfección del agua e incluso superando a la desinfección llevada a cabo por la adición de cloro [50].

Sin embargo, se tienen algunas desventajas, las cuales radican en el costo de las lámparas de ultra violeta debido a que hay que remplazarlas a cada cierto tiempo y aunado a esto se necesita de energía eléctrica y de un personal capacitado para la instalación de dicho sistema. Por lo tanto, podrían ser una problemática al llevarlo a las comunidades de escasos recursos [50].

Los esfuerzos para generar nuevos destiladores solares no solo se han hecho notar en México, ya que también existe un manuscrito en donde se hace mención de la elaboración de uno de estos dispositivos esta vez llevado a cabo por un grupo de investigación que radica en Suecia.

Dicho equipo, al igual que los anteriores, solo necesita la luz solar para llevar a cabo su función, sin embargo, es de gran importancia mencionar que tiene amplias ventajas con respecto a los anteriores ya que proporciona un volumen de agua potable de 11 litros por cada 2 o 6 horas de exposición a la luz solar, además de ser muy práctico y duradero (de 7 a 10 años) (Figura. 6). Sus principales inconvenientes radican en el precio, ya que en algunos sitios donde ronda desde los 60 hasta los 200 dólares lo cual podría dificultar su compra en los lugares con escasos recursos, otra desventaja importante es que resulta inútil cuando el agua contiene productos químicos, por lo que debe ser tratada previamente antes de ser sometida al proceso de destilación [51].



Figura 8. Imagen real del destilador SOLVATTEN [51].

4.1 Diferentes tipos de destiladores solares activos existentes (ventajas y desventajas)

Como ya se ha descrito anteriormente, los destiladores solares activos son aquellos que utilizan otros tipos de mejoras, con la finalidad de lograr una mayor eficiencia, algunos equipos se describirán brevemente a continuación haciendo especial énfasis en ventajas y desventajas [1].

4.1.1 Destilador solar acoplado a un colector de placa plana

Este tipo de dispositivo fue propuesto por Bradan y colaboradores [52], consiste de una caseta en forma piramidal, la cual en su interior tiene un contenedor de color negro sobre el cual se deposita el agua que se quiera tratar, previamente precalentada por el colector de placa plana.

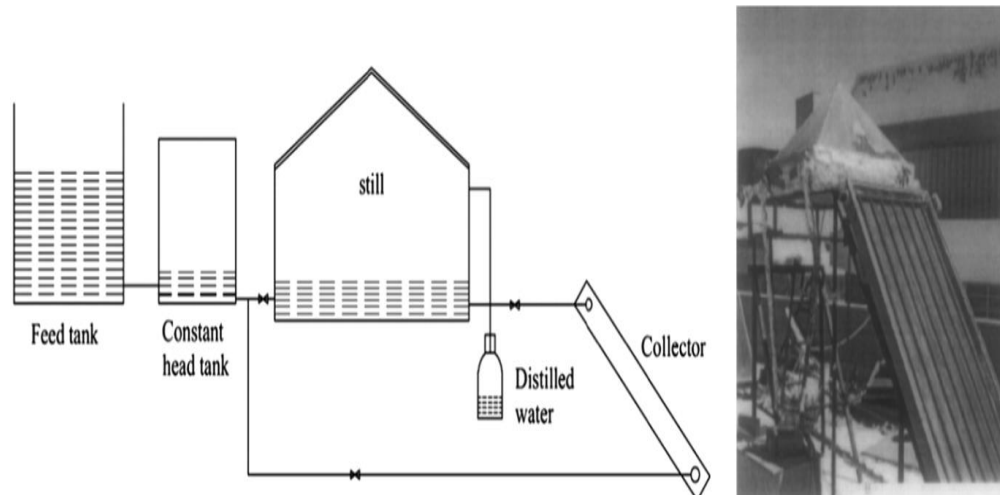


Figura 9. Equipo de destilación acoplado a colector [52].

Con esta configuración se asegura un aumento en la temperatura del agua, lo cual se ve reflejado en un aumento en la producción de vapor y por lo tanto una mayor productividad de destilado. Se sabe que este equipo proporciona alrededor de 2.3 L/m²/d, y tiene una eficiencia del 28.56%. Sin embargo, aun con estas mejoras se sigue considerando tanto una eficiencia y volumen bajos [1]. Este equipo en relación con los destiladores solares pasivos tiene un costo más elevado [1, 52].

4.1.2 Destilador solar de caseta con cuenca semiesférica acoplado a un concentrador cónico con y sin material de cambio de fase (pcm)

Este tipo de dispositivo consta principalmente de un destilador de caseta con cuenca semiesférica en su parte inferior, unido a un concentrador cónico (elaborado de lámina galvanizada) con y sin PCM (Bolas de cobre que contiene en su interior cera de vela) [53].

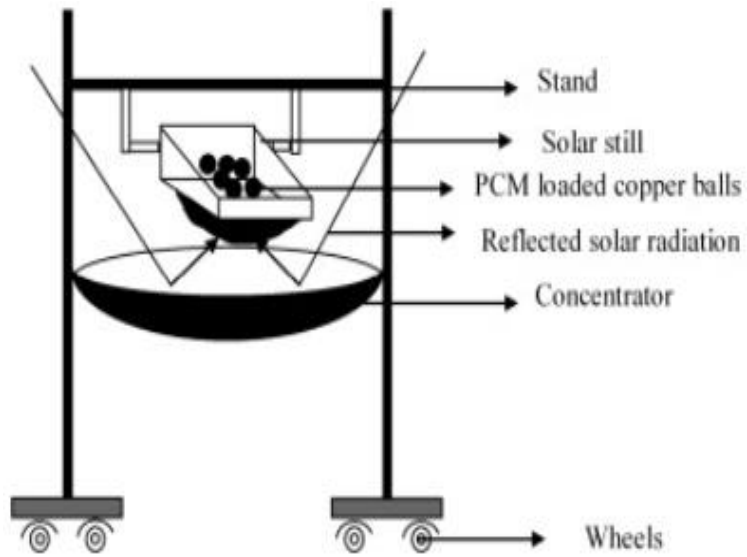


Figura 10. Destilador solar operante con materiales PCM [53].

Se tiene registro que este equipo aporta con PCM alrededor de 4.4 L/m²/d de destilado, mientras que sin PCM solo aporta alrededor de 3.5 L/m²/d por ambos volúmenes de agua son aceptables. Sin embargo, construir un equipo de esta índole es un tanto costoso, principalmente por la cantidad de material utilizado, así como también sería un tanto voluminoso para su transporte [53].

4.1.3 Destilador de caseta acoplado a un colector compuesto de un serpentín de tubos de cobre

El sistema consiste principalmente de dos secciones, la primera sección está conformada por un destilador de caseta convencional, la segunda sección está compuesta por un colector de placa plana que en su interior tiene un serpentín de tubos de cobre por los cuales circula agua la cual se calienta durante el trayecto, dichos tubos se hacen pasar al interior del destilador de caseta, asegurando el incremento de la temperatura en el interior del mismo por convección de los tubos de cobre hacia el agua contenida dentro del casetón, este dispositivo se muestra enseguida [54].

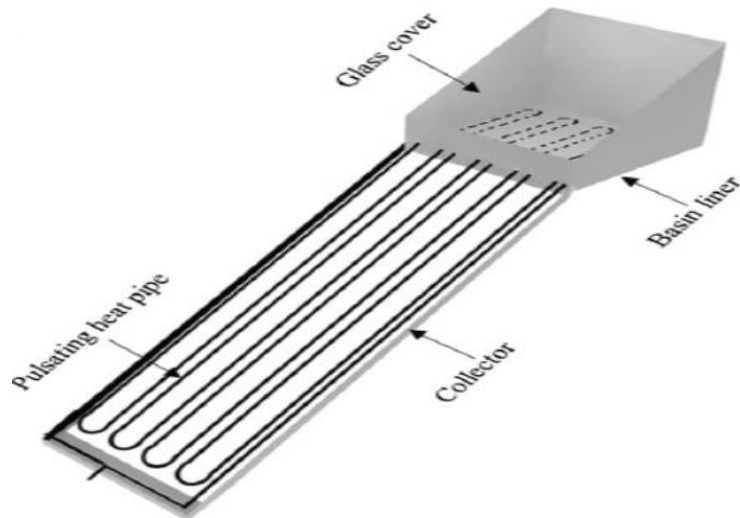


Figura 11. Destilador solar acoplado a un colector con tubos de cobre [54].

