

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Prototipo de sistema de desalinización solar pasiva aplicado a muestras de agua salada de las costas de Santa Rosa, Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Amy Iovana Toledo Campos para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, 2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería




Prototipo de sistema de desalinización solar pasiva aplicado a muestras de agua salada de las costas de Santa Rosa, Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Amy Iovana Toledo Campos para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, 2025


Asesor



---

Ing. Gustavo Barrera

Vo.Bo. Director



---

Ing. Gustavo Barrera  
Ingeniería Mecánica Industrial

Fecha de presentación: Guatemala, 18 de noviembre de 2025.

---

## Prefacio

---

Primero, agradecer a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y compañía durante toda mi vida. Por poner en mi camino las oportunidades que forjaron un crecimiento en mí y me acercaron más a la culminación de esta meta, y sobre todo por darme la bendición de despertar para comenzar y enfrentar un nuevo día.

A mis padres Dina Josefa Campos Ochoa y William Malinovsquit Toledo Aquino, por haber creído en mí desde el principio de mi carrera universitaria, por haberme permitido estudiar la carrera que amo, por su apoyo y amor incondicional en todo momento. Su ejemplo como profesionales y personas es y será siempre mi principal motivación para ser mejor cada día.

Adicionalmente, hacer una mención especial a mi papá por ser mi asistente de pruebas experimentales, su apoyo y dedicación con el proyecto fueron fundamentales para la evaluación de los resultados y culminación del mismo.

A mis hermanos Paula Sofía y Marco Paolo, por darme el proyecto más importante de mi vida hasta ahora que es ser su hermana mayor y por ser además mis mejores amigos.

A mis perritos Luca y Odie, quienes por 13 y 11 años de sus vidas me dieron la mejor compañía y amor incondicional. A pesar de su ausencia, siempre los llevo presentes.

A mi mejor amiga de la universidad, Keiry Fernanda Chang Palma, por estar a mi lado desde el primer día de clases hasta nuestro último día y haber forjado una amistad verdadera durante toda nuestra carrera. Su apoyo incondicional ha sido importante para alcanzar esta meta y ser la persona con la que he vivido los momentos más importantes de mi carrera.

A mis amigos de universidad, Iván Chávez, Celeste Solano, Mabel Colindres, Luis Salvatierra y César García, quienes han sido parte de los días más especiales de mi vida universitaria, con quienes comparto mis mejores recuerdos e hicieron de la carrera y la universidad un lugar especial.

---

## Índice

---

Prefacio.....	I
Índice.....	II
Lista de figuras .....	V
Lista de cuadros.....	VIII
Resumen.....	X
1. Introducción .....	1
2. Antecedentes .....	3
3. Justificación.....	6
4. Objetivos .....	8
4.1.    Objetivo general .....	8
4.2.    Objetivos específicos.....	8
5. Identificación de requisitos .....	9
6. Revisión del estado del arte.....	11
6.1.    Desalinizador solar.....	11
6.2.    Desalinizadores solares pasivos.....	12
6.3.    Limitaciones e indicadores de rendimiento .....	13
6.4.    Proyectos actuales.....	14
7. Metodología .....	18
7.1.    Descripción general de la metodología .....	18
7.2.    Identificación de necesidades .....	18
7.2.1.    Necesidades de funcionamiento .....	18
7.2.2.    Necesidades de agua potable para consumo humano .....	20

7.3.	Definición de requisitos.....	21
7.4.	Diseño estructural del sistema .....	23
7.4.1.	Diseño prototipo experimental .....	23
7.4.2.	Diseño prototipo final.....	24
7.5.	Partes del sistema.....	24
7.5.1.	Reflector solar.....	25
7.5.2.	Domo evaporador .....	26
7.5.3.	Cono condensador .....	26
7.5.4.	Recipiente recolector .....	27
7.6.	Cálculos teóricos del sistema.....	29
7.6.1.	Captación de radiación solar.....	29
7.6.2.	Análisis funcionamiento del sistema .....	34
7.6.3.	Transferencia de calor .....	37
7.6.4.	Evaporación del agua salada.....	44
7.6.5.	Eficiencia del sistema .....	48
7.6.6.	Prueba salinidad del agua .....	50
7.7.	Medición de resultados experimentales.....	51
7.7.1.	Identificación de zonas para medición de temperaturas experimentales.....	51
7.7.2.	Instrumentos de medición.....	53
8.	Fabricación.....	59
8.1.	Fabricación prototipo de prueba .....	60
8.2.	Prototipo final.....	64
8.2.1.	Estructura de soporte del domo .....	65
8.2.2.	Reflectores .....	68
8.2.3.	Cono condensador .....	69

8.2.4.	Domo evaporador .....	72
8.2.5.	Sello hermético .....	73
8.3.	Análisis de costos de fabricación.....	75
9.	Resultados .....	76
9.1.	Prototipo experimental .....	76
9.2.	Prototipo final.....	81
9.2.1.	Resultados prueba #2.....	81
9.2.2.	Resultados prueba #10.....	85
9.3.	Pruebas de salinidad .....	92
10.	Análisis de resultados .....	94
10.1.	Pruebas experimentales .....	94
10.2.	Temperaturas superficiales reflector, domo y agua salada.....	96
10.3.	Efecto invernadero en pruebas prototipo final .....	99
10.4.	Agua destilada recolectada y eficiencia del sistema.....	101
10.5.	Pruebas de salinidad .....	103
10.6.	Cumplimiento de requisitos.....	104
11.	Conclusiones.....	106
12.	Recomendaciones .....	108
13.	Referencias .....	110
14.	Anexos .....	113

---

## Lista de figuras

---

Figura 1. Diseño de reflector solar sistema desalinizador solar pasivo .....	25
Figura 2. Domo evaporador.....	26
Figura 3. Cono condensador de vapor de agua.....	27
Figura 4. Recipiente recolector.....	28
Figura 5. Diseño prototipo experimental .....	28
Figura 6. Diseño prototipo final.....	28
Figura 7. Irradiancia solar reflectada por superficie en relación al ángulo de inclinación del reflector.....	34
Figura 8. Esquema del funcionamiento general del sistema .....	35
Figura 9. Secuencia de procesos térmicos y de transferencia de masa en el sistema desalinizador solar pasivo.....	36
Figura 10. Variación de temperaturas según horario solar analizado para sistema prototipo prueba en mes de abril, ubicado en Santa Rosa .....	42
Figura 11. Variación de temperaturas según horario solar analizado para sistema prototipo final .....	43
Figura 12. Zonas de medición de temperaturas .....	52
Figura 13. Termómetro de cocina empleado en mediciones de temperatura del agua salada .....	54
Figura 14. Termómetro electrónico para líquidos con sonda empleado para mediciones de temperatura de agua salada.....	54
Figura 15. Cámara termográfica Fluke empleada en mediciones de temperatura en las zonas del sistema .....	55
Figura 16. Jeringa de 5 ml empleada para medición de volumen de agua salada recolectada .....	56
Figura 17. Jarra volumétrica para medición de volumen de agua salada. ....	56
Figura 18. Multímetro digital UNI-T UT33D .....	57
Figura 19. Plantilla de registro de resultados de pruebas experimentales de prototipos .....	58
Figura 20. Diseño de desalinizador solar casero .....	59
Figura 21. Domo evaporador termoformado y molde impreso en 3D .....	61

Figura 22. Cono condensador termoformado y molde impreso en 3D .....	61
Figura 23. Reflector con cubierta reflectiva y cuña.....	62
Figura 24. Estructura de soporte del sistema.....	63
Figura 25. Diseño CAD y prototipo prueba físico.....	63
Figura 26. Prototipo de prueba sellado con cinta industrial .....	64
Figura 27. Simulación CAM de estrategias de maquinado con Fusion 360.....	65
Figura 28. Maquinado de piezas de soporte en router CNC Shop .....	66
Figura 29. Unión de piezas de anillo de soporte.....	67
Figura 30. Estructura de soporte de sistema prototipo final .....	67
Figura 31. Fabricación y colocación de reflectores .....	68
Figura 32. Impresión 3D cono condensador en Eleego Giga .....	70
Figura 33. Masillado y alisado de superficie domo condensador.....	70
Figura 34. Recubrimiento con pintura blanca y prueba antiadherente de gotas.....	71
Figura 35. Molde metálico y cono acrílico termoformado .....	71
Figura 36. Domo evaporador original y modificado para pruebas de funcionalidad .....	72
Figura 37. Anillo de forro PVC para sello hermético.....	73
Figura 38. Sello con roldanas y mariposas .....	73
Figura 39. Diseño CAD y prototipo final físico .....	74
Figura 40. Sistema prototipo experimental en funcionamiento, prueba #4 (17 de abril, 2025. Chiquimulilla, Santa Rosa).....	76
Figura 41. Distribución de calor en superficie externa domo evaporador con recubrimiento negro mate en sistema prototipo experimental, prueba #4 .....	77
Figura 42. Distribución de calor en reflectores de sistema prototipo experimental, prueba #4 .....	77
Figura 43. Temperatura superficial externa cono evaporador de sistema prototipo experimental, prueba #4 .....	78
Figura 44. Variación de temperaturas experimentales en zonas del sistema prototipo experimental prueba #10 según horario solar de funcionamiento. ....	79
Figura 45. Sistema prototipo final en funcionamiento con cono condensador impreso en 3D y aislante reflectivo añadido, prueba #4 (10 de octubre, 2025. Ciudad, Guatemala).....	81
Figura 46. Distribución de calor en superficie externa domo evaporador con recubrimiento	

negro mate en sistema prototipo final, prueba #2.....	81
Figura 47. Distribución de calor en reflectores de sistema prototipo final, prueba #2.....	82
Figura 48. Distribución de calor en cono condensador de sistema prototipo final, prueba #2 .....	82
Figura 49. Distribución de calor en cono condensador de sistema prototipo final, prueba #2 .....	83
Figura 50. Acumulación de gotas condensadas en cono condensador elaborado con impresión 3D con aislante reflectivo, prueba #2 .....	84
Figura 51. Recipiente recolector sin muestra de agua destilada recolectada para prueba#2 empleando cono condensador impreso en 3D con aislante reflectivo.....	84
Figura 52. Sistema prototipo final en funcionamiento con cono condensador de acrílico transparente y recubrimiento total del domo evaporador, prueba #10 (25 de octubre, 2025. Mixco, Guatemala).....	85
Figura 53. Distribución de calor en superficie externa domo evaporador con recubrimiento negro mate en sistema prototipo final, prueba #10.....	85
Figura 54. Distribución de calor en superficie externa domo evaporador sin recubrimiento negro mate en sistema prototipo final, prueba #10.....	86
Figura 55. Distribución de calor en reflectores de sistema prototipo final, prueba #10.....	86
Figura 56. Distribución de calor en cono condensador de sistema prototipo final, prueba #10 .....	87
Figura 57. Acumulación de gotas condensadas en cono condensador elaborado con acrílico termoformado, prueba #10 .....	87
Figura 58. Variación de temperaturas experimentales en zonas del sistema prototipo experimental prueba #10 según horario solar de funcionamiento. ....	88
Figura 59. Volumen de agua salada restante en domo evaporador luego de período de 8 horas de funcionamiento, prueba #10.....	90
Figura 60. Volumen de agua destilada recolectada luego de período de 8 horas de funcionamiento, prueba #10 .....	90
Figura 61. Medición de resistencia eléctrica para muestra de agua destilada recolectada de prueba #10 .....	92
Figura 62. Medición de resistencia eléctrica para muestra de agua salada de prueba #10...	92

---

## Lista de cuadros

---

Cuadro 1. Variables para considerar en diseño de desalinizadores solares pasivos.....	13
Cuadro 2. Características químicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano según norma NTG 29001.....	20
Cuadro 3. Especificaciones estándar para el Agua de calidad de reactivo Norma ASTM D1193-91 (agua destilada).....	21
Cuadro 4. Definición de códigos de identificación de requisitos .....	21
Cuadro 5. Identificación de requisitos para diseño de prototipo de desalinización solar pasiva .....	22
Cuadro 6. Valores de $n$ y $\delta$ obtenidos de Tabla 1.6.1 de Duffie y Beckman correspondientes al mes de abril para obtención de radiación extraterrestre en superficie de reflector.....	32
Cuadro 7. Ecuaciones de transferencia de calor .....	37
Cuadro 8. Ecuaciones para determinar la transferencia de calor por radiación de la superficie del reflector hacia la superficie externa del domo evaporador.....	39
Cuadro 9. Datos de variables empleadas en cálculos teóricos de transferencia de calor .....	41
Cuadro 10. Resultados de temperaturas teóricas prototipo prueba en mes de Abril, ubicado en Santa Rosa.....	42
Cuadro 11. Resultados de temperaturas teóricas prototipo final en mes de Octubre, ubicado en Mixco, Guatemala.....	43
Cuadro 12. Datos para cálculo de $Q$ .....	46
Cuadro 13. Presiones correspondientes a $T_{alrd}$ y $T_s$ (análisis prototipo prueba).....	46
Cuadro 14. Presiones correspondientes a $T_{alrd}$ y $T_s$ (análisis prototipo final) .....	47
Cuadro 15. Transferencia teórica de calor por convección y razón de evaporación durante horario solar (diseño prototipo prueba) .....	47
Cuadro 16. Transferencia teórica de calor por convección y razón de evaporación durante horario solar (diseño prototipo final).....	48
Cuadro 17. Potencial de masa teórica total evaporada en el sistema para prototipo prueba y prototipo final .....	48
Cuadro 18. Valores para cálculo de eficiencia de sistema prototipo prueba y prototipo final ..	49
Cuadro 19. Eficiencia teórica del sistema prototipo de prueba y final.....	50

Cuadro 20. Especificaciones de fresa utilizada para estrategia de maquinado 2D.....	66
Cuadro 21. Análisis de costos de fabricación de prototipo final .....	75
Cuadro 22. Temperaturas registradas en zonas del sistema prototipo prueba, prueba #4 (17 de abril 2025. Chiquimulilla, Santa Rosa).....	78
Cuadro 23. Diferenciales de temperatura entre pared interna de domo evaporador y superficies de condensación de sistema prototipo experimental, prueba #4 .....	79
Cuadro 24. Temperaturas experimentales de prueba #4 y temperaturas teóricas estimadas para sistema prototipo prueba.....	80
Cuadro 25. Resultados de operación del sistema prototipo prueba, prueba #4 (17 de abril 2025.Chiquimulilla, Santa Rosa).....	80
Cuadro 26. Eficiencia teórica y experimental del sistema prototipo prueba, prueba #4 .....	80
Cuadro 27. Temperaturas registradas en zonas del sistema prototipo final con aislante reflectivo añadido, prueba #2 (10 de octubre 2025. Ciudad de Guatemala, Guatemala)....	83
Cuadro 28. Temperaturas registradas en zonas del sistema prototipo final, prueba #10 (25 de octubre 2025. Mixco, Guatemala) .....	88
Cuadro 29. Diferenciales de temperatura entre pared interna de domo evaporador y superficies de condensación de sistema prototipo final, prueba #10.....	89
Cuadro 30. Temperaturas experimentales de prueba #10 y temperaturas teóricas estimadas para sistema prototipo final .....	89
Cuadro 31. Resultados prueba #10 de operación del sistema prototipo final (25 de octubre 2025. Mixco, Guatemala).....	91
Cuadro 32. Eficiencia teórica y experimental del sistema prototipo final, prueba #10.....	91
Cuadro 33. Conductividad eléctrica de muestras de agua de sistema prototipo prueba #7 ..	93
Cuadro 34 Comparación de conductividad agua destilada recolectada con parámetros NTG 20091 y ASTM D1193-91 .....	93
Cuadro 35. Verificación de cumplimiento de requisitos y justificación. ....	104

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño, construcción y validación experimental de un sistema de destilación solar pasiva para la producción de agua potable en comunidades rurales con acceso limitado a servicios de saneamiento. El sistema propuesto combina un domo evaporador semiesférico recubierto internamente con pintura negra mate, que actúa como captador térmico, y un cono condensador transparente, cuya geometría favorece la recolección del vapor condensado. La operación del sistema se basa en el aprovechamiento del efecto invernadero, la absorción de radiación solar directa y el aprovechamiento de la energía térmica sin requerir fuentes externas de energía.

Se desarrollaron dos prototipos: uno experimental y otro final, los cuales fueron sometidos a pruebas de funcionamiento en condiciones reales, con monitoreo constante de temperaturas superficiales, volumen de agua evaporada y recolectada, así como conductividad eléctrica de las muestras. En la prueba más eficiente del prototipo experimental, se alcanzó una temperatura máxima del agua salada de 65.5 °C, con una eficiencia térmica del 4.21 %. Por su parte, el prototipo final logró recolectar 32 mL de agua destilada en un ciclo de 8 horas, con una eficiencia del 1.89 %. Se identificó que el diferencial térmico mínimo necesario entre el agua salada y el cono condensador para que ocurra condensación efectiva es de 8 °C.

Los resultados demostraron la viabilidad técnica del sistema, aunque se evidenciaron pérdidas por fugas menores, condensación en zonas no canalizadas y limitaciones en la hermeticidad de los componentes. La prueba de conductividad eléctrica clasificó el agua recolectada como Tipo III según la norma ASTM D1193-91, y dentro de los parámetros aceptables de potabilidad establecidos por la norma guatemalteca COGUANOR NTG 29001. Esto confirma la capacidad del sistema para generar agua con baja concentración de sales, aunque se recomienda complementar el análisis con pruebas fisicoquímicas adicionales para validar completamente su aptitud para el consumo humano.

En general, el sistema representa una alternativa sostenible, de bajo costo y potencialmente replicable para enfrentar el problema de acceso al agua potable en zonas vulnerables, aunque se requieren mejoras técnicas para optimizar su eficiencia y rendimiento a largo plazo

---

## 1. Introducción

---

El acceso al agua potable continúa siendo uno de los principales desafíos para las comunidades rurales y costeras en Guatemala, especialmente en aquellas donde la infraestructura de saneamiento es limitada o inexistente. En regiones como el departamento de Santa Rosa, muchas comunidades dependen de fuentes como pozos artesanales o corrientes superficiales, las cuales presentan altos niveles de contaminación, en particular durante la época lluviosa. Esta situación compromete la salud pública, la seguridad hídrica y el desarrollo sostenible de las poblaciones más vulnerables, lo que hace urgente la implementación de soluciones tecnológicas accesibles, sostenibles y adaptadas a las condiciones climáticas y geográficas del país.

En respuesta a esta problemática, el presente proyecto se orienta al diseño, construcción y evaluación de un sistema de destilación solar pasiva, cuyo objetivo es transformar agua salada o contaminada en agua apta para el consumo humano, mediante procesos naturales de evaporación y condensación impulsados por energía solar. La propuesta parte del desarrollo de un sistema compacto y de bajo costo, que no dependa de fuentes externas de energía eléctrica o combustibles fósiles, lo que lo hace especialmente adecuado para zonas rurales sin acceso a infraestructura energética.

El sistema diseñado está conformado por un domo evaporador recubierto con pintura negra mate, encargado de absorber la radiación solar y transferir el calor al agua salada contenida en su interior, y un cono condensador traslúcido que permite la entrada de radiación, pero dificulta la salida del calor, generando un efecto invernadero que favorece la evaporación. El vapor producido se condensa en la superficie interna del cono y es dirigido por gravedad hacia un recipiente recolector. Este diseño busca maximizar la eficiencia térmica del sistema, optimizar la recolección del agua destilada y garantizar la calidad del líquido obtenido.

A lo largo del proyecto se desarrollaron dos prototipos (experimental y final), los cuales fueron sometidos a pruebas de campo para evaluar variables como temperatura superficial, volumen recolectado, eficiencia térmica y calidad del agua producida. Estas pruebas

permitieron validar el funcionamiento del sistema, identificar limitaciones de diseño y proponer mejoras técnicas orientadas a aumentar el rendimiento. Además, se realizaron análisis básicos de potabilidad, como la medición de la conductividad eléctrica, con el fin de verificar la reducción de sales disueltas en el agua obtenida.

Se describe detalladamente el proceso de diseño, los fundamentos teóricos aplicados, la metodología experimental, el análisis de resultados obtenidos y las recomendaciones para futuras mejoras y adaptaciones del sistema.

---

## 2. Antecedentes

---

El estudio y desarrollo de sistemas de desalinización solar pasiva ha sido abordado en diversas investigaciones nacionales e internacionales, debido a la necesidad de generar alternativas sostenibles para la producción de agua potable en comunidades sin acceso estable a fuentes seguras. Estos trabajos han permitido identificar avances tecnológicos, limitaciones y oportunidades para optimizar los procesos de evaporación y condensación mediante energía solar.

Diversas publicaciones especializadas describen el funcionamiento de destiladores tipo domo, inclinados y de efecto simple, demostrando que la radiación solar puede ser utilizada de manera eficiente para transformar agua salada o contaminada en agua apta para consumo humano. Estudios realizados en sistemas de destilación solar de pequeño formato concluyen que los diseños pasivos alcanzan producciones diarias de entre 2 y 5 litros por metro cuadrado, dependiendo de la temperatura interna del domo, la calidad del material transparente y la estabilidad térmica de la base absorbente (Al-Karaghoulí y Kazmerski, 2013). Estos análisis señalaron que el desempeño del equipo mejora cuando se optimiza la absorción de calor y se reduce la pérdida energética por convección.

Otros estudios evaluaron sistemas de destilación solar con variaciones en el ángulo de inclinación, espesor de la cubierta y geometría del colector (Aybar, 2017; Sampathkumar et al., 2010). Los principales hallazgos señalan que la forma del domo y la transparencia del material influyen directamente en el aumento de temperatura y en la eficiencia de condensación, siendo más efectivos aquellos equipos que maximizan el efecto invernadero para elevar la temperatura del agua. Estos trabajos también subrayan que la producción de agua potable depende de mantener un gradiente térmico adecuado entre la base caliente y la superficie fría del domo.

A nivel latinoamericano, proyectos realizados en zonas rurales de Perú, México y Chile han demostrado la aplicabilidad de desalinizadores solares pasivos en comunidades con recursos limitados. Investigaciones de la Universidad de Tarapacá, Chile, implementaron destiladores solares en localidades costeras afectadas por escasez hídrica, logrando producir agua potable con parámetros dentro de los límites establecidos por la OMS (Universidad de Tarapacá, 2018). Estos proyectos destacan la importancia de utilizar materiales económicos y resistentes, así como diseños fáciles de operar sin requerir electricidad.

En Guatemala también se han desarrollado iniciativas académicas orientadas a la desalinización solar a pequeña escala. Trabajos universitarios han experimentado con destiladores planos, estructuras tipo invernadero y cubiertas de policarbonato, con resultados que demuestran incrementos significativos en la temperatura del agua y una mejora en la calidad final del recurso obtenido. Aunque estos proyectos han utilizado diferentes geometrías y materiales, coinciden en la pertinencia de integrar sistemas solares pasivos como alternativa para comunidades rurales con limitaciones de infraestructura hídrica.

El presente trabajo se fundamenta en el prototipo de desalinizador solar pasivo desarrollado en el informe de trabajo de graduación titulado *“Desalinización y purificación de agua marítima de la Costa Sur de Guatemala por medio de la fabricación de un destilador solar”*. (Quan, 2022). En dicho estudio, el autor propone la construcción de un domo geodésico como elemento principal para generar el efecto invernadero necesario para elevar la temperatura interna y permitir que el vapor de agua se condense en las paredes del domo de manera uniforme, favoreciendo su recolección por efecto de la gravedad.

El prototipo fue reproducido y puesto a prueba siguiendo las indicaciones planteadas en su informe, incluyendo la fabricación de todos los componentes requeridos para su funcionamiento. No obstante, durante la fase experimental se identificaron múltiples fugas de aire y se comprobó que el sistema no era completamente hermético. Además, la geometría del domo geodésico, cuya estructura estaba construida en su mayoría en madera, reducía significativamente la entrada de radiación solar al interior, afectando la eficiencia térmica del proceso. Sin embargo, se tomó en cuenta la propuesta de la geometría semiesférica como un elemento importante para la distribución uniforme del calor o la condensación de gotas de agua.

En conjunto, estos antecedentes demuestran que los sistemas de desalinización solar pasiva representan una tecnología viable, económica y ambientalmente sostenible. Los estudios previos han permitido identificar variables críticas como la absorción térmica, el tipo de cubierta, la ubicación geográfica y las características del agua de entrada, elementos fundamentales que orientan el diseño del prototipo propuesto para las comunidades de Santa Rosa.

---

### 3. Justificación

---

Guatemala cuenta con una amplia disponibilidad de recursos hídricos; sin embargo, cerca del 90% de las corrientes superficiales y subterráneas del país presentan algún grado de contaminación (Hábitat Guatemala, 2023). Las comunidades marino-costeras, especialmente las rurales ubicadas en la vertiente del Litoral Pacífico, son las más afectadas debido al uso intensivo del recurso por parte de las actividades agrícolas e industriales. La desviación de caudales para riego y producción limita el flujo natural de los ríos hacia los esteros, lagunas y el océano, reduciendo la disponibilidad de agua dulce y provocando un aumento en la salinización de los pozos. Esta situación afecta directamente a las familias que habitan en los municipios costeros, que dependen de fuentes artesanales para su abastecimiento. En lugares como Taxisco y Chiquimulilla, gran parte de la población recurre a pozos contaminados, sobre todo en la época lluviosa, lo que incrementa la incidencia de enfermedades gastrointestinales y compromete su bienestar y desarrollo social (PNUD, 2018).

De acuerdo con SEGEPLAN, de las 659 comunidades del departamento, solo 320 cuentan con algún tipo de sistema de abastecimiento de agua, y de estas, únicamente 22 rurales y 10 urbanas incluyen procesos de potabilización. Esto refleja una brecha significativa en el acceso a agua segura (SEGEPLAN, 2025). El proyecto de desalinización solar pasiva surge como una respuesta a esta problemática, ofreciendo una solución técnica, económica y ambientalmente sostenible. Este sistema aprovecha la energía solar como fuente térmica para separar las sales del agua marina o salobre mediante evaporación y condensación, sin requerir fuentes eléctricas externas. De esta forma, se promueve el uso de energías limpias y se reduce la dependencia de sistemas costosos de potabilización.