Por otra parte, el rendimiento de los destiladores solares depende de la potencia de la radiación solar, así como de la temperatura del ambiente y también en la forma y características del destilador que se quiera evaluar.

Por lo tanto, es lógico pensar que en las regiones soleadas y cálidas estos equipos ofrecerán mejores condiciones para la destilación solar, en comparación de las regiones frías y húmedas.

En el estado de Zacatecas se cuenta con temperaturas consideradas como altas y además, tienen una gran disposición de radiación ultra violeta. De acuerdo a datos obtenidos de la estación meteorológica la cual está localizada en: “Campo Experimental Zacatecas, Kilómetro 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, 98500 Calera de V.R., Zac.” También existen temperaturas promedio en verano de 25 °C y una temperatura en invierno que ronde cerca de los 8 °C [13].

CAPÍTULO 5 CONSIDERACIONES GENERALES

5.0. Justificación

La carencia de agua en el mundo ha fomentado e impulsado todo tipo de proyectos dirigidos a satisfacer el vital líquido, ya que el abastecimiento sustentable del agua es un agente preponderante para el crecimiento económico y el desarrollo social de las comunidades, sobre todo en regiones áridas, costeras o en zonas conurbadas de las grandes ciudades. La escasez de agua ha generado muchos esfuerzos en un importante número de países a obtener agua dulce de fuentes tales como el mar, lagunas o pozos salobres [55].

El uso de la energía solar para la operación de diferentes procesos, en particular para la desalinización de agua de mar (que observa un alto consumo de energía para producir un metro cubico de agua potable), es cada día más común por lo que resulta necesaria esta tecnología, que junto con el ahorro de energía y el aprovechamiento de los recursos naturales son la clave para un futuro limpio, seguro y eficaz. Además, el método de la energía solar es idóneo para producir agua potable en zonas áridas o costeras aisladas ya que en ellas la radiación solar está disponible en cantidades apreciables y el abastecimiento de energía convencional es limitado o nulo e implica tener la infraestructura necesaria para hacerla llegar a las poblaciones mencionadas [55, 56].

En este sentido, actualmente, existen algunos tipos de destiladores solares, sin embargo, en México todavía no hay un interés generalizado de utilizar dichos destiladores, por lo que es necesario elaborar más proyectos de esta índole, para evitar los daños al medio ambiente.

La finalidad de esta investigación es la construcción de un nuevo prototipo de destilador solar que tenga una mayor eficiencia y represente un menor costo en relación a los métodos actuales empleados para la potabilización del agua (ósmosis inversa, filtros, purificación por ozono, etc.), esto con el objetivo de que sea conveniente para las poblaciones que tengan escasos recursos y a su vez presentan problemas con el abastecimiento del agua potable.

5.1 Hipótesis

El proceso de destilación permite disminuir la cantidad de sales presentes en el agua, por la elaboración de una estufa impulsada por energía solar que disminuirá el gasto energético, realizando el proceso de destilación y obteniendo agua con cantidades mínimas de sales y libre de microorganismos patógenos tales como *E.coli*, lo que promoverá su uso en regiones donde el acceso al agua potable es limitado.

5.2. Objetivo General

Diseñar, elaborar y evaluar un prototipo de destilador solar tipo caja adicionado con reflectores solares que permita alcanzar y mantener la energía necesaria para el proceso de destilación de agua, obteniendo un destilado bajo en sales.

5.3. Objetivos Particulares

- 5.3.1 Diseñar un prototipo de destilador solar tomando como base las estufas solares tipo caja.
- 5.3.2 Construcción del destilador solar adicionando reflectores que permitan concentrar la energía y alcanzar así el punto de ebullición del agua.
- 5.3.3 Evaluar la eficiencia del destilador solar mediante la ecuación propuesta por Elamin O. M. Akoy.
- 5.3.4 Análisis térmico del prototipo utilizando equipo para medir diferencias de temperaturas.
- 5.5.5 Determinar la concentración de sales totales en el agua destilada por medio de la conductividad eléctrica.
- 5.5.6 Comparar el volumen del destilado contra destiladores existentes.

CAPÍTULO 6

6.0. Materiales y Métodos

6.1. Construcción del destilador solar

6.1.1. Cálculo de áreas y grados de inclinación de los reflectores

Para la determinación de los ángulos de inclinación de los reflectores solares, se empleó la expresión matemática propuesta por Rimstar [57]:

$$\text{inner angle} = \sin^{-1} \left(\frac{-\text{reflector length}}{4x \text{ target width}} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\text{reflector length}^2}{\text{target width}^2} + 8} \right) \quad (1)$$

A partir del cual, se obtuvo el ángulo interno de los reflectores y el ángulo externo mediante la diferencia de los ángulos de la superficie plana (180°):

$$\text{Ángulo exterior} = 180^\circ - \text{ángulo interior} \quad (2)$$

El destilador se construyó, entonces, a partir del modelo de estufa solar tipo caja [58], en donde se le adaptaron reflectores en la parte superior generando un acomodo hexagonal, con la finalidad de incrementar la concentración de la radiación solar al interior de la caja misma.

La estufa solar tipo caja se construyó siguiendo las características en madera (soporte) y poliestireno (aislante): Base de 40 cm de diámetro en forma hexagonal, 6 Gajos internos (forman parte de la caja) de 25.5 cm x 58 cm x 45 cm y 1.90 cm de espesor; 6 Gajos externos (reflectores) de 68.6 cm x 58 cm x 45 cm y 1.90 cm de espesor (Figura. 12).

Mientras que los reflectores (espejos) fueron cortados de la siguiente manera: espejo hexagonal de 40 cm de diámetro, 6 espejos de 6 mm con las medidas que se especificaron anteriormente para la base y gajos internos y 6 espejos de 6 mm con las medidas que se mencionaron para los reflectores. Para el

caso de la caja, para conservar el calor vía efecto invernadero, se colocó un vidrio transparente de 6 mm de espesor, en forma hexagonal con 90 cm de diámetro o bien, 2 vidrios transparentes de 6 mm de espesor con diámetro de 45.5 cm, de tal manera que cada uno ajuste la mitad del hexágono, dicho vidrio, tendrá la función de tapa en la estufa solar.

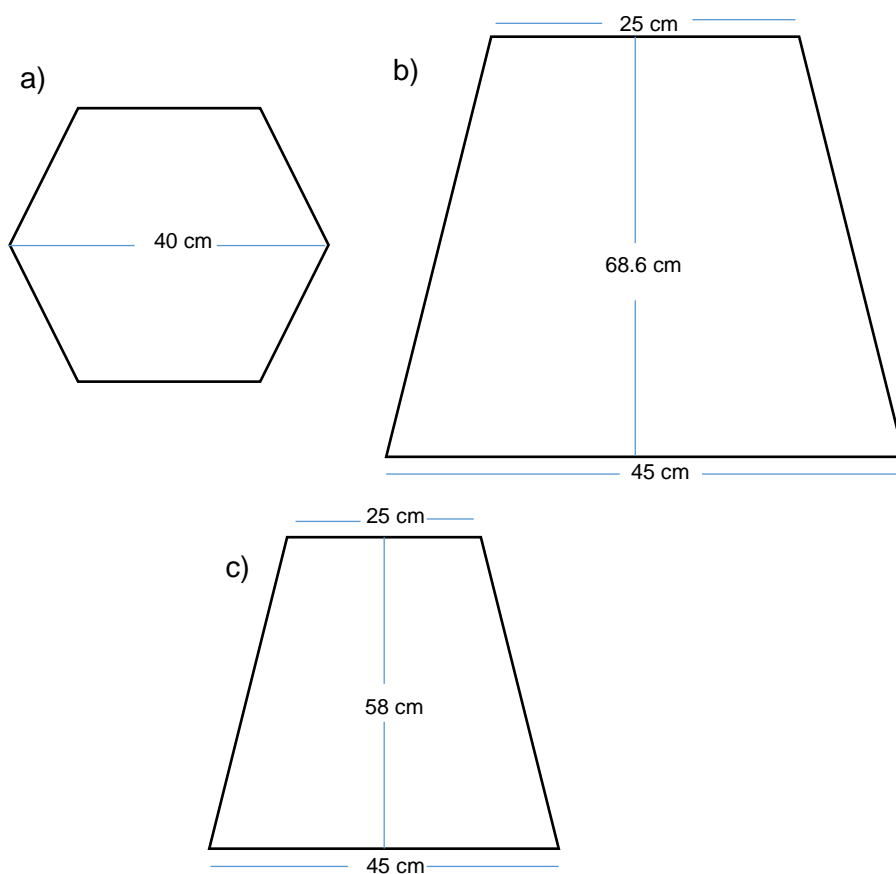


Figura 12. Dimensiones para la construcción de la estufa solar tipo caja. a) Base para cubierta inferior de la caja. b) Base para reflectores laterales de la caja. c) Base para reflectores superiores.