La propuesta busca beneficiar directamente a las comunidades costeras de Escuintla y Santa Rosa, donde habitan más de 40, 000 personas que enfrentan condiciones de escasez o contaminación del agua. La adopción de esta tecnología podría mejorar su calidad de vida al

garantizar un suministro constante de agua apta para el consumo humano y contribuir a reducir los impactos ambientales derivados del uso indiscriminado de recursos hídricos.

El propósito de este trabajo es diseñar y evaluar un prototipo de desalinizador solar pasivo que funcione con base en la energía solar disponible en las regiones costeras del país, caracterizadas por altos niveles de irradiancia durante todo el año. Se espera que los resultados obtenidos sirvan como referencia para la implementación de proyectos de pequeña escala en comunidades rurales, promoviendo la autosuficiencia hídrica y energética. El sistema propuesto no solo representa una alternativa viable y de bajo costo, sino también una oportunidad de replicabilidad en otras zonas del país con condiciones similares. Asimismo, el proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 6, que busca garantizar el acceso universal al agua limpia y al saneamiento, y el ODS 7, que promueve la energía asequible y no contaminante. Al concluir este trabajo, se espera demostrar que la desalinización solar pasiva puede ser una solución técnica eficiente y socialmente inclusiva para mitigar la crisis hídrica en las zonas costeras de Guatemala.

---

## 4. Objetivos

---

### 4.1. Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un prototipo de sistema de desalinización solar pasiva utilizando agua salada recolectada en las costas del departamento de Santa Rosa, Guatemala, con el fin de obtener agua destilada como una alternativa sostenible de abastecimiento en comunidades con acceso limitado a agua potable.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y fabricar la estructura principal del sistema encargada del proceso de transferencia de calor.
- Diseñar y fabricar la estructura secundaria destinada al almacenamiento y recolección del agua destilada
- Seleccionar los materiales que cumplan con los requerimientos funcionales y térmicos de los componentes del sistema.
- Determinar el horario solar con mayor irradiancia promedio en la ubicación donde se instalará el sistema.
- Determinar la temperatura máxima a la que el sistema puede calentar el agua salada para evaporarla
- Determinar la temperatura mínima necesaria para condensar el vapor de agua y facilitar la recolección del destilado.
- Calcular la cantidad de agua destilada recolectada de forma teórica y experimental
- Evaluar la eficiencia térmica y de producción del sistema desalinizador solar pasivo.
- Validar experimentalmente los resultados obtenidos mediante la comparación entre los datos teóricos y las mediciones del prototipo.
- Analizar la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto como alternativa sostenible de abastecimiento de agua potable en comunidades costeras

---

## 5. Identificación de requisitos

---

Según el informe del Human Rights Watch, se entrevistaron a 108 personas de comunidades predominantemente indígenas en los departamentos de Santa Rosa, Jalapa y Totonicapán, de las cuales 103 eran mujeres. De esas entrevistas, 46 mujeres señalaron que el agua disponible era de mala calidad: agua turbia, con mal olor o con residuos contaminantes. Este dato muestra claramente una necesidad expresa: agua segura, de calidad, para consumo humano, en Santa Rosa (Human Rights Watch, 2025).

En el artículo *La crisis del agua en Santa Rosa: una lucha diaria por un recurso esencial* escrito por Colectivo Anpük, aparece que en la aldea de El Limar, municipio de Jumaytepeque, las familias no tienen acceso directo al agua potable, pagan Q250 al año para usar “alcantarillas/piletas” comunitarias; el agua llega esporádicamente, cada 8 a 15 días. Durante la época seca muchas familias deben comprar agua a Q 20.00 por tonelada o recoger agua de arroyos, aunque no siempre sea segura para beber. Esto evidencia la necesidad de suministro estable de agua potable (Quorum, 2024). Dado que en comunidades de Santa Rosa el abastecimiento no es constante y muchas familias deben desplazarse a fuentes externas o comprar agua por tonel, con volúmenes limitados y cargas manuales, el equipo debe diseñarse para que sea fácilmente transportable, con volumen manejable, peso reducido y que permita que una sola persona pueda moverlo, instalarlo o relocalizarlo sin necesidad de equipo pesado.

En el Plan de Desarrollo Municipal de Santa Rosa de Lima, departamento de Santa Rosa, se reporta que el 17.6 % de las viviendas no dispone de acceso a fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable. Asimismo, se señala que muchos sistemas de agua rural no aplican procesos de cloración de manera sistemática, lo que implica que el agua puede estar contaminada desde el punto de origen (Segeplan, 2025). Esta situación evidencia la necesidad de implementar un sistema capaz de proporcionar agua potable desde su recolección en la fuente de suministro y que cumpla con los parámetros de calidad necesarios para garantizar mejores condiciones de vida a la población.

En el informe de autoevaluación sectorial de agua potable y saneamiento (INAP) se indica que en el municipio de Santa Rosa de Lima la cobertura de saneamiento es del 50.2 % y que los hogares con inodoro conectado a red de drenaje son sólo 17.5 % (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2023).

En el artículo presentado por Agencia Ocote, hace mención a un grupo de jóvenes científicos que realizan estudios de monitoreo y control de la calidad del agua de ríos, quebradas, tanques y nacimientos en la cuenca alta de Santa Rosa y Jalapa desde el 2018 (Figueroa, 2024). Lo que evidencia la preocupación comunitaria por la calidad del agua que llega a sus comunidades. Aunque el foco principal es el agua potable (no necesariamente saneamiento), estos datos refuerzan que el entorno tiene múltiples déficits relacionados al agua y saneamiento, lo cual da soporte a la necesidad de un sistema desalinizador.

---

## 6. Revisión del estado del arte

---

### 6.1. Desalinizador solar

Las investigaciones relacionadas con la desalinización de agua por medio del sol remontan incluso a mediados del IXI donde se llevó a cabo la primera investigación a gran escala sobre la desalinización del agua salada dando el origen a lo que hoy se conoce como destilador solar (Tony y Nambwey, 2024). Desde sus orígenes se ha analizado básicamente el mismo principio de funcionamiento para estos sistemas: la evaporación y condensación del agua.

Su funcionamiento consiste en que un tanque que contiene el agua salada absorbe la radiación solar que pasa a través de una cubierta transparente hacia dicho tanque, este se calienta y luego evapora el agua a través de la convección. Luego los vapores se condensan al entrar en contacto con la cubierta y son recolectadas como agua destilada, dejando como residuo las sales e impurezas en el tanque contenedor de agua salada (Martínez, 2022). El propósito de estos sistemas es replicar de manera artificial y controlada el ciclo natural del agua que pueda ser utilizada para consumo humano (Rubio, 2023).

Actualmente, la captación de energía solar para la producción de agua potable por medio de la desalinización solar ha sido de gran interés por científicos y grupos de investigación ya que puede representar la solución clave para las áreas que no cuentan con un suministro bien establecido de agua potable e infraestructura de energía. De acuerdo con el análisis bibliométrico publicado en 2024, a partir del año 2000 hasta el año 2020 se ha visto un incremento en cuanto a los documentos de investigación, artículos científicos e informes de proyectos publicados relacionados con la tecnología de desalinización solar de agua siendo en total para el año 2020 más de 1000 publicaciones, con la expectativa que esta cantidad vaya mantenga su incremento (Tony y Nambwey, 2024), lo que brinda el espacio a la continuación y desarrollo de futuros proyectos para alcancen su máximo potencial.

## 6.2. Desalinizadores solares pasivos

Los desalinizadores solares se pueden clasificar en tipos pasivos o activos. Se dará especial enfoque a los del tipo pasivo. Estos sistemas a diferencia de los del tipo activo, no emplean componentes mecánicos activos ni fuentes externas de energía, simplemente funcionan a base de la energía solar incidente y el aprovechamiento de la diferencia de temperaturas para completar el ciclo del agua. (Signorato, et. al., 2020)

Los diseños utilizados para la fabricación de destiladores solares pasivos se pueden clasificar según la geometría del diseño de la cubierta en diferentes tipos, como cubiertas de vertiente simple, vertiente doble, piramidal, esférico, escalonado, capas múltiples. (Essa, et. al., 2020)

El artículo publicado por Energy & Environmental Science (2021) determinan que un evaporador puede clasificarse por el tipo orientación en el que se coloca en el sistema. Este componente puede clasificarse como tipo *front-side* (*absorción y evaporación ocurren del mismo lado*) o *back-side* (*absorción y evaporación ocurren de lados opuestos*) (Energy & Environmental Science, 2021).

Ciertos diseños han incluido el uso de reflectores sustituyendo a los absorbedores, como una opción de bajo costo y que aumenta la concentración de la luz solar al sistema en áreas específicas, lo que incrementa el flujo de calor recibido en esta área. Se ha reportado mediante curvas comparativas que la eficiencia aumenta entre un 80 y 85 % su eficiencia al implementar reflectores a los costados del evaporador. Se ha demostrado que el uso de reflectores colocados dentro de las paredes del sistema aumenta la eficiencia en un 30 %. Se ha obtenido un incremento en la productividad en la recolección de agua destilada entre un 19 y 35.5 % al combinar tanto reflectores internos y externos. También se ha demostrado que, para un sistema de tipo escalonado, la producción de incidencia solar aumentó en un 165 % utilizando igualmente la combinación de reflectores internos y externos (Narayanan, 2020).

### 6.3. Limitaciones e indicadores de rendimiento

Tony y Nabwey (2024) definen que las variables que los diseños de desalinizadores solares pasivos deben considerar y que afectan su eficiencia significativamente. Se dividen en variables controlables y no controlables los cuales clasifican se clasifican de la siguiente manera:

Cuadro 1. Variables para considerar en diseño de desalinizadores solares pasivos

No controlables	Controlables
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condiciones climáticas</li> <li>• Radiación solar</li> <li>• Temperatura del ambiente</li> <li>• Velocidad del viento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidad del agua de suministro</li> <li>• Grosor del material de la cubierta de vidrio y el ángulo de inclinación</li> <li>• Los materiales de construcción</li> <li>• Materiales del aislamiento</li> <li>• Diferencia de temperatura entre el suministro de agua y el condensador.</li> </ul>

(Tony y Nambwey, 2024)

De acuerdo con el artículo *Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos* (Salinas, et. al., 2019) se proponen modelos matemáticos que permitieron determinar el comportamiento esperado del desalinizador los cuales establecen los siguientes parámetros para validar la funcionalidad del diseño:

- *Correlaciones para las propiedades del agua y del aire*
- *Transferencia de calor interna y externa (convección, conducción y radiación)*
- *Productividad empleando el calor de evaporación: La tasa de evaporación de agua instantánea en kg/s*
- *Productividad empleando los números adimensionales Prandtl y Grashof.*
- *Productividad empleando la radiación solar incidente, válida para niveles de radiación  $I_h$  entre 0,4 y 1,39 kW/m<sup>2</sup> y para una temperatura ambiente de 30°C, para calcular la*

*productividad instantánea*

- *Eficiencia a partir del agua evaporada*
- *Eficiencia máxima teórica a partir de la radiación solar.*

(Salinas, et. al., 2019)

De las conclusiones de este artículo se determinó que la productividad de los desalinizadores tiene límites termodinámicos definidos por la intensidad de la radiación solar incidente, los materiales de construcción, las condiciones locales de temperatura y la velocidad del viento. Adicionalmente que las pérdidas por transferencia de calor por convección, conducción, reflexión siempre estarán presentes en el sistema haciendo que la eficiencia experimental varíe entre un 30 y 50 % de la eficiencia teórica calculada. (Salinas, et. al., 2019)

Por lo que se hace la observación de que estos límites coinciden con las variables que afectan la eficiencia de los desalinizadores anteriormente mencionadas en el Cuadro 1 definidas por Tony y Nambwey en la publicación de su informe en 2024.

## 6.4. Proyectos actuales

Diferentes proyectos han analizado qué características de los desalinizadores pasivos pueden modificarse y aumentar su eficiencia en la producción de agua desalinizada al enfocarse en mejorar la configuración del evaporador, absorbedor y suministro de agua. De las cuales los siguientes prototipos han demostrado los siguientes resultados:

- En el informe de trabajo de graduación *Desalinización y purificación de agua marítima de la Costa Sur de Guatemala, por medio de la fabricación de un destilador solar* presentado por Ian Quan, considera que el material ideal para el evaporador es el aluminio por tener propiedades resistentes a la corrosión, gran capacidad de absorción y conductividad térmica, baja toxicidad y resistencia a altas temperaturas. Añade también que este debe funcionar como un absorbedor mediante la cobertura del evaporador con pintura negra para aumentar la eficiencia del sistema. En este mismo trabajo se sugiere que el suministro de agua se realice por medio de dos formas: un tanque con una

válvula de flotador añadido; un garrafón de agua en el que el flujo estaría controlado por un sello hermético o una válvula de paso.

(Quan, 2022)

- En un reciente estudio, utilizando un diseño de desalinizador térmico localizado se logró aprovechar el calor latente de la condensación mientras se recicla la masa y el calor de la evaporación que pasa por diferentes etapas en el sistema. Tres estrategias que se discutieron en este trabajo para reducir la pérdida de calor en el sistema obtenidos y mejorar el funcionamiento del evaporador de acuerdo con los resultados obtenidos son:
  - Absorbedores espectralmente seleccionados con baja emisividad infrarroja y alta absorción solar.
  - Cobertores de convección de materiales con alta transparencia y de baja conductividad térmica que reduce las pérdidas por convección
  - Reducción de la conducción térmica entre el evaporador y suministro de agua por medio de barreras que convierten la superficie de contacto en una línea de contacto.

(Zhang L, 2021)

- Estudiantes de doctorado de MIT desarrollaron un sistema de desalinización solar térmicamente localizado completamente pasivo del cual se puede extraer 1.5 galones de agua desalinizada por hora por cada metro cuadrado de área solar captada. Esta eficiencia se logró gracias al diseño de un evaporador de capas múltiples. Usualmente en otros diseños donde el flujo de calor es liberado al ambiente luego de condensar el agua; este diseño lo reutiliza en capas evaporadoras colocadas una detrás de otra aumentando la eficiencia del sistema. De este proyecto se determinó que la eficiencia en la conversión de vapor a agua es proporcional a la cantidad de etapas (capas) que conforman el evaporador. Aunque la adición de cada capa aumenta el costo y volumen de agua suministrada al sistema, el evaporador construido por este equipo alcanzó una eficiencia de

385 % en la conversión de la energía de la luz solar en energía para la evaporación del agua.

(Chandler, 2020)

- De la publicación *Experimental Assessment of Hemispherical Solar Still Design with Reflectors* (Ahmed, et. al., 2023) de una cubierta hemisférica que se fabricó con una lámina de plástico Lexan de 6 mm de grosor, con un diámetro de base de 1 m y una profundidad de 0.4 m, lo cual proporcionó un área efectiva de 0.785 m<sup>2</sup>; se obtuvieron como resultados una producción promedio diaria de 3.610 litros de agua, logrando un 11.1 % más que un destilador solar convencional cubierta de vertiente simple con un área mayor de 1 m<sup>2</sup>. Este proyecto contó con la inclusión de reflectores y no absorbedores de calor, en el que los reflectores curvos de aluminio aumentaron el rendimiento en un 5.5 %, mientras que los reflectores de mayor tamaño mejoraron la productividad en un 8 %.

(Ahmed, et. al., 2023)

- La investigación presentada por estudiantes de la Universidad de Tanta, Egipto, en el que se analiza el desarrollo de un nuevo diseño de evaporador con una superficie corrugada combinado con un colector solar invertido. Se investigaron tres distancias de paso del corrugado (5, 8 y 12 cm), diseñando dos destiladores: uno convencional (CHSD) y otro mejorado (DHSD-SCA&ISC). Se obtuvo que la configuración óptima es el evaporador con un paso de 5 cm, que produjo 9.54 L/m<sup>2</sup> diarios, mejorando en un 92.73% respecto al CHSD. Además, la eficiencia energética aumentó un 91.45 % y el costo por litro de agua se redujo en un 36%.

(E. Zayed, 2023)

- Se realizó un estudio para analizar el rendimiento de un destilador solar con una pendiente y una sola cuenca, añadiendo aletas extendidas sobre la superficie del absorbedor. Compararon el sistema modificado con el tradicional, sin aletas, bajo las mismas condiciones. Los experimentos, llevados a cabo en Mosul en octubre de 2021, mostraron que el sistema modificado alcanzó una temperatura máxima de 63 °C con una mayor productividad de agua (1.73 kg/m<sup>2</sup>), superando al sistema estándar en un 12.75 % y mejorando la producción en un 15.75 %, gracias al aumento en la transferencia de calor.

(Mohmood, et. al, 2023)

- Un grupo de investigación empleó el uso de sensores DHT11 conectado a un Arduino para medir la temperatura alcanzada dentro del sistema. Se colocó en cuatro lugares diferentes interior y exterior de condensador y cuencas de agua destilada) aplicando fibra de vidrio como material aislante. El sistema alcanzó una eficiencia energética entre el 30 % y el 45 %, y una eficiencia exergética de entre el 2 % y el 3.5 %, lo cual mostró una mejora notable en comparación con un sistema térmico. Esta mejora se debe probablemente a que el análisis térmico abarcó el sistema completo en lugar de centrarse en los componentes individuales de la unidad de desalinización.

(Radhakrishnan, 2023)

- Hillarydoss presentó una robusta película de nanoarreglo de carburo de tungsteno como material para el absorbedor del sistema, que logró captar más del 97.5 % de incidencia solar en casi todo el espectro. Diseñó y fabricó por primera vez una estructura de mojabilidad de tipo “Sandwich” la cual consiste en una capa superior hidrofóbica- hidrofílica para promover la evaporación. Este diseño ofreció una eficiencia en la conversión de energía solar a vapor del 90.8 %.

(Hillarydoss, 2023)

### 7.1. Descripción general de la metodología

El diseño y fabricación del sistema desalinizador solar pasivo se dividió en 7 etapas para su desarrollo antes de proceder con la fabricación de este, las cuales conforman la etapa de identificación de necesidades, definición de requisitos, diseño estructural del sistema, las partes del sistema, cálculos teóricos de sistema y medición de resultados experimentales,

### 7.2. Identificación de necesidades

#### 7.2.1. Necesidades de funcionamiento

Se identificó la necesidad de desarrollar un sistema de tratamiento de agua accesible, eficiente y sostenible para comunidades con acceso limitado a fuentes seguras de agua potable, particularmente en zonas rurales y costeras. El departamento de Santa Rosa, en el sur de Guatemala, fue seleccionado como sitio de aplicación del sistema de destilación solar pasivo, con base en criterios geográficos, climáticos y sociales que validan su idoneidad para este tipo de tecnologías. Esta selección se sustenta en la literatura especializada *Solar Engineering of Thermal Processes* (Duffie y Beckman, 2006) y en los estándares de evaluación del Comité ASTM E44 para tecnologías solares térmicas.

Los criterios aplicados fueron los siguientes:

- Alta radiación solar global anual: Santa Rosa se encuentra entre las regiones con mayor irradiación solar del país, con valores promedio de entre 5.2 y 6.0 kWh/m<sup>2</sup>/día, según datos del Instituto Nacional de Electrificación (INDE) y del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Esta condición favorece el rendimiento térmico de tecnologías solares pasivas, al asegurar un flujo energético constante hacia el sistema.

- Baja nubosidad relativa y temporada seca prolongada: el clima del departamento presenta una estación seca extensa, que se extiende aproximadamente de noviembre a abril. Esta característica permite una operación estable del destilador sin interrupciones frecuentes por lluvias o cielos nublados, lo que incrementa la eficiencia operativa del sistema.
- Temperaturas ambientales elevadas: las temperaturas promedio oscilan entre 26 °C y 33 °C, lo cual reduce las pérdidas térmicas por convección con el entorno y aumenta la tasa de evaporación del agua dentro del sistema, favoreciendo así su eficiencia térmica global.
- Déficit en el acceso a agua potable: de acuerdo con datos recientes, de las 659 comunidades del departamento, solo 320 cuentan con algún tipo de sistema de agua (SEGEPLAN, 2025). De estos, únicamente 22 sistemas rurales y 10 centros urbanos incluyen procesos de potabilización. Es decir, una parte significativa de la población consume agua sin garantías sanitarias. En los municipios de Taxisco y Chiquimulilla se registra una situación especialmente crítica, ya que una gran proporción de la población depende de pozos artesanales, los cuales presentan altos niveles de contaminación, especialmente durante la época lluviosa.

Debido a estas condiciones, Santa Rosa se configura como un escenario estratégico para evaluar la viabilidad técnica, eficiencia térmica y potencial de escalabilidad de sistemas solares pasivos de purificación de agua. Además, su perfil climático y social representa una oportunidad real para el desarrollo de soluciones de ingeniería aplicadas al bienestar comunitario y la gestión sostenible de recursos.

### 7.2.2. Necesidades de agua potable para consumo humano

Se identificó la necesidad de desarrollar un sistema que no solo cumpla su funcionamiento de calentar, evaporar, condensar y recolectar agua, sino que también el sistema cumpla la función de brindar agua apta para consumo humano al consumidor cumpliendo al menos uno de los estándares establecidos por la norma NTG 20091 y ASTM D1193-91. Para Guatemala, la Norma NTG 29001 establecida por la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) establece los valores de las características que definen la calidad del agua apta para consumo humano. Dicha norma se aplica a toda agua destinada al consumo humano ya sea para alimentación o uso doméstico que provenga de distintas fuentes. (COGUANOR, 2021). Define las siguientes características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano:

Cuadro 2. Características químicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano según norma NTG 29001

<b>Característica</b>	<b>LMA</b>	<b>LMP</b>
Color	5.0 u	35 u
Olor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5.0 UNT	15 UNT
Conductividad eléctrica	750 $\mu S/cm$	1500 $\mu S/cm$
Potencial de hidrógeno	7.0 - 7.5	6.5 - 8.5
Sólidos totales disueltos	500	1000

\*LMA: límite máximo admisible

\*LMP: límite máximo permisible

De acuerdo con el estándar ASTM D1193-91 utilizada para clasificar el agua pura según su nivel de pureza de acuerdo con especificaciones estándar, la muestra de agua se puede considerar agua destilada si cumple con los siguientes parámetros:

Cuadro 3. Especificaciones estándar para el Agua de calidad de reactivo Norma ASTM D1193-91 (agua destilada)

<b>Clasificación ASTM</b>	<b>Tipo IV</b>	<b>Tipo III</b>	<b>Tipo II</b>	<b>Tipo I</b>	<b>Tipo I</b>
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	< 5	< 3	< 1.0	< 1.0	< 0.5
Resistividad ( $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ )	0.2	4	1	18	18
pH a 25 °C	5 – 8	5 – 8	5 – 8	5 – 8	5 – 8
TOC ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	N/A	200	50	100	100
Sodio ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	50	10	5	1	1
Cloruros ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	50	10	5	1	1
Sílice ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	N/A	500	3	3	3

### 7.3. Definición de requisitos

Cuadro 4. Definición de códigos de identificación de requisitos

<b>Componente</b>	
Domo evaporador	<b>DE</b>
Cono condensador	<b>CC</b>
Reflector	<b>R</b>
Recolector de agua destilada	<b>REC</b>
General	<b>G</b>

<b>Clasificación</b>	
Accesibilidad	<b>ACCS</b>
Rendimiento	<b>REND</b>
Diseño	<b>DIS</b>
Mantenimiento	<b>MAN</b>
Costo	<b>COS</b>

Cuadro 5. Identificación de requisitos para diseño de prototipo de desalinización solar pasiva

CÓDIGO	REQUISITO
R-DIS01	Debe reflejar la mayor incidencia solar en la hora solar definida.
R-DIS02	Debe colocarse con una inclinación que maximice la captación de irradiancia en la ubicación puesta a funcionamiento
R-DIS03	El material reflectivo debe tener un rango de 0.8 y 0.95 de emisividad
DE-DIS01	Debe maximizar la absorción de energía térmica reflejada.
DE-DIS02	Debe distribuir uniformemente el calor sobre el agua salada.
DE-DIS03	No debe presentar deformación por expansión térmica.
DE-DIS04	El agua salada debe tener al menos 10 cm de profundidad.
CC-DIS01	Debe estar expuesto a circulación de aire exterior.
CC-DIS02	El diámetro de su base debe ser igual al diámetro del domo.
CC-DIS03	La superficie del condensador debe ser deslizante.
DE-REND01	El agua salada debe alcanzar una temperatura de al menos 40 °C para su evaporación.
DE-REND02	Debe evaporar por lo menos el 10 % del agua almacenada durante un ciclo de prueba
CC-REND01	Debe condensar la mayor cantidad posible de masa de agua evaporada.
CC-REND02	La temperatura superficial del domo debe ser de mínimo de 45 °C.
G-REND01	El agua recolectada debe cumplir con la norma NTG 20091 para conductividad eléctrica permisible en agua de consumo humano

G-REND02	El agua recolectada debe cumplir con la es estándar ASTM D1193-91 de conductividad eléctrica para clasificar el agua como agua destilada.
G-ACCS01	Debe ser montado y desmontado por una persona.
G-ACCS02	El ensamble debe constar de tornillería y roscas de fácil adquisición en ferreterías locales.
G-COS01	El costo total del sistema no debe exceder Q1,000.00.
G-DIS01	La longitud del sistema no debe exceder 1 m de extensión.
G-MAN01	Debe ser de fácil mantenimiento empleando utensilios de limpieza domésticos.
G-REND01	Las partes metálicas deben tener alta resistencia a la corrosión.
S-DIS01	El sistema completo debe estar herméticamente sellado.

## 7.4. Diseño estructural del sistema

El diseño del sistema de destilación solar pasiva se abordó en dos fases diferenciadas, con el objetivo de desarrollar un sistema eficiente, replicable y adaptable a contextos rurales con limitaciones de acceso a agua potable. Esta secuencia metodológica permite validar primero el desempeño experimental y luego extrapolar los resultados hacia un diseño funcional para uso real.