Por otro lado, al interior de la estufa solar se agregó una placa de lámina galvanizada de 32 x 32 cm y un contenedor o alambique galvanizado y recubierto de pintura negra, con 20 cm de diámetro de base y 23 cm de altura con cuello de cisne, con capacidad de 2 L (Figura 13 b). El contenedor, se encuentra pegado a una varilla de 40 cm de largo y 1/2" in de diámetro, que servirá como conducto de salida del vapor generado; por tanto, uno de los lados de la varilla, deberá estar sellado para evitar pérdidas de vapor a causa de las fugas.

Debido a que esta varilla se encontrará unido a las paredes laterales de la caja, cada extremo de la varilla estará acoplado a valines que permitan el movimiento de la estufa solar. Adicionalmente, en la parte lateral del contenedor, se agrega una manguera de 3/8" in que servirá como alimentador de agua.

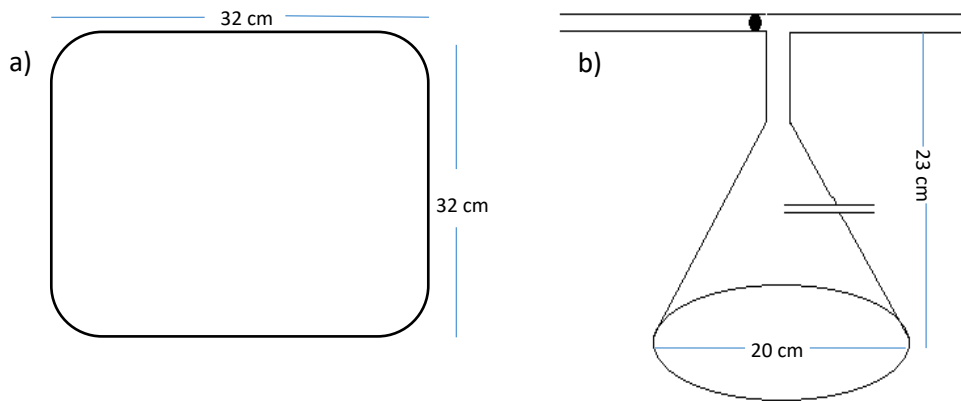


Figura 13. Concentrador solar metálico recubierto de pintura negra. a) Lámina galvanizada. b) contenedor galvanizado con capacidad de 2L.

Finalmente, y con el propósito de que la estufa solar tenga movilidad para el seguimiento solar, se elaboró la base de madera de acuerdo a la figura 14.

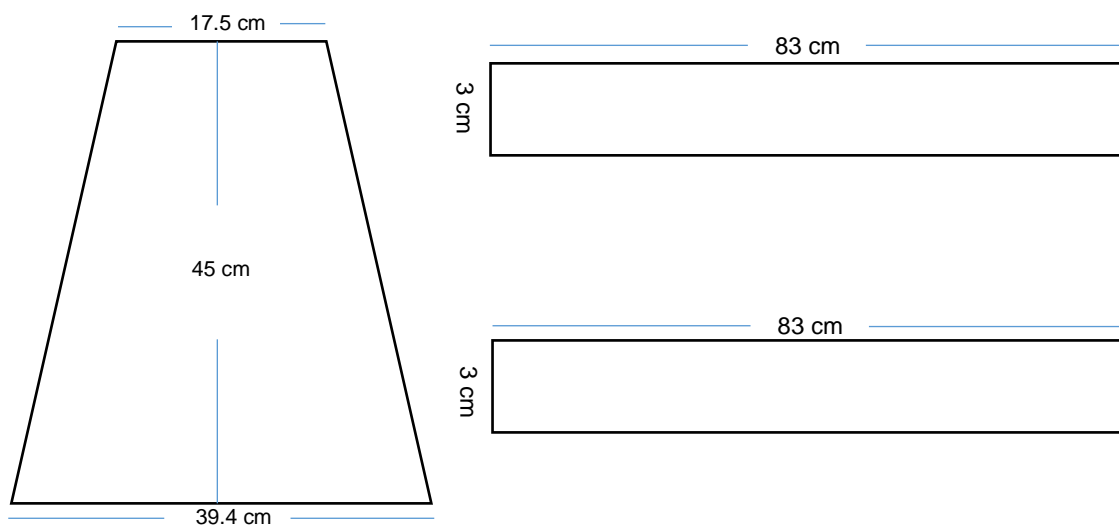


Figura 14. Medidas de los materiales para construcción de la base.

La estufa solar resultante ya armada, es mostrada en la figura 15.

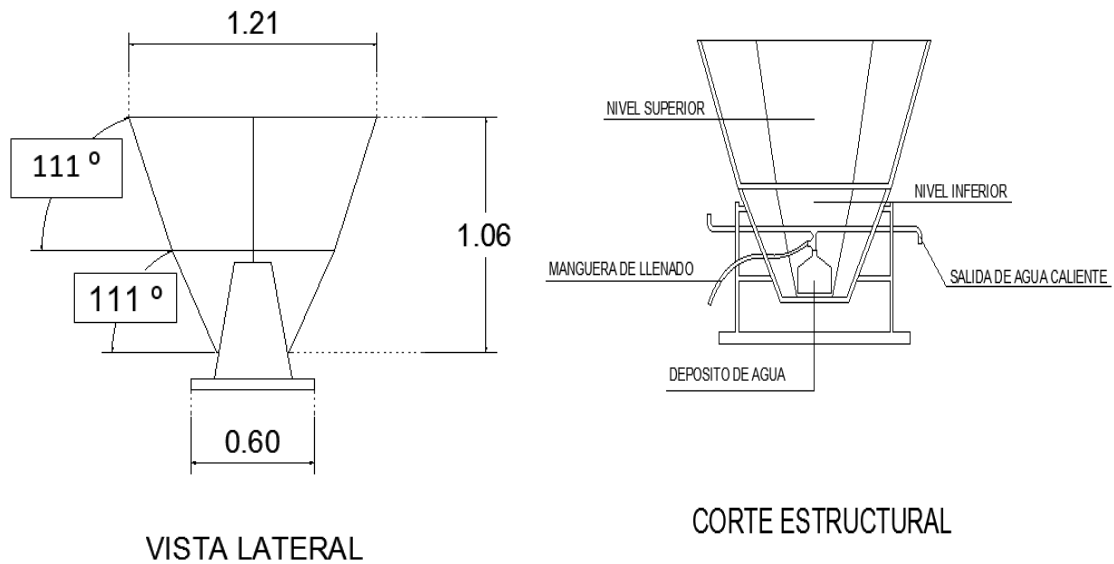


Figura 15. Planos estructurales de la estufa solar.

6.2. Cálculo de la eficiencia y potencia para el destilador solar

A partir de los ángulos calculados, se determina el área de captación, la eficiencia y potencia del equipo [59]; para el cual, se utilizó la ecuación 3:

$$\eta_u = \frac{M_f C_f \Delta T_f}{I_{av} A_c \Delta t} \quad (3)$$

En donde:

M_f = Masa del fluido de cocción (kg).

C_f = Calor específico del fluido de cocción (J/Kg·K).

ΔT_f = Diferencia entre T_{max} alcanzada y T_{amb} .

(K) I_{av} = Promedio de la intensidad solar (W/m^2) durante el intervalo de tiempo.

A_c = Área de captación o apertura de la estufa (m^2).

Δt = Tiempo requerido para alcanzar la T_{max} del fluido de cocción (s).

Mientras que, para el cálculo de la potencia en el destilador, se utilizó la ecuación 4:

$$P = \frac{T_{w2} - T_{w1}}{t} (mw)(C_{pw}) \quad (4)$$

Dónde:

P = La potencia de la estufa solar.

T_{w2} = Temperatura final del agua.