### 7.4.1. Diseño prototipo experimental

En esta primera fase se desarrollará un prototipo a escala funcional que permita observar y medir los procesos físicos involucrados en la operación del destilador solar pasivo. El objetivo es validar el comportamiento térmico del sistema, así como los principios de transferencia de calor y masa bajo condiciones controladas. Este prototipo será la base para los cálculos teóricos y pruebas de eficiencia que sustenten el diseño final.

#### 7.4.2. Diseño prototipo final

- **Diseño modular:** que facilite el transporte, ensamble y mantenimiento del sistema.
- **Diseño funcional para uso casero:** semejante a un dispensador de agua.
- **Cumplimiento de normativas sanitarias:** asegurando que los materiales sean aptos para el contacto con agua potable.
- **Diseño económico:** con bajos costos de fabricación y mantenimiento, para fomentar su adopción en comunidades de bajos ingresos.

El diseño adoptado corresponde a una combinación geométrica entre un domo semiesférico y un cono invertido piramidal. El domo permite una distribución uniforme de la radiación térmica sobre la superficie interna del sistema y recibe de forma eficiente los rayos solares reflejados por el elemento reflector. Por su parte, la geometría piramidal invertida garantiza una mayor captación solar desde diferentes ángulos sin necesidad de orientación constante hacia el sol, a diferencia de los destiladores solares convencionales inclinados. Ambas formas han demostrado mejoras en eficiencia térmica y rendimiento de producción de agua destilada en comparación con modelos de diseño inclinado tradicional (Maha A., 2024).

#### 7.5. Partes del sistema

El diseño se basó por los criterios fundamentales propuestos en *Solar Engineering of Thermal Processes* (Duffie y Beckman, 2006) y por las recomendaciones del Comité ASTM E44 para sistemas solares térmicos pasivos, entre los que destacan:

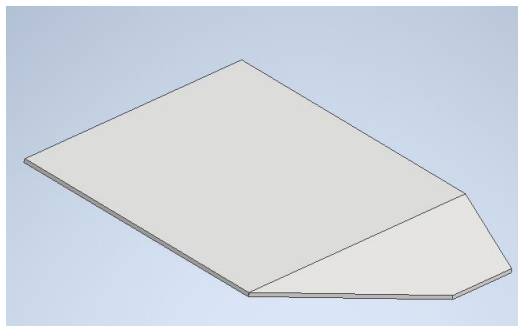
- **Alta transmisividad solar:** el uso de acrílico transparente permite una alta entrada de radiación solar directa hacia el interior del sistema.
- **Alta absorptividad y baja reflectividad:** el domo evaporador está recubierto con pintura negra mate para maximizar la absorción de energía térmica reflejada.
- **Reducción de pérdidas térmicas:** se incluye un sellado hermético entre el domo y el cono para minimizar pérdidas de calor y evitar la fuga de vapor.

- **Relación área-volumen (A/V) optimizada:** se considera la geometría adecuada para maximizar la evaporación por unidad de volumen de agua tratada.
- **Condiciones favorables para la condensación:** el cono está expuesto a la circulación de aire exterior, generando un diferencial térmico que favorece la condensación del vapor en su superficie interna, guiando las gotas hacia el recolector.
- **Selección de materiales durables y aptos para agua potable:** se emplean polímeros como PET-G (en el prototipo) y acrílico (en el diseño final), materiales con alta resistencia a la radiación UV, oxidación, humedad salina y bajas tasas de degradación térmica. Además, son compatibles con normativas de contacto con agua potable.

### 7.5.1. Reflector solar

Este componente tiene la función de captar la radiación solar directa y redirigirla hacia la superficie del domo evaporador para incrementar la temperatura del agua salada. Se seleccionó un material con alta reflectividad y de fácil manipulación para facilitar su manufactura. Se definió una geometría plana e inclinada, calculada con base en la latitud de la ubicación de prueba, el ángulo solar promedio, la hora y época del año; esto con el fin de optimizar la captación diaria de irradiancia. El diseño permite ajustar la inclinación a la que se ha calculado para adaptarse diferentes condiciones solares, facilitar al usuario su plegado y almacenamiento una vez concluidas las pruebas experimentales.

Figura 1. Diseño de reflector solar sistema desalinizador solar pasivo



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

### 7.5.2. Domo evaporador

El domo evaporador es una estructura semiesférica fabricada en acrílico transparente, destinada a contener el agua salada durante el proceso de evaporación. Una parte de su superficie exterior se recubre con pintura negra mate para incrementar la absorción térmica y favorecer la transferencia de calor hacia el interior del sistema. La geometría esférica fue seleccionada porque permite una distribución uniforme de la radiación solar reflejada, evitando concentraciones de energía en puntos sin contacto con el agua y promoviendo una evaporación homogénea en toda la superficie. El material acrílico proporciona alta resistencia térmica, estabilidad estructural y durabilidad frente a la corrosión generada por la exposición continua al agua salada y a la radiación solar

Figura 2. Domo evaporador



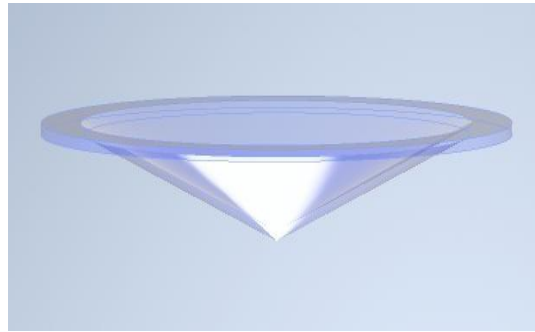
Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

### 7.5.3. Cono condensador

El cono condensador adopta una geometría piramidal invertida fabricada en acrílico transparente. Su diseño se inspira en prototipos caseros de desalinizadores solares que utilizan una lámina plástica flexible (nylon) con un peso central para canalizar las gotas de agua hacia un punto de recolección. En este caso, la estructura rígida de acrílico se seleccionó para mejorar la estabilidad, precisión geométrica y durabilidad del sistema. Su función principal es facilitar la condensación del vapor generado en el domo evaporador y conducir

las gotas de agua hacia el punto central del prototipo, donde se inicia el proceso de recolección. La superficie interna lisa permite el deslizamiento continuo del agua condensada, evitando pérdidas por adherencia y asegurando un flujo uniforme hacia el canal de recolección. Además, al ser traslúcido, el cono permite el paso de radiación solar directa, generando un efecto invernadero que mantiene la temperatura interna del sistema y mejora la eficiencia global del proceso de destilación.

Figura 3. Cono condensador de vapor de agua

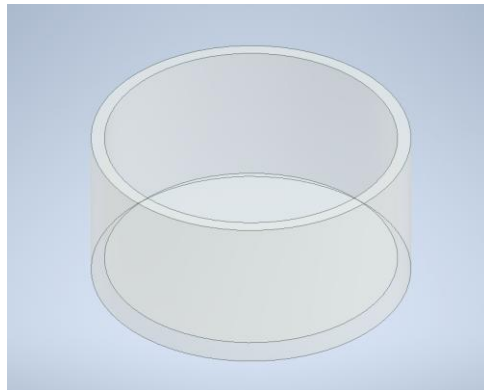


Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

#### 7.5.4. Recipiente recolector

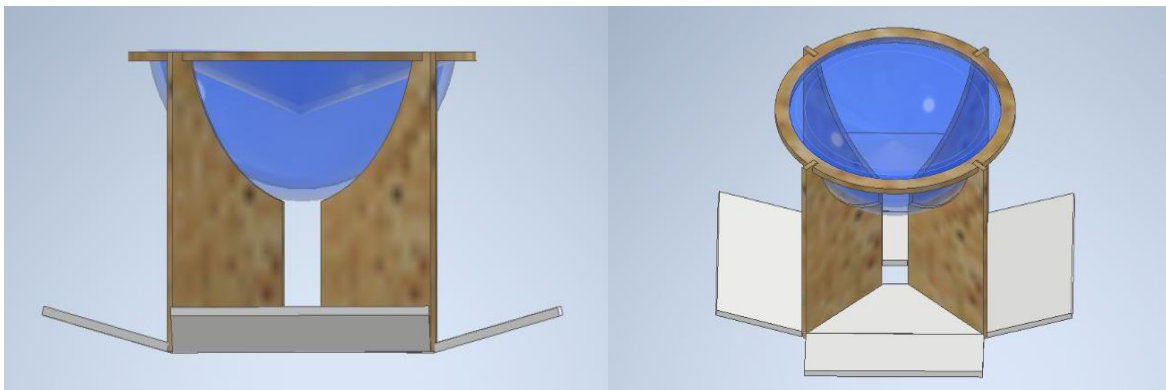
El recipiente recolector es un contenedor higiénico encargado de almacenar el agua destilada obtenida del proceso. Fue diseñado con una capacidad adecuada para contener el volumen generado en cada jornada de pruebas y permitir su utilización directa como fuente de agua potable. Su estructura hermética evita la contaminación del destilado y facilita su extracción para análisis de calidad o consumo.

Figura 4. Recipiente recolector



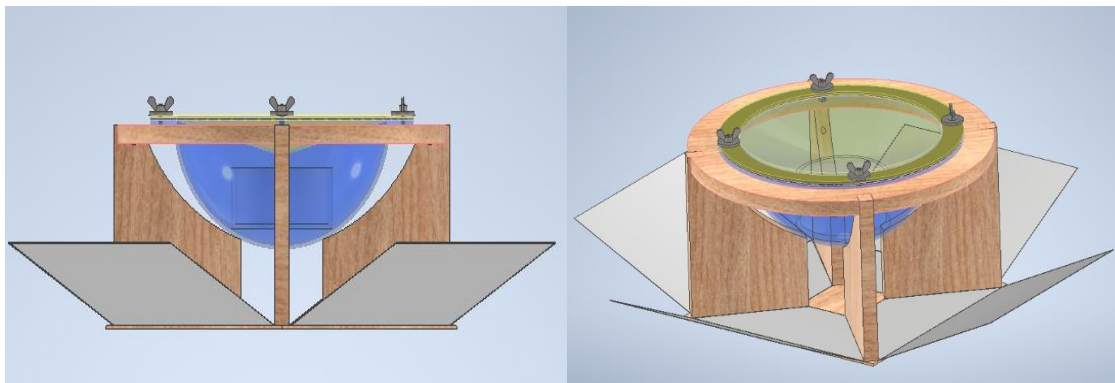
Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 5. Diseño prototipo experimental



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 6. Diseño prototipo final



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

## 7.6. Cálculos teóricos del sistema

Los análisis teóricos presentados a continuación se basan en el modelo del prototipo experimental, el cual fue diseñado a escala reducida en comparación con el prototipo final, con el fin de facilitar la validación de principios de funcionamiento y la obtención de datos preliminares para su posterior optimización. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los resultados teóricos se obtuvieron de las ecuaciones propuestas por John A. Duffie y William A. Beckman en su publicación *Solar Engineering of Thermal Processes* (2006); así como también las ecuaciones propuestas por Yunus A. Cengel y Afshin J. Ghajar en su publicación *Transferencia de calor y masa 4.ta Edición* (2013).

### 7.6.1. Captación de radiación solar

Para el diseño se tuvo contemplado el uso de reflectores planos inclinados con respecto a un ángulo específico para la cantidad de radiación que se recibe en la ubicación seleccionada. Por lo tanto, se calculó el ángulo con respecto al suelo al que se debe colocar el reflector para proyectar la mayor cantidad de irradiancia solar hacia el sistema. De acuerdo con Duffie y Beckman, la radiación total incidente sobre una superficie se puede definir como:

$$I_T = I_{T_b} + I_{T_{d,iso}} + I_{T_{d,cs}} + I_{T_{d,hz}} + I_{T_{refl}}$$

Se supuso un cielo isotrópico, lo que quiere decir que la irradiancia del cielo es uniforme en todas las direcciones del hemisferio celeste, también que hay una sola superficie horizontal, que refleja difusivamente el suelo y es largo en extensión (Duffie, Beckman, 2006).

La irradiancia total para un cielo isotrópico se determina como:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I_{\rho_s} \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

Donde:

$I_b$	Irradiancia del reflector inclinado
$R_b$	Radio de irradiancia del reflector inclinado
$I_d$	Irradiancia difusa
$\beta$	Ángulo de inclinación del reflector con respecto al suelo
$\rho_s$	Albedo

La ecuación se evaluó para un rango de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  con pasos de  $1^\circ$  para obtener  $I_T$  y de esta manera extraer el ángulo que mayor irradiancia total se proyecte en el sistema, seleccionándolo como el ángulo óptimo de inclinación del reflector, siendo  $0^\circ$  la posición completamente horizontal y  $90^\circ$  completamente vertical.

Santa Rosa posee una latitud  $\phi = 14^\circ$  y de acuerdo con los datos proporcionados por Global Solar Atlas, para el mes de abril la concentración de irradiancia solar directa se obtiene entre las 11:00 am y 12:00 pm con un valor de 606 Wh/m<sup>2</sup>, por lo que se utilizó este bloque de una hora para definir el ángulo horario solar.

Para la obtención de la Irradiancia difusa en el reflector, se empleó la correlación The Erbs (ecuación 2.10.1) (Duffie y Beckman, 2006):

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0.09k_t & k_t \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_t + 4.388k_t^2 - 16.63k_t^3 + 12.336k_t^4 & 0.22 \leq k_t \leq 0.80 \\ 0.165 & k_t > 0.80 \end{cases}$$

Donde  $k_t$  representa el índice de claridad horaria, la cual se obtuvo por medio de la relación (ecuación 2.9.3) (Duffie y Beckman, 2006):

$$k_t = \frac{I}{I_o}$$

Duffie y Beckman utilizan un valor de albedo aproximadamente de 0.2 como valor típico de referencia de práctica de problemas de ingeniería, por lo que se emplea este mismo valor para los cálculos. Se empleó un valor para la irradiancia solar sobre la atmósfera de la tierra ( $G_{sc}$ ) de 1367 W/m<sup>2</sup> definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

El valor de la radiación extraterrestre en una superficie horizontal para el período de una hora ( $I_o$ ) se obtuvo a través de la ecuación 1.10.4 (Duffie y Beckman, 2006):

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) * \left\{ \cos \phi \sin \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right\}$$

Donde los ángulos solares se obtuvieron como:

$$\omega_1 = 15^\circ (HTS1 - 12)$$

$$\omega_2 = 15^\circ (HTS2 - 12)$$

Donde:

$$HTS1 = \text{hora solar } 11 \text{ am}$$

$$HTS2 = \text{hora solar } 12 \text{ pm}$$

Del Cuadro 1.6.1 para fechas y valores recomendados de  $n$  y  $\delta$  (Duffie y Beckman, 2006) se obtuvieron del mes de abril los siguientes datos:

Cuadro 6. Valores de  $n$  y  $\delta$  obtenidos de Cuadro 1.6.1 de Duffie y Beckman correspondientes al mes de abril para obtención de radiación extraterrestre en superficie de reflector.

Mes	Fecha promedio	n	$\delta$
abril	15	105	9.4

Por lo tanto, la radiación extraterrestre en una superficie del reflector es la siguiente:

$$I_o = \frac{12 * 3600}{\pi} (1367) \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360(105)}{365} \right) * \left\{ \cos(14^\circ) \sin(9.4^\circ) * (\sin(0^\circ) - \sin(-15^\circ)) + \frac{\pi(\sin(0^\circ) - \sin(-15^\circ))}{180} \sin(14^\circ) \sin \right\}$$

$$I_o = 4.80 * 10^6 \frac{J}{m^2} \approx 1337.78 \text{ Wh}/m^2$$

$$k_t = 1.38 \frac{Wh}{m^2}$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.165 \quad (k_t > 0.80)$$

$$I_d = 99.92 \frac{Wh}{m^2}$$

La radiación proveniente del reflector se calculó como:

$$I_b = DNI * \cos \theta_z$$

Donde:

*DNI = Radiación solar directa en intervalo de 11 am – 12 pm (Global solar Atlas)*

*$\theta_z$  = Ángulo Cenital*

El ángulo cenital  $\theta_z$  se obtiene como:

$$\cos\theta_z = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\omega$$

Donde:

$$\omega = 15^\circ (11.5-12)$$

$$\omega = -7.5^\circ$$

$$\cos\theta_z = 0.9885$$

El valor de 11.5 es el valor intermedio entre el límite mínimo de horario solar (11 am) y el máximo (12 pm).

El radio de irradiancia del reflector inclinado se obtuvo utilizando la relación de la ecuación 1.81 (Duffie y Beckman, 2006):

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$$

$\theta$  es el ángulo de incidencia que se da entre la irradiancia del reflector en una superficie y la normal a esa superficie, la cual se obtuvo mediante:

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

Se observa que  $\cos\theta$  está en función del ángulo  $\beta$ , el cual es el ángulo de interés que se desea obtener, por lo tanto, este valor también iteró para obtener su valor.

$$I_b = 599.304 \text{ Wh/m}^2$$

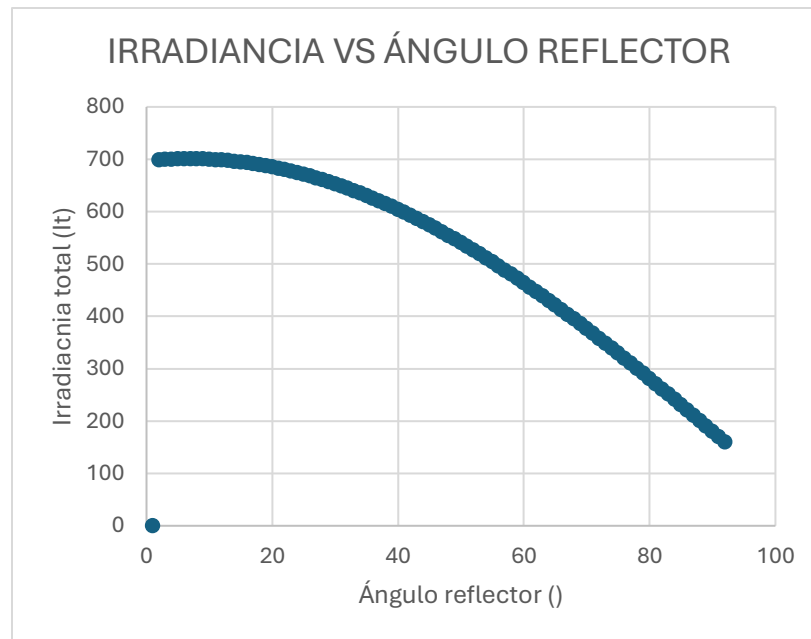
$$I_d = 99.92 \text{ Wh/m}^2$$

$$I = 606 \text{ Wh/m}^2$$

$$\rho_s = 0.2$$

$$R_b = \text{Datos iterados de 11 am a 12 pm}$$

Figura 7. Irradiancia solar reflejada por superficie en relación al ángulo de inclinación del reflector



Fuente: elaboración propia

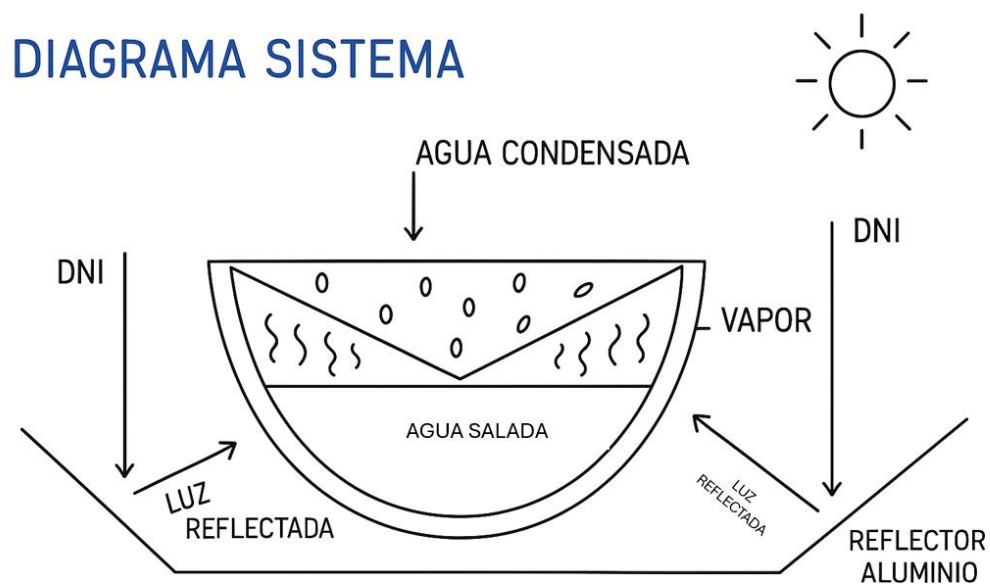
Del análisis de los datos iterados se determinó que, para la latitud del departamento de Santa Rosa y la estimación de irradiación solar directa en la región, el ángulo que permite obtener la mayor irradiación solar reflejada hacia la superficie del domo proveniente del reflector de aluminio debe ser inferior a  $10^\circ$ . En particular, se identificó que una inclinación de  $5^\circ$  proporciona el máximo aprovechamiento de irradiación solar reflejada sobre la superficie del sistema.

### 7.6.2. Análisis funcionamiento del sistema

El sistema de desalinización solar pasivo consta del calentamiento del agua salada por medio de la irradiación solar directa del sol que es reflejado hacia el domo por medio de los reflectores. De esta manera se eleva la temperatura del agua hasta el cambio de fase de líquido a vapor. El vapor se eleva hasta entrar en contacto con la superficie del cono a menor temperatura que la masa de vapor, haciendo que este cambie de fase de vapor a líquido. La

Figura 8 muestra el funcionamiento general del sistema y los componentes involucrados

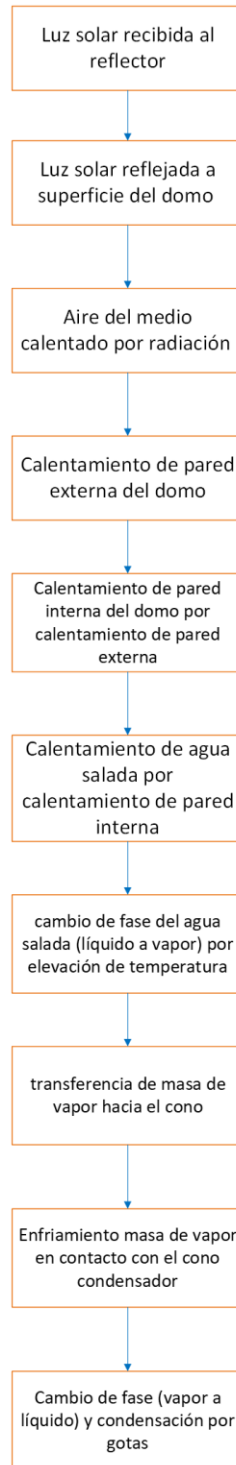
Figura 8. Esquema del funcionamiento general del sistema



Fuente: elaboración propia

Para determinar los mecanismos de transferencia de calor involucrados en el funcionamiento del sistema, se realizó el flujo del proceso del sistema completo partiendo desde que se recibe la luz solar directa a la superficie del reflector hasta que se condensa la masa de vapor como se muestra en la Figura 9:

Figura 9. Secuencia de procesos térmicos y de transferencia de masa en el sistema desalinizador solar pasivo



Fuente: elaboración propia

### 7.6.3. Transferencia de calor

Del análisis del diagrama de flujo de la Figura 9, se determinaron los siguientes mecanismos de transferencia de calor y que ocurren dentro del sistema:

- **Transferencia por radiación:** de la irradiancia solar directa recibida de la fuente de energía, en este caso el sol, a la superficie del reflector
- **Transferencia por radiación hacia una superficie:** de la luz solar reflejada del sol proveniente de la superficie del reflector de aluminio hacia superficie externa del domo evaporador
- **Transferencia de calor por convección con efectos de radiación:** considerando el calentamiento del aire del medio que se encuentra en el espacio entre el reflector y la superficie externa del domo evaporador
- **Transferencia por conducción:** de la pared externa hacia la pared interna del domo evaporador que se encuentra en contacto con el volumen de agua salada.

Cuadro 7. Ecuaciones de transferencia de calor

Mecanismo	Ecuación	Variables
Radiación de luz solar directa a superficie de reflector	$G(t) = \alpha_{ref} * \sigma * T_{sref}^4$	$\alpha_{ref}$ ... Absortancia del reflector $\sigma$ ... Constante Stefan – Boltzmann $T_{sref}$ ... Temperatura superficial reflector
Radiación hacia una superficie	$Q_{rad} = \epsilon_{ref} * \sigma * (T_{sref}^4 - T_{alrd}^4)$	$\epsilon_{ref}$ ... emisividad reflector $\sigma$ ... Constante Stefan – Boltzmann $T_{sref}$ ... Temperatura superficial reflector $T_{alrd}$ ... Temperatura del aire del medio

Convección con efectos de radiación

$$\dot{Q}_{conv} = h_{comb} * (T_{sdomo} - T_{alrd})$$

$h_{comb}$  ... Coeficiente de convección combinado (efectos de radiación)  
 $T_{sdomo}$  ... Temperatura superficial domo evaporador  
 $T_{alrd}$  ... Temperatura del aire del medio

Conducción paredes domo evaporador

$$\dot{Q}_{cond} = -k_m * \frac{(T_{sdomo} - T_{aguaS})}{\Delta x}$$

$k_{acrilico}$  ... Conductividad térmica del material  
 $T_{sdomo}$  ... Temperatura superficial domo evaporador  
 $T_{aguaS}$  ... Temperatura inicial agua salada  
 $\Delta x$  ... Grosor de pared domo evaporador

El reflector solar de aluminio estará bajo la irradiancia solar directa, la cual varía con el tiempo en que el sistema se pondrá en funcionamiento. Por lo que la temperatura que alcanzará la superficie del reflector en un momento específico se obtiene como:

$$T_{srefl} = \sqrt[4]{\frac{G(t) * \alpha_{ref}}{\epsilon_{ref} * \sigma}}$$

Se trabaja la superficie del reflector como una superficie gris, lo cual quiere decir que la superficie no es transparente sino es emisora y reflectoras, por lo que las propiedades relativas a la radiación son independientes de la longitud de onda. (Cengel, 2013). También se considera que la superficie es isotérmica, por lo que la radiación isotérmica entrante como saliente son constantes en toda la superficie.