T_{w1} = Temperatura inicial del agua.

t = Tiempo (s).

mw = Masa del agua (Kg).

C_{pw} = Capacidad calorífica del agua.

6.3. Conductividad iónica del agua

En el agua existen materiales o fluidos responsables del movimiento de iones, lo que favorece la formación de corriente eléctrica (por conducción iónica). El agua pura, no debe ser un conductor de la electricidad, ya que la cantidad de iones es mínima; por ello, se puede medir la cantidad de sales presentes en el agua mediante la conductividad; ya que la corriente eléctrica se encuentra directamente proporcional a la concentración de iones [60]; clasificándose, por consiguiente, en agua ultrapura, potable o de mar (tabla 5) [61].

Tabla 5. Valores de conductividad [61].

Tipos de agua	Conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$
Agua ultra-pura o des ionizada	0.055
agua potable	50-500
agua de mar	50000

En la Ciudad de Zacatecas, se han registrado valores de conductividad situadas en el límite superior del agua potable recomendado (tabla 5), por lo que, para la elaboración experimental de este trabajo de tesis, resulta favorable utilizar dichas muestras, teniendo alícuotas provenientes de diferentes puntos de la ciudad, como: Zona Centro, Fracc. Huerta Vieja, Col. Villas de Universidad, entre otras.

Las muestras recolectadas fueron analizadas antes y después del proceso de destilación, empleando para cada prueba 100 ml de agua, en virtud de lo cual se utilizó un conductímetro de campo marca TDS, modelo YL-TDS2-A y como estándar positivo, una solución de NaCl 0.01 M de la marca HACH ($1413 \mu\text{S}/\text{cm} \pm 12 \mu\text{S}/\text{cm}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$) y agua ultrapura proveniente del laboratorio de electroquímica UAZ.

CAPÍTULO 7

7.0 Discusión y Resultados

7.1. Construcción del destilador solar

Los resultados previos obtenidos en el destilador tipo caseta (destilación pasiva), se presentaron temperaturas menores a 60°C y la obtención de un volumen de destilado de 50 ml, en 6 horas de exposición. Que, comparado a los destilados encontrados a la literatura, representan un volumen bajo, además de la pobre reducción de las sales disueltas en el agua, que, en contraparte, los costos de elaboración, materiales y su mantenimiento son sencillos de efectuar sin la necesidad de capacitación alguna, pero para la obtención de volúmenes mayores, se requiere demasiado tiempo, por lo que no representa el equipo necesario para la purificación de agua, en este trabajo.

Para lograr éstas condiciones, se ha optado por la incorporación de reflectores solares a fin de concentrar la energía solar a un recipiente metálico con el propósito de incrementar la eficiencia en los destiladores solares [1]. Para el cual, se determinaron los ángulos necesarios para que reflejen con mayor eficiencia los rayos solares hacia la superficie objetivo, es decir, si los reflectores a longitud determinada, se realiza el cálculo de inclinación de manera errónea, los rayos provenientes del sol que llegan al reflector se proyectarán al otro reflector, que debido al ángulo, provocará que se reflecte nuevamente hacia afuera propiciando desperdicio de la energía solar (figura 19b) [57].

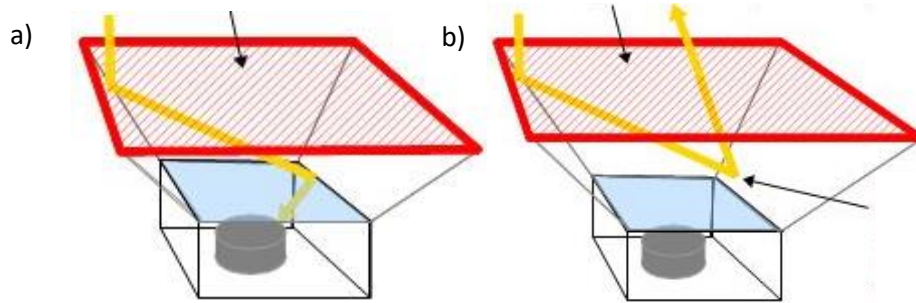


Figura 16. Ángulos de incidencia en las superficies reflectoras. a) Ángulo correcto de reflexión, el rayo incide de manera adecuada sobre la superficie objetivo. b) Ángulo incorrecto de reflexión, el rayo jamás incide sobre la superficie, siendo reflejado en otra dirección [57].

Partiendo de éste hecho y considerando una superficie cuadrada (32 cm cada lado), para la captación de energía con reflector de longitud de 58.4 cm, el reflector debe situarse, para el mayor aprovechamiento de energía solar de acuerdo a la ecuación 2, a un ángulo interno de 69°, de acuerdo a la resolución de la expresión matemática por Rimstar:

$$\text{inner angle} = \sin^{-1} \left(\frac{-58.4 \text{ cm}}{4 \times 32 \text{ cm}} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{(58.4 \text{ cm})^2}{(32 \text{ cm})^2} + 8} \right)$$

$$\text{inner angle} = 69^\circ$$

Por tanto, para el ángulo exterior, se tiene un valor de 111°, por la diferencia de los 180°, ángulo lineal. Sin embargo, la incidencia de la radiación solar tomada para la estufa (figura 19), es considerada de 90° (perpendicularmente), pero dicho comportamiento depende de la estación del año, latitud de donde se desea colocar la estufa y el recorrido del sol durante el día. Debido a ello, y aunado al incremento de la eficiencia de la estufa, se buscó adaptar el dispositivo a una base móvil con la finalidad del seguimiento manual del sol y mayor aprovechamiento de los rayos solares (figura 20) [62].

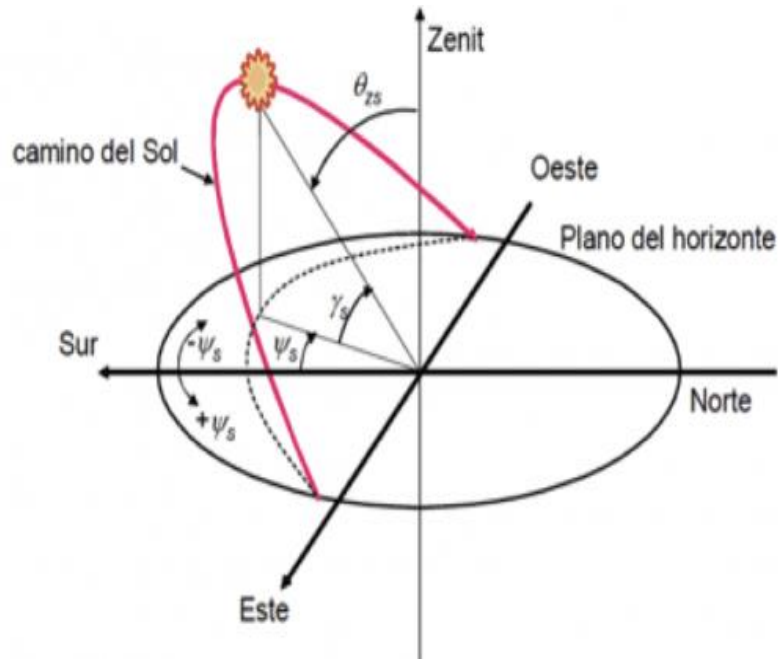


Figura 17. Movimiento del sol a través de cada hora [62]

Para tal efecto, la estufa solar fue posicionada a 22° sur, ya que una superficie con ángulo de inclinación igual a la latitud de su ubicación que, para el caso de la ciudad de Zacatecas se encuentra a 22.7684300° , en ese ángulo recibe la máxima insolación a lo largo del día [63].

En la figura 18 se muestra la estufa ensamblada con las medidas encontradas y ángulos óptimos para el aprovechamiento solar; en la que la madera se ha utilizado como componente estructural principal en edificaciones, decoración de interiores, muebles, diseño de estufas solares, entre otras muchas aplicaciones, todo gracias a sus propiedades de resistencia, maleabilidad y moderadamente aislante [64].



Figura 18. Estufa solar ya finalizada a) Vista frontal. b) Vista lateral. c) Vista interna de la estufa solar.

La pésima conducción de calor en la madera, se debe al material celulósico por el que se encuentra constituido, químicamente incapaz de conducir electrones ya que carece de pares de electrones dispuestos a ser conjugados (contrario a lo observado en los metales) [65]. Aunado a ello, el polímero de la celulosa, se encuentra conformado por cuerpos cavernosos que impide el buen traspaso de calor por convección; clasificándolo con conductividad térmica intermedia pero óptimo para material de soporte en estufas solares (tabla 6) [66].