La transferencia neta de calor por radiación hacia la superficie del reflector o desde ella se expresa como:

$$\dot{Q}_{sref} = \text{(Radiación que sale de toda la superficie del reflector)} - \text{(Radiación que sale de toda la superficie del reflector)}$$

$$\dot{Q}_{sref} =$$

$$\dot{Q}_{sref} = \frac{E_{bsref} - J_{sref}}{R_{sref}}$$

Cuadro 8. Ecuaciones para determinar la transferencia de calor por radiación de la superficie del reflector hacia la superficie externa del domo evaporador.

Variable	Ecuación	Variables
Poder de emisión de un cuerpo negro	$E_{bsref} = \sigma * T_{sref}^4$	$\sigma$ ... Constante Stefan – Boltzmann $T_{sref}$ ... Temperatura superficial reflector
Radiosidad	$J_{sref} = \epsilon_{ref} * E_{bsref} + (1 - \epsilon_{ref}) * G(t)$	$\epsilon_{ref}$ ... Emisividad reflector $G(t)$ ... Irradiancia solar directa
Resistencia de la superficie a la radiación	$R_{sref} = \frac{1 - \epsilon_{ref}}{A_{sref} * \epsilon_{ref}}$	$\epsilon_{ref}$ ... Emisividad reflector $A_{sref}$ ... Área superficial reflector

El aire del medio eleva su temperatura por el aumento de la radiación local en la zona del domo debido al reflector, por lo que para obtener la temperatura de los alrededores de acuerdo con la cantidad de irradiancia solar reflejada por el reflector se resuelve la ecuación de radiación hacia una superficie mostrada en el Cuadro 7 como:

$$T_{alrd} = \sqrt[4]{\frac{\dot{Q}_{sref}}{\epsilon_{ref} * \sigma} - T_{sref}}$$

Tomando en cuenta que la irradiancia solar reflejada por los reflectores se encuentra rodeado de un gas que es el aire circundante, el balance de transferencia de calor total a la superficie del domo evaporador está dada por la suma de transferencia de calor por convección y radiación. Por lo que se simplifica la ecuación mediante la definición de un coeficiente de convección combinado, el cual incluye los efectos de la radiación y la convección (Cengel, 2013).

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}$$

$$\dot{Q}_T = h_{comb} * (T_{sdomo} - T_{alrd})$$

$$h_{comb} = h_{conv} - \varepsilon_{pn} * \sigma * (T_{sdomo} - T_{alrd}) * (T_{sdomo}^4 - T_{alrd}^4)$$

Donde:

$$h_{conv} \dots \text{Coeficiente de convección del aire circundante}$$

$$\varepsilon_{pn} \dots \text{Emisividad de la pintura negra mate}$$

A la ecuación de transferencia total de calor  $\dot{Q}_T$  se añadió los efectos de la radiación directa del reflector sobre el domo, el cual lo constituye una interacción de superficies difusas y grises enfrentadas. También se agrega la absorción solar directa sobre el domo considerando tanto la irradiancia solar incidente como el efecto de concentración del reflector, expresado mediante un factor  $C_f$  (Cengel, 2013), por lo que el balance de transferencia de calor se expresa como:

$$\dot{Q}_T = -\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{rad,ref \rightarrow domo} + \dot{Q}_{solar}$$

$$\dot{Q}_T = h_{comb} * (T_{sdomo} - T_{alrd}) + F_{ref \rightarrow domo} * \varepsilon_{pn} * \sigma * (T_{sref}^4 - T_{sdomo}^4) + \alpha * C_f * G(t)$$

Para determinar la temperatura superficial de la pared externa de domo evaporador, se despeja la ecuación del mecanismo de transferencia de calor por conducción mostrado en el Cuadro 8 resolviendo para la temperatura superficial del domo.

$$T_{sdomo} = -\frac{\dot{Q}_T * \Delta x}{k} + T_{aguas}$$

$$T_{sdomo} = \frac{[h_{conv}(T_{sdomo} - T_{alrd}) + \varepsilon_{pn}\sigma(T_{sdomo}^4 - T_{alrd}^4) + F_{,ref \rightarrow domo} * \varepsilon_{pn}\sigma(T_{sref}^4 - T_{sdomo}^4) + \alpha C_f G(t)] * \Delta x}{k} + T_{aguas}$$

Cuadro 9. Datos de variables empleadas en cálculos teóricos de transferencia de calor

Variable	Magnitud	Dimensional
$\alpha_{pn}$	0.97	
$\alpha_{ref}$	0.07	
$\sigma$	$5.67 * 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup>
$\varepsilon_{ref}$	0.07	
$\varepsilon_{pn}$	0.97	
$A_{sref}$	0.0566	m <sup>2</sup>
$k_{acrílico}$	0.2	W/m·K
$k_{petG}$	0.19	
$A_{sdomoprueba}$	0.002091	m <sup>2</sup>
$A_{sdomofinal}$	0.01257	m <sup>2</sup>
$T_{aguas}$	40	°C
$\Delta x_{prueba}$	0.00381	m
$\Delta x_{final}$		m
$h_{conv}$	3.5	W/m <sup>2</sup> ·K
$\varepsilon_{pinturanegra}$	0.85	

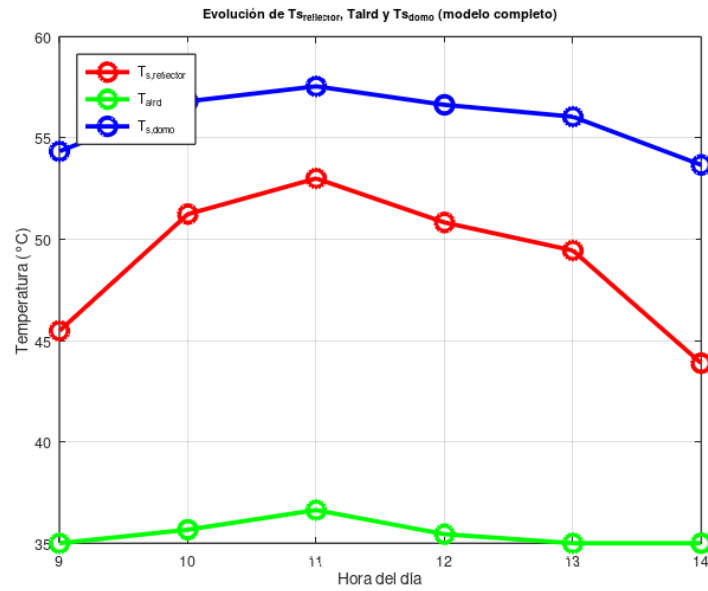
Se utilizaron nuevamente los datos registrados de irradiancia solar directa  $G(t)$  para el departamento de Santa Rosa (Anexo 1) para los cálculos del ángulo de inclinación del reflector. Se empleó la herramienta de GNU Octave para obtener los resultados teóricos para el rango de valores de irradiancia solar directa y horario solar de funcionamiento. El código utilizado se presenta en el Anexo 4.

El resultado del código muestra una tabulación con la irradiancia solar directa, temperatura superficial del reflector, de los alrededores y de la pared externa del domo correspondientes al rango de las horas analizadas.

Cuadro 10. Resultados de temperaturas teóricas prototipo prueba en mes de abril, ubicado en Santa Rosa

Horario solar	$I$ ( $W/m^2$ )	$T_{sref}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{alrd}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{s,domo}$ ( $^{\circ}C$ )
09:00	552	45.48	35	54.34
10:00	593	51.24	35.67	56.81
11:00	606	53	36.64	57.55
12:00	590	50.83	35.44	56.64
13:00	580	49.45	35	56.05
14:00	541	43.88	35	53.67

Figura 10. Variación de temperaturas según horario solar analizado para sistema prototipo prueba en mes de abril, ubicado en Santa Rosa

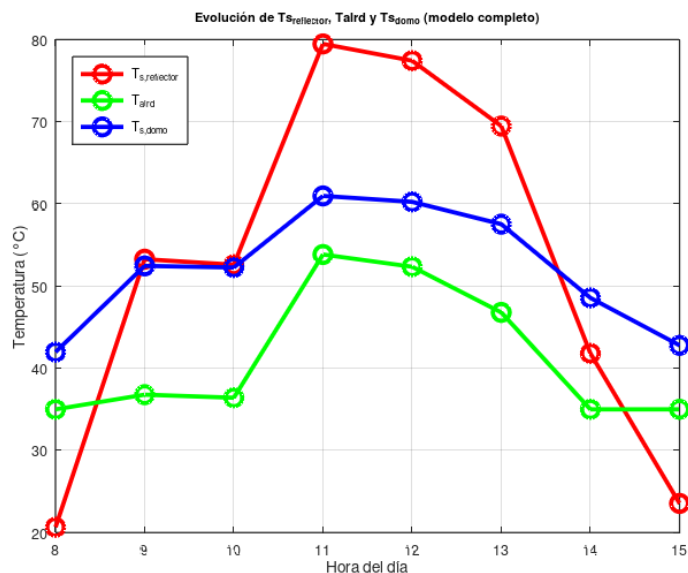


Fuente: elaboración propia

Cuadro 11. Resultados de temperaturas teóricas prototipo final en mes de octubre, ubicado en Mixco, Guatemala

Horario solar	$I$ ( $W/m^2$ )	$T_{sref}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{alrd}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{s,domo}$ ( $^{\circ}C$ )
08:00	399	20.65	35	41.97
09:00	608	53.27	36.79	52.46
10:00	603	52.6	36.41	54.26
11:00	828	79.47	53.84	60.97
12:00	809	77.43	52.36	60.25
13:00	738	69.47	46.79	57.54
14:00	527	41.81	35	48.56
15:00	415	23.55	35	42.79

Figura 11. Variación de temperaturas según horario solar analizado para sistema prototipo final



Fuente: elaboración propia

#### 7.6.4. Evaporación del agua salada

Para esta subfunción del sistema (correspondiente al proceso de evaporación) se desarrolló un análisis de transferencia simultánea de calor y masa, dado que el cambio de fase del agua salada a vapor implica el transporte de masa acompañado del intercambio energético correspondiente al calor latente de vaporización. Ambos fenómenos, por su naturaleza, ocurren de forma acoplada y simultánea, afectando directamente la eficiencia térmica del sistema. Se planteó el balance de energía en procesos de evaporación mediante la siguiente relación general:

$$\dot{Q}_{sensible,transferido} = \dot{Q}_{latente,absorbido}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}h_{fg}$$

En donde  $\dot{Q}$  representa todas formas de calor de todas las fuentes transferido a la superficie. (Cengel, 2013). Aplicando la analogía de Chilton-Colburn se determinó la razón de evaporación para el valor  $\dot{m}$  escribiendo la fórmula de la siguiente forma:

$$\dot{m} = \frac{h_{conv} * A_s * h_{hfg}}{c_p Le^{\frac{2}{3}}} * \frac{M_v}{M} * \frac{(P_{v,s} - P_{v,alrd})}{P}$$

$$\dot{Q}_{masa} = \left( \frac{h_{conv} * A_s * h_{hfg}}{c_p Le^{\frac{2}{3}}} * \frac{M_v}{M} * \frac{(P_{v,s} - P_{v,alrd})}{P} \right) * h_{fg}$$

$$\dot{Q}_{masa} = \frac{h_{conv} * A_s * h_{hfg}^2}{c_p Le^{\frac{2}{3}}} * \frac{M_v}{M} * \frac{(P_{v,s} - P_{v,alrd})}{P}$$

Donde:

$h_{conv}$  ... *coeficiente de convección del aire*

$A_s$  ... *área superficial*

$h_{hfg}$  ... *calor latente de evaporación del agua*

$c_p$  ... *calor específico del aire*

$Le$  ... *número de Lewis*

$M_v$  ... *masa molar del agua*

$M$  ... *masa molar del aire*

$P_{v,s}$  ... *presión de vapor de saturación en la superficie del  
agua (función de  $T_s$ )*

$P_{v,alrd}$  ... *presión parcial de vapor en el aire (función de  
 $T_{reflector}$ )*

$P$  ... *presión del aire a 1 atm*

Cuadro 12. Datos para cálculo de  $\dot{Q}$

<b>Variable</b>	<b>Dimensional</b>	<b>Valor</b>
$h_{hfg}$	$kJ/kg$	2407
$h_{conv}$	$W/m^2 * K$	3.5
$A_{sprueba}$	$m^2$	0.002091
$A_{sfinal}$	$m^2$	0.02091
$c_p$	$(kJ/kg) * K$	1007
$L_e$	Adimensional	0.86
$M_v$	$kg/kmol$	18.015
$M$	$kg/kmol$	28.97
$P$	$kPa$	101.3

\*Datos obtenidos de tablas A-1, A-9,A-15,14-14 del libro *Transferencia de calor y masa 4.ed*, (Cengel, 2013).