Tabla 6. Valores de conductividad térmica de los materiales más utilizados en las estufas solares [67].

Material	k (W/mK)	Material	k (W/mK)	Material	k (W/mK)
Aluminio	205.0	Ladrillo rojo	0.6	Poliestireno	0.01
Latón	109.0	Hormigón	0.8	Madera	0.12 - 0.04
Cobre	385.0	Corcho	0.04	Aire	0.024
Plomo	34.7	Fieltro	0.04	Argón	0.016
Mercurio	8.3	Fibra de vidrio	0.04	Helio	0.14
Plata	406.0	Vidrio	0.8	Hidrógeno	0.14
Acero	50.2	Hielo	1.6	Oxígeno	0.023
Ladrillo aislante	0.15	Lana mineral	0.04		

Por otro lado, el poliestireno se define técnicamente como un material plástico, rígido que se fabrica a partir de un molde, dicho material presenta una estructura cerrada y rellena de aire, esta característica le proporciona prestaciones excelentes para llevar acabo el aislamiento térmico, a su vez también destaca, su facilidad para ser moldeado y su bajo costo [67].

Aunque el vidrio no se comporte como un excelente aislante térmico debido a su valor, el cual ronda entre los 0.9 y 1.05 K (W/mK), se decidió emplear este material por ser una superficie que permite la incidencia de la radiación solar en los objetivos de mejor manera que otros, resaltando también su bajo costo.

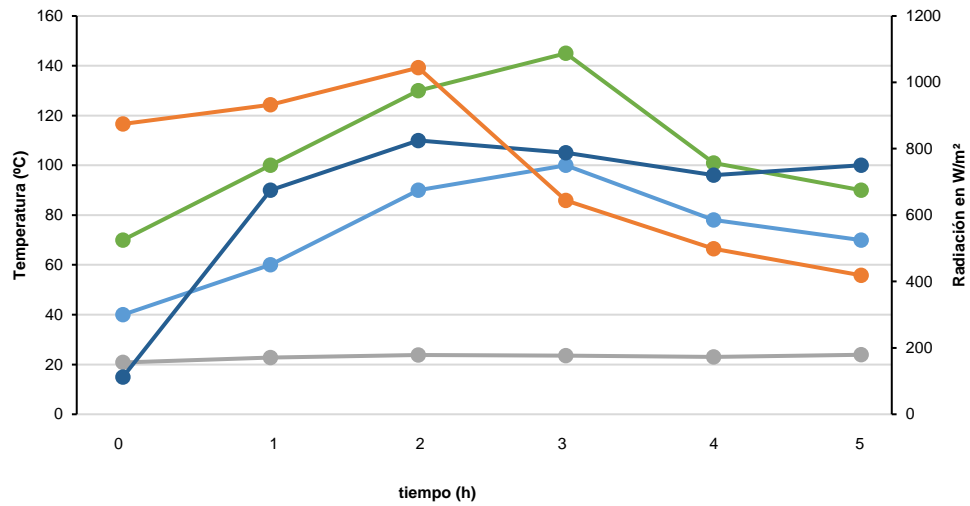
En cuanto a los espejos se eligieron principalmente por ser de los materiales más económicos y fáciles de limpiar, en comparación con otros, los cuales deben estar perfectamente pulidos y se caracterizan por ser más costosos.

CAPÍTULO 8

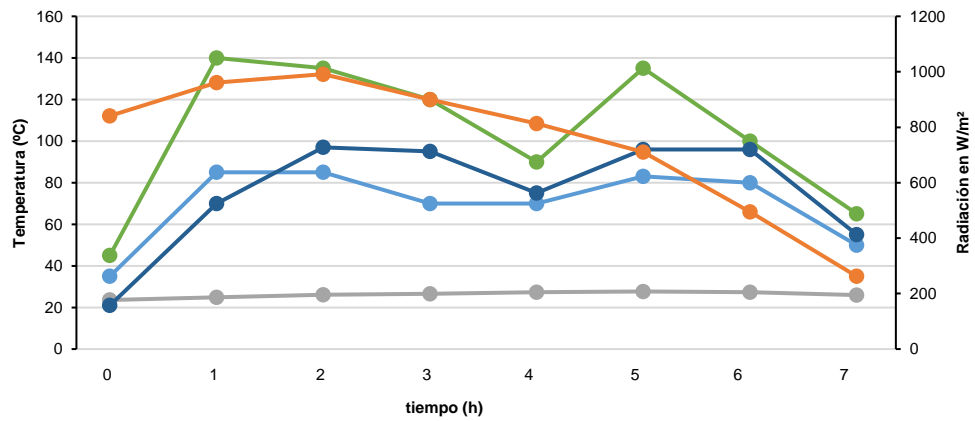
8.0. Monitoreo de la temperatura alcanzada por la estufa solar

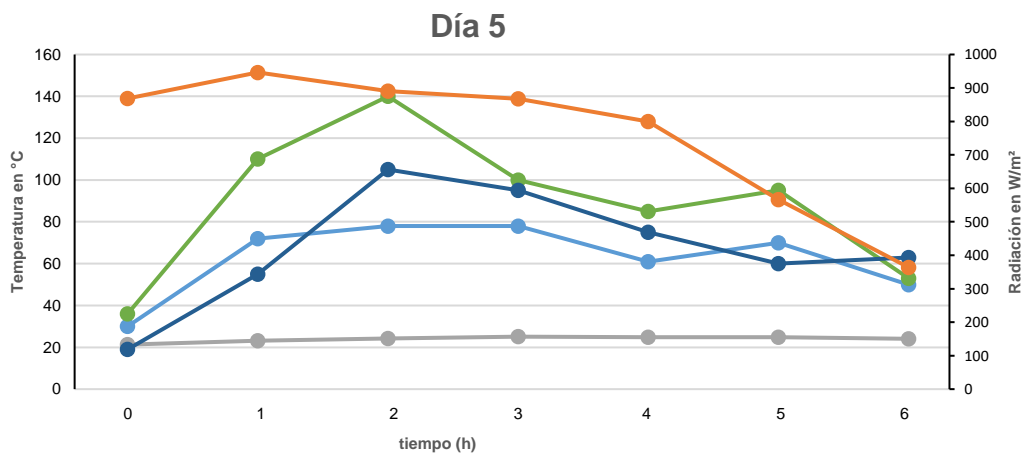
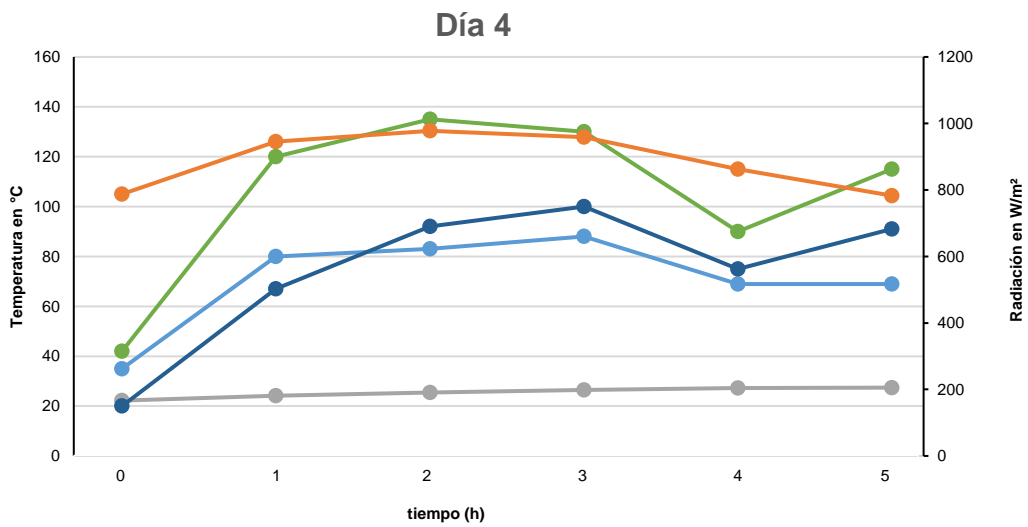
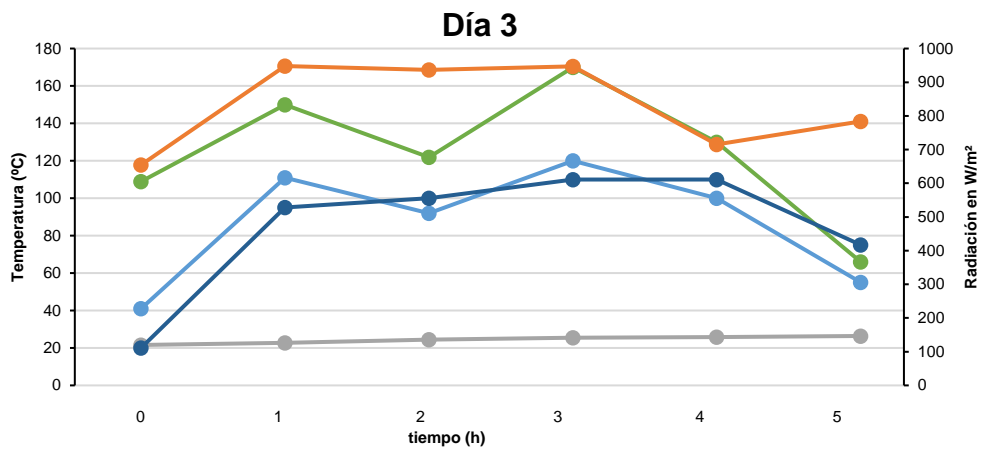
Los resultados obtenidos para los días: 21, 23, 25, 26 y 31 de agosto y 05 de septiembre se muestran en las siguientes gráficas:

Día 1



Día 2





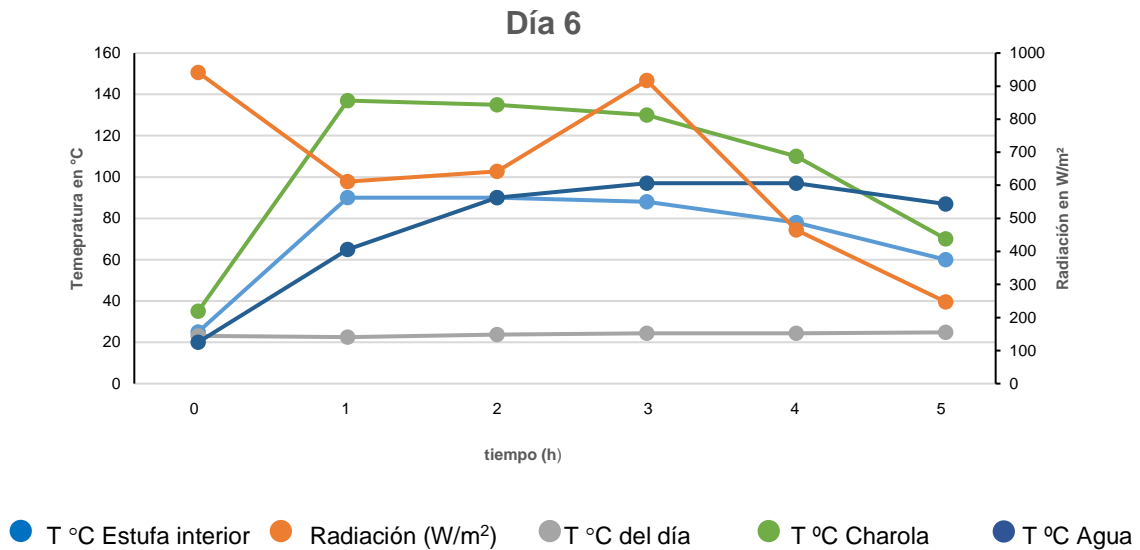


Figura 19. Relación entre Radiación y temperatura de la estufa solar.

En las gráficas anteriores se puede observar un incremento de temperatura rápido, ya que, en la primera hora de exposición, se logra pasar de 0°C a un promedio de 120°C en caso de la charola, 110°C en el interior y 75°C en el caso del agua, a su vez estas temperaturas en algunos casos se mantienen por un lapso mínimo 2 horas, dependiendo de la radiación solar que se incide en ese día, debido a que la temperatura alcanzada es dependiente de la misma. Para lograr dar solución a la captación máxima de radiación y descensos de temperatura, se debe contar con materiales cuya superficie reflectora sea muy pulida, aislantes grado industrial y materiales de soporte que garanticen el correcto sellado del dispositivo. Sin embargo, el equipo elaborado muestra mejoras notables en los rubros antes mencionados con respecto a destiladores pasivos, como se puede ver en las siguientes imágenes:

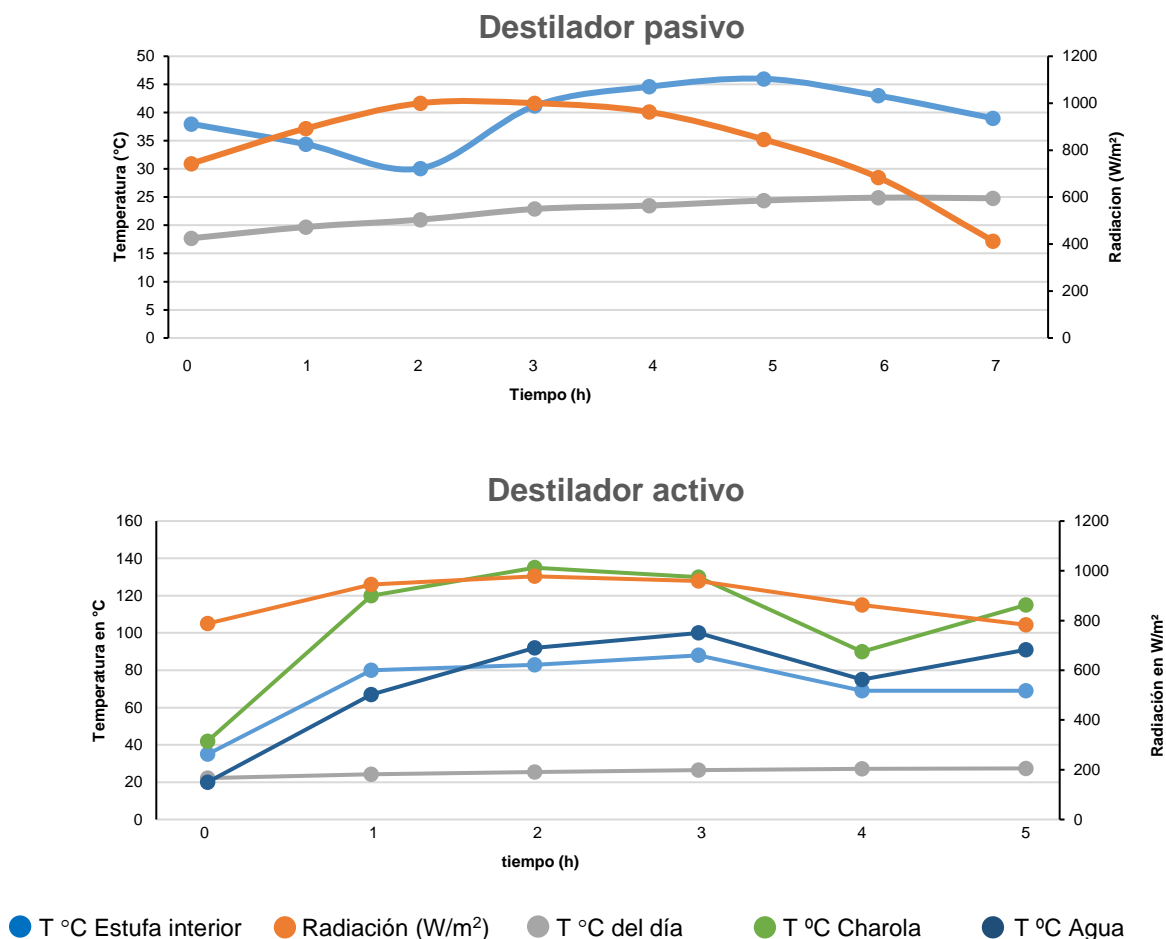


Figura 20. Comparativa de temperaturas alcanzadas con un destilador solar pasivo y activo

Como puede observarse el incremento de temperatura en comparación de ambos dispositivos es notorio, siendo más rápido para la estufa activa, mencionando también que no muestran puntos de decremento y aparte es más estable en el caso del destilador activo.

8.1. Cálculo de eficiencia

A partir del monitoreo en las temperaturas del sistema, es posible la recolección de los datos necesario para el cálculo de eficiencia en la estufa solar diseñada; teniendo, por tanto que: la masa del agua corresponde a 1.5 kg, el calor

especifico del fluido de cocción a 4186 J/kg K, diferencia entre la máxima temperatura alcanzada y la temperatura ambiente (197 K), promedio de la intensidad solar durante el intervalo de tiempo (250 W/m²), área de captación o apertura de la estufa en m² (1.2409 m²), y el tiempo (en segundos), requerido para alcanzar la temperatura máxima del fluido de cocción (10800 s); resultando una eficiencia del 37%, ecuación 3.

$$\eta_u = \frac{(1.5 \text{ kg})(4186 \text{ J/kgK})(197 \text{ K})}{(250 \text{ W/m}^2)(1.2409 \text{ m}^2)(10800 \text{ s})}$$

$$\eta_u = 37\%$$

Las estufas solares tipo caja, poseen una eficiencia del 77.4%, las parabólicas en 31.53% y en aquellas de tipo panel en 67.4% [59], por lo que la eficiencia del nuevo prototipo se encuentra situado en 37% que es muy comparable a los valores mostrados por el equipo parabólico y por tanto ofrece una buena opción alterna para su uso en la purificación de aguas.

8.2 Cálculo de potencia

Así mismo, la potencia de una estufa solar, se encuentra asociada a un incremento rápido de la temperatura, por lo que es necesario realizar el cálculo de la potencia en el equipo diseñado. Auxiliados por el monitoreo de la temperatura misma, se recolectaron los siguientes datos: temperatura final del agua (383.15 K), temperatura inicial del agua (292.15 K), tiempo (10800 s), masa del agua empleada (1.5 kg), capacidad calorífica del agua (4186 J/ kgK), resultando en un 52.90 W de potencia, de acuerdo a la ecuación 4.

$$P = \frac{383.15 \text{ K} - 292.15 \text{ K}}{10800 \text{ s}} (1.5 \text{ Kg})(4186 \text{ J/KgK})$$

$$P = 52.90 \text{ W}$$

En cuanto a la potencia se refiere, las estufas solares de tipo caja muestran un valor de 21.33 W, la de tipo panel de 12.94 W, y la parabólica de 51.9 W. En el equipo elaborado en esta tesis, se obtuvieron valores superiores a los mostrados por la estufa solar parabólica con un resultado de 52.90 W; por lo que en este rubro también se puede tomar como otra alternativa. Esta característica se define como el tiempo que tarda un equipo en alcanzar una temperatura determinada. Por lo que un sistema que aporte un foco concentrado de energía, podrá tener un mejor desempeño, a comparación de las estufas antes mencionadas.

8.3. Volúmenes del destilado

En comparación con los dispositivos (estufas solares) ya existentes, se tienen aumentos considerables en las temperaturas, eficiencia y potencia en comparación con los equipos elaborados [59]. Sin embargo el volumen obtenido, es menor al reportado de 3 a 4 litros por 6 horas de exposición [51, 53], [54], mientras que por el prototipo aquí diseñado, se obtienen valores de 250 ml por 6 horas de exposición, que en un destilador pasivo es superado por facilidad, mientras es posible el calentamiento de un mayor volumen de agua, en comparación con los anteriormente reportado, los cuales introducen cantidades de 25 ml por cada 6 horas.

Por otro lado, pocos son los artículos que mencionan la calidad del agua obtenida [68]. En uno de ellos se señala la reducción de sales disueltas en el agua, que, mediante el proceso de destilación, deben disminuir considerablemente [68]. Para lo cual se realizó el muestreo de la cantidad de sales presentes en el agua antes y después del destilado, mediante la conductividad eléctrica y por triplicado (Tabla 7).

Tabla 7. Valores de conductividad obtenidos

Día	Valor inicial	Valor final
21/08/2018	533 $\mu\text{S/cm}$	23 $\mu\text{S/cm}$
23/08/2018	534 $\mu\text{S/cm}$	14 $\mu\text{S/cm}$
25/08/2018	533 $\mu\text{S/cm}$	17 $\mu\text{S/cm}$
26/08/2018	533 $\mu\text{S/cm}$	21 $\mu\text{S/cm}$
05/09/2018	600 $\mu\text{S/cm}$	12 $\mu\text{S/cm}$
28/05/2019	5055 $\mu\text{S/cm}$	38 $\mu\text{S/cm}$

Observándose que en el agua con altos contenidos de sales, ($600 \mu\text{S}/\text{cm}$) situado en el límite superior para agua potable [61], disminuyó en el destilado a $12 \mu\text{S}/\text{cm}$, situándolo como un agua pura. Mientras que en agua con alto contenido de sal (asemejando con el agua de mar), decrementó su valor hasta los $38 \mu\text{S}/\text{cm}$, permitiendo la formación de un equipo que permita la reducción de sales, abaratando de esta manera los costos.

Aunado a ello, el dispositivo no constituye un alto costo de producción, ya que se emplearon materiales disponibles en la región, fácil de operar y mantenimiento sencillo; así mismo, se puede utilizar como estufa y destilador en todo momento.

CAPÍTULO 9

9.0. Conclusiones

Se elaboró un prototipo de destilador tipo caja en el cual se le adicionaron reflectores que permitieron la concentración de la energía solar, utilizando material accesible como: espejos, madera, cartón, poliuretano y recipiente galvanizado, con lo que los costos de producción disminuyeron considerablemente.

Se registraron valores máximos en el agua de 110 °C, la cual es la adecuada para la destilación y manteniéndose entre 100-110 °C por un periodo de 2 a 3 horas, dependiendo de las condiciones climáticas.

La eficiencia lograda en el sistema fue de 52.90 W con potencia del 37%, alcanzando valores en el volumen de destilado de 250 a 300 ml. La reducción de sales es notoria teniendo valores promedio iniciales de 1298 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (contando todas las muestras), logrando reducirlas a un promedio de 21 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

CAPÍTULO 10

10.0 Perspectivas

Este equipo puede mejorar su rendimiento si se utilizan materiales más elaborados en su construcción, sobre todo en el aspecto aislante ya que con esta mejora podría disminuir la pérdida de calor hacia el medio, lo cual impactaría de forma directa en el volumen de destilado, debido a que se mantendría por más tiempo la temperatura dentro del dispositivo, y por lo tanto, también en el contenedor. Con la finalidad de minimizar las pérdidas de vapor, se puede agregar un condensador externo, y así se llevaría un cambio de estado de manera más eficiente impactando de igual manera en el volumen final de destilado.

Por otra parte, sería conveniente elaborar un recipiente o prueba mediante la cual se pueda registrar la adherencia de las sales dentro del contenedor, ya que con esto tendríamos certeza de cuando llevar a cabo una limpieza.

Por último sería conveniente llevar a cabo una prueba de inocuidad del agua para así cerciorarse de la eliminación de microorganismos patógenos.

10.1. Referencias

1. Kumar, P.V., et al., *Solar stills system design: A review*. Renewable and sustainable energy reviews, 2015. **51**: p. 153-181.
2. Shukla, A., K. Kant, and A. Sharma, *Solar still with latent heat energy storage: a review*. Innovative food science & emerging technologies, 2017. **41**: p. 34-46.
3. Shannon, M.A., et al., *Science and technology for water purification in the coming decades*. Nature, 2008. **452**(7185): p. 301-310.
4. Connor, R. and E. Koncagül, *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: Agua para un mundo sostenible. Resumen ejecutivo*. 2015.
5. Arnell, N.W., *Climate change and global water resources*. Global environmental change, 1999. **9**: p. S31-S49.
6. Muller, M., *Understanding Cape Town's Water Crisis*. 2017.
7. Town, D.o.W.a.S.C.o.C., *WATER OUTLOOK 2018 REPORT*. 2018.
8. Maxmen, A., *As Cape Town water crisis deepens, scientists prepare for Day Zero'*. Nature, 2018. **554**: p. 13-14.
9. SEMARNAT/CONAGUA, *Diagnostico del agua perspectivas a futuro. Para 2030*. 2011.
10. irrigación, D.g.d., *El agua: una mirada global*. 2016.
11. SEMARNAT, *Informe de la situación del medio ambiente en México*. 2012.
12. Naranjo, A.F.B.P.y.J.A.B., *Disponibilidad de agua en el futuro de México*. 20007.
13. INEGI, *Anuario estadístico del estado de Zacatecas 2010*.
14. (CONAGUA), C.N.d.A., *Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero Calera (3225), Estado de Zacatecas*. 2015.
15. (CONAGUA), C.N.d.A., *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el cuífero Jeréz (3205), Estado de Zacatecas*. 2015.
16. Instituto Nacional de Estadística, G.e.I., *Marco geoestadístico municipal 2005:(MGM2005)*. 2005: INEGI.
17. Guerny, J.d., *Population and Water Resources (contrib. by FAO)*. 1994.
18. Amarasinghe, U.A., P.G. McCornick, and T. Shah, *India's water demand scenarios to 2025 and 2050: a fresh look*. 2009.
19. Staff, N.R.C., *Water for the Future: The West Bank and Gaza Strip, Israel, and Jordan*. 1999: National Academies Press.
20. Cabral, J.P., *Water microbiology. Bacterial pathogens and water*. International journal of environmental research and public health, 2010. **7**(10): p. 3657-3703.
21. Geneva, W., *Guidelines for drinking-water quality (electronic resource), incorporating 1st and 2nd addenda*. 2008, Volume.
22. Farmer, J. and F. Hickam-Brenner, *The Genus Vibrio and Phtotobacterium*. The Prokaryotes: An Evolving Electronic Resource for the Microbiological Community, 2003.
23. Leclerc, H., L. Schwartzbrod, and E. Dei-Cas, *Microbial agents associated with waterborne diseases*. Critical reviews in microbiology, 2002. **28**(4): p. 371-409.
24. Zhang, F., et al., *Size-dependent hydrogenation selectivity of nitrate on Pd- Cu/TiO2 catalysts*. The Journal of Physical Chemistry C, 2008. **112**(20): p. 7665-7671.
25. Ward, M., et al., *Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review*. International journal of environmental research and public health, 2018. **15**(7): p. 1557.
26. 2011, N.y.H.S.e.a., *Nitrate/Nitrite Toxicity, What Are the Health Effects from Exposure to Nitrates and Nitrites?* 2016.

27. Moreno, A.R., *Parámetros químicos de calidad de las aguas. Cloruros y Sulfatos*. 2011.
28. BASHIR, M.T., S. ALI, and A. BASHIR, *Health Effects from Exposure to Sulphates and Chlorides in Drinking Water*. Pakistan J. of medical and health sciences, 2012(3): p. 648-652.
29. Soo, Y.O.-Y., et al., *A whitened face woman with nephrotic syndrome*. American journal of kidney diseases, 2003. **41**(1): p. 250-253.
30. LONDOÑO-FRANCO, L.F., P.T. LONDOÑO-MUÑOZ, and F.G. MUÑOZ-GARCÍA, *RISK OF HEAVY METALS IN HUMAN AND ANIMAL HEALTH*. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 2016. **14**(2): p. 145-153.
31. Fernandes Azevedo, B., et al., *Toxic effects of mercury on the cardiovascular and central nervous systems*. BioMed Research International, 2012. **2012**.
32. Clarkson, T.W., J.B. Vyas, and N. Ballatori, *Mechanisms of mercury disposition in the body*. American Journal of Industrial Medicine, 2007. **50**(10): p. 757-764.
33. Gulson, B., et al., *Contribution of tissue lead to blood lead in adult female subjects based on stable lead isotope methods*. The Journal of laboratory and clinical medicine, 1995. **125**(6): p. 703-712.
34. Weyermann, M. and H. Brenner, *Factors affecting bone demineralization and blood lead levels of postmenopausal women—a population-based study from Germany*. Environmental research, 1998. **76**(1): p. 19-25.
35. Abernathy, C.O., et al., *Arsenic: health effects, mechanisms of actions, and research issues*. Environmental health perspectives, 1999. **107**(7): p. 593.
36. Hong, Y.-S., K.-H. Song, and J.-Y. Chung, *Health effects of chronic arsenic exposure*. Journal of preventive medicine and public health, 2014. **47**(5): p. 245.
37. Lead, W.I., *Environmental Health Criteria 165*. International Programme on Chemical Safety. Geneva: World Health Organization, 1995.
38. Salud, O.M.d.I., *Arsenico 2018*.
39. Järup, L., et al., *Low level exposure to cadmium and early kidney damage: the OSCAR study*. Occupational and environmental medicine, 2000. **57**(10): p. 668-672.
40. (ATSDR), A.p.S.T.y.e.R.d.E., *Resumen de salud publica Cromo*. 2012.
41. Mendoza, L.H., *Métodos para purificar agua*. 2004.
42. Elvis, A. and J. Ekta, *Ozone therapy: A clinical review*. Journal of natural science, biology, and medicine, 2011. **2**(1): p. 66.
43. de la Federación, D.O., *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994*. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México, DF, 1996. **18**.
44. Mexicana, N.O., *NOM-127-SSA1-1994*. Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, hierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica, 1994.
45. Unidos, A.d.P.A.d.E., *State-Specific Water Quality Standards 2014*.
46. Hermosillo-Villalobos, J.J., *Destilación solar*. 1989, ITESO.
47. Figueroa, O.G.V.e.I.P., *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial*. 2017.
48. Figueroa, O.G.V.e.I.P., *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial*. 2017.
49. UNAM, *Destiladores Solares*, in *Ciencias 1989: Mexico*, Mex. p. 30.
50. SEMARNAT, *Purificador solar de agua y esterilizador ultravioleta*. 2013: p. 26.
51. Jönsson, J., A. Wikman, and T. Wätthammar, *Social Return on Investment, SROI, the value added for families before and after using Solvatten in the Bungoma district in Western Kenya*. 2011.

52. Badran, A.A., et al., *A solar still augmented with a flat-plate collector*. Desalination, 2005. **172**(3): p. 227-234.
53. Arunkumar, T., et al., *The augmentation of distillate yield by using concentrator coupled solar still with phase change material*. Desalination, 2013. **314**: p. 189-192.
54. Abad, H.K.S., et al., *A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe*. Desalination, 2013. **311**: p. 206-210.
55. Castillo Téllez, M., *Análisis teórico-experimental de un destilador solar de doble caseta con convección forzada* 2013.
56. Álvarez, M., *La destilación solar: una posibilidad real de utilización en Cuba*. 2016.
57. rimstar.org, *How to design solar reflectors for solar cookers* 2011.
58. Coccia, G., et al., *Design, manufacturing, and test of a high concentration ratio solar box cooker with multiple reflectors*. Solar Energy, 2017. **155**: p. 781-792.
59. Akoy, E.O. and A.I. Ahmed, *Design, construction and performance evaluation of solar cookers*. Journal of Agricultural Science and Engineering, 2015. **1**(2): p. 75-82.
60. Viruela, C.G.R.G.e.R., *CONDUCTIVIDAD DE LAS DISOLUCIONES ELECTROLITICAS*. 2010.
61. Lenntech, *Conductividad del agua*. 1998-2019.
62. Europe, S., *Energía Fotovoltaica–Radiación, Geometría, Recorrido óptico, Irradiancia y HSP*. Retrieved December 1, 2018. 2017.
63. Belay, Y., G. Amente, and G. Goro, *Estimation of Solar Panel Orientation with Different Tilt Angles at Haramaya University*.
64. Bobadilla, E.A., et al., *Durabilidad natural de la madera de dos especies aptas para la industria de la construcción*. Floresta, 2005. **35**(3).
65. Martínez, Á.T., et al., *Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin*. 2005.
66. Noves, H.A., *La madera como aislamiento termico*.
67. madrid, F.d.l.e.d.l.c.d., *Guía sobre materiales aislantes y eficiencia energética* 2012: p. 19-34.
68. Uleberg, I.F., *Design and Fabrication of Solar Water Distillation System for Developing Countries*. 2017, Universitetet i Agder; University of Agder.

6. Anexo 1: Actividades extracurriculares (congresos, diplomados, cursos, etc).

- Congreso internacional de recursos renovables, celebrado en la ciudad de Villa Hermosa, Tabasco, los días 25,26,27 y 28 de septiembre.
- Diplomado en “Energías Renovables y Eficiencia Energética” acreditado por la universidad politécnica de Catalunya con duración de 300 horas en 6 meses.