Cuadro 13. Presiones correspondientes a  $T_{alrd}$  y  $T_s$  (análisis prototipo prueba)

$T_{alrd}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$P_{v,alrd}$ (kPa)	$P_{v,s}$ (kPa)
35	54.34	4.2712	54.340
35.67	56.81	4.4308	56.810
36.64	57.55	4.6816	57.550
35.44	56.64	4.3624	56.640
35	56.05	4.2712	56.050
35	53.67	4.2712	53.670
35	54.34	4.2712	54.340

\*Datos obtenidos de tablas A-9 del libro *Transferencia de calor y masa 4.ed*, (Cengel, 2013).

Cuadro 14. Presiones correspondientes a  $T_{alrd}$  y  $T_s$  (análisis prototipo final)

$T_{alrd}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$P_{v,alrd}$ (kPa)	$P_{v,s}$ (kPa)
35	41.97	4.9456	8.07
36.79	52.46	5.4824	12.33
36.41	52.26	5.3592	12.2
53.84	60.97	11.4048	19.87
52.36	60.25	10.7184	19.16
46.79	67.54	8.3512	15.93
35	48.56	4.9456	10.07

\*Datos obtenidos de tablas A-9 del libro *Transferencia de calor y masa 4.ed.*, (Cengel, 2013).

Cuadro 15. Transferencia teórica de calor por convección y razón de evaporación durante horario solar (diseño prototipo prueba)

Hora solar	$I$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{alrd}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$\dot{Q}_{conv}$ (W)	$\dot{m}$ (g/h)
9.00	552	35	55.08	10.86	16.24
10.00	593	35.67	57.96	11.45	17.13
11.00	606	36.64	58.87	11.84	17.71
12.00	590	35.44	57.75	10.84	16.22
13.00	580	35	57.05	11.59	17.34
14.00	541	35	54.31	10.80	16.15

Cuadro 16. Transferencia teórica de calor por convección y razón de evaporación durante horario solar (diseño prototipo final)

<b>Hora solar</b>	<b><math>I</math> (<math>W/m^2</math>)</b>	<b><math>T_{alrd}</math> (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b><math>T_s</math> (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b><math>\dot{Q}_{conv}</math> (<math>W</math>)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (<math>g/h</math>)</b>
8:00	518	40.46	35	48.1	518
9:00	543	44.18	35	49.39	543
10:00	549	45.05	35	49.7	549
11:00	537	43.29	35	49.08	537
12:00	527	41.81	35	48.56	527
13:00	521	40.91	35	48.25	521
14:00	495	36.92	35	46.91	495
15:00	446	28.94	35	44.3	446

Cuadro 17. Potencial de masa teórica total evaporada en el sistema para prototipo prueba y prototipo final

<b>Magnitud</b>	<b>Valor</b>	<b>Dimensional</b>	<b>Período tiempo</b>
Masa de vapor prototipo prueba	100.79	$g$	6 horas
Masa de vapor prototipo final	190.14	$g$	8 horas

#### 7.6.5. Eficiencia del sistema

La eficiencia térmica de un sistema de desalinización solar pasivo se expresa como la relación entre la energía útil obtenida por evaporación y la energía solar incidente sobre la superficie del dispositivo. Según el planteamiento en *Solar Engineering of Thermal Processes* (Duffie y Beckman, 2006), la eficiencia general de un colector solar se define como:

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{in}}$$

Donde  $Q_{util}$  representa la energía aprovechada por el sistema y  $Q_{in}$  la energía solar total incidente. En el caso de los destiladores solares pasivos, el proceso útil no es la transferencia de calor a un fluido de trabajo, sino la evaporación del agua contenida en la cámara del domo. Por lo tanto, la energía útil se asocia directamente con el calor latente de evaporación del agua, y la ecuación se adapta como:

$$\eta = \frac{m * h_{fg}}{A_s * G(t)}$$

Donde:

$m$  ... masa total de agua evaporada

$h_{fg}$  ... calor latente de evaporación del agua

$A_s$  ... Area superficial colectora

$G(t)$  ... Irradiancia solar directa promedio

Cuadro 18. Valores para cálculo de eficiencia de sistema prototipo prueba y prototipo final

<b>Magnitud</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Dimensional</b>
Masa de vapor prototipo prueba	$m$	15	$g$
Masa de vapor prototipo final	$m$	400	$g$
DNI promedio abril, Santa Rosa	$G(t)$	577	$W/m^2$
DNI promedio octubre, Ciudad Guatemala	$G(t)$	615.88	$W/m^2$

Cuadro 19. Eficiencia teórica del sistema prototipo de prueba y final

Magnitud	Valor
Prototipo prueba	12.64 %
Prototipo final	36.73 %

#### 7.6.6. Prueba salinidad del agua

Se realizará una prueba de conductividad eléctrica tanto al agua salada contenida en el domo evaporador como al agua destilada recolectada. Con esta prueba se identificará la cantidad de concentración de sal en las muestras de agua, ya que cuando el cloruro de sodio se mezcla con agua, este se disocia en iones, los cuales dependiendo de su concentración dará una medición de conductividad. (Xylem, 2025).

Se empleará un multímetro digital para tomar las mediciones de resistencia de las muestras de agua, de manera que se pueda obtener la conductividad eléctrica, la cual es la relación entre la corriente de un conductor y la diferencia del potencial eléctrico o voltaje entre los electrodos. La cual se define como el inverso de la resistividad (Xylem, 2025):

$$\sigma = \frac{L}{R * A}$$

Donde:

*L ... Distancia entre electrodos*

*R ... Resistencia medida en multímetro ( $\Omega$ )*

*A ... Área transversal del electrodo*

Sin embargo, para líquidos los valores de conductividad tienden a ser bajos por lo que frecuentemente se utiliza la unidad principal de conductividad eléctrica Siemens por metro (S/m), que cuantifica la facilidad con la que fluye la electricidad a través de un material. (Sensorex, 2025). Por lo que se calculará la conductancia eléctrica empleando la fórmula simplificada y estandarizada:

$$\sigma = \frac{1000000 \mu S/cm}{R}$$

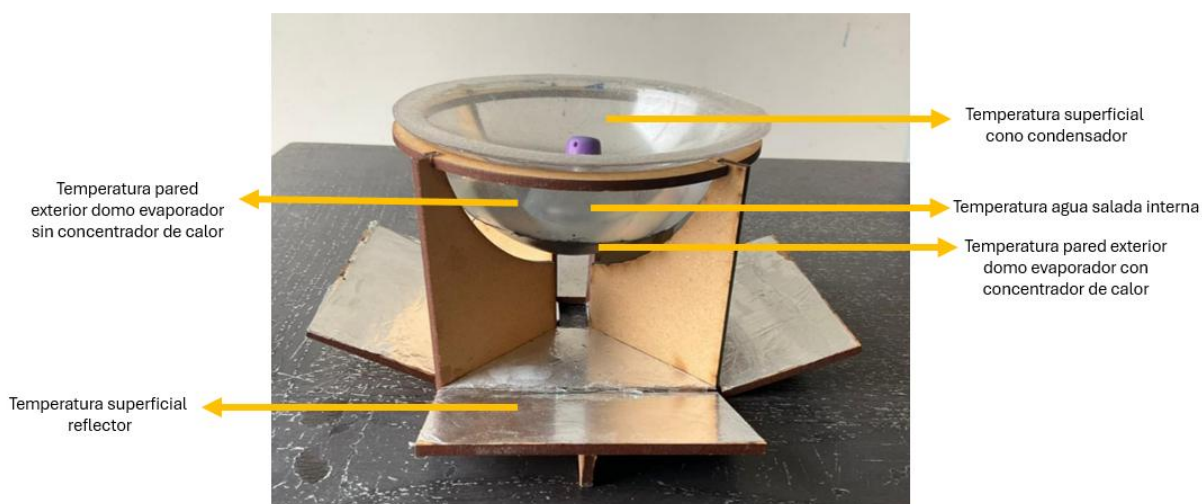
Al obtener el valor de conductancia de ambas muestras, se compararán entre sí para verificar si hubo un cambio significativo en la salinidad el agua recolectada con el agua salada colocada en el domo evaporador. También se verificará si estos valores cumplen o no con los parámetros permisibles establecidos para la característica de conductividad del agua por la norma NTG 20091.

## 7.7. Medición de resultados experimentales

### 7.7.1. Identificación de zonas para medición de temperaturas experimentales

Para la medición de los resultados experimentales se establecieron las zonas de medición de temperatura mostradas en la Figura 12, aplicables tanto al prototipo de prueba como al prototipo final. Estas zonas fueron definidas porque permiten evaluar los parámetros de funcionalidad del sistema en su conjunto, así como determinar los límites máximos y mínimos alcanzados por el mismo durante el periodo de ensayo solar, en relación con la cantidad de masa recolectada. Además, al clasificar las mediciones en estas zonas, es posible observar las distintas formas en que el calor se concentra y cómo se distribuye entre los diferentes componentes del sistema de acuerdo con la geometría de su diseño.

Figura 12. Zonas de medición de temperaturas



Fuente: elaboración propia

### **Temperatura superficial cono condensador**

Se realiza esta medición con el propósito de determinar si la temperatura alcanzada en la superficie expuesta al exterior (base del cono) influye en la generación de gotas condensadas en la superficie interna (punta del cono), donde ocurre el contacto con el vapor. A través de esta medición se obtiene el diferencial de temperatura necesario para que la condensación tenga lugar dentro del ciclo de operación del sistema.

### **Temperatura pared exterior domo evaporador (sin concentrador de calor)**

Se mide esta zona con el objetivo de determinar la temperatura alcanzada por la pared de acrílico translúcido y evaluar si existe una diferencia significativa respecto a la temperatura registrada en la zona que cuenta con pintura negra mate.

### **Temperatura pared exterior domo evaporador (con concentrador de calor)**

Se mide esta zona con el propósito de determinar la temperatura alcanzada por la pared de acrílico recubierta con pintura negra mate y evaluar si existe una diferencia significativa respecto a la temperatura registrada en la zona que no posee dicho recubrimiento. Además,

se busca identificar la temperatura máxima alcanzada, con el fin de analizar el efecto térmico sobre la superficie externa del domo. Este valor se comparará con el resultado teórico obtenido de la temperatura superficial para validar el modelo planteado.

### **Temperatura superficial reflector**

Se mide esta zona para determinar la temperatura que alcanza el reflector bajo la acción de la irradiancia solar directa, así como la temperatura que irradia hacia el domo evaporador. Estos valores se compararán con el resultado teórico de la temperatura ambiental estimada, con el objetivo de analizar la eficiencia térmica del reflector y su aporte al proceso de evaporación.

### **Temperatura del agua salada interna**

Se mide esta temperatura con el objetivo de determinar el nivel térmico al que el agua salada está siendo calentada para generar el vapor necesario en el proceso de evaporación.

## 7.7.2. Instrumentos de medición

### **Termómetro de cocina**

Este instrumento se utilizó para medir la temperatura del agua salada contenida dentro del domo evaporador para las pruebas realizadas en el prototipo de prueba. Su funcionamiento se basa en un sensor metálico que reacciona rápidamente a los cambios de temperatura, permitiendo lecturas directas en grados Fahrenheit. Aunque no cuenta con registro digital de datos, ofrece una medición práctica y confiable para comparar variaciones térmicas durante las pruebas experimentales.

Figura 13. Termómetro de cocina empleado en mediciones de temperatura del agua salada



Fuente: elaboración propia

### **Termómetro electrónico para líquidos con sonda**

Se empleó este dispositivo para medir con mayor precisión la temperatura del agua salada dentro del domo evaporador en el prototipo final. Está compuesto por una sonda metálica sumergible conectada a un sensor digital que convierte la señal térmica en lectura electrónica. Su ventaja principal es la rapidez de respuesta y su capacidad para registrar temperaturas en medios líquidos con una precisión de  $\pm 0.1$  °C, lo que facilitó evaluar las temperaturas obtenidas con mayor exactitud y accesibilidad al interior del prototipo.

Figura 14. Termómetro electrónico para líquidos con sonda empleado para mediciones de temperatura de agua salada



Fuente: elaboración propia

### **Cámara termográfica Fluke**

La cámara termográfica Fluke se utilizó para obtener imágenes térmicas superficiales de las distintas zonas clasificadas. Este instrumento detecta la radiación infrarroja emitida por los cuerpos y la convierte en un mapa de colores que representa la distribución de temperatura. Su uso permitió identificar zonas de mayor concentración térmica, pérdidas de calor y diferenciales entre áreas recubiertas y no recubiertas con pintura negra mate. Además, facilitó la validación visual de la transferencia de calor y del comportamiento térmico general del sistema desalinizador.

Figura 15. Cámara termográfica Fluke empleada en mediciones de temperatura en las zonas del sistema



Fuente: elaboración propia

### **Jeringa de 5 ml**

Se utilizó una jeringa de 5 mililitros para medir con precisión la cantidad de agua destilada recolectada al finalizar cada prueba experimental. Su escala graduada permitió obtener volúmenes exactos y repetibles, fundamentales para calcular la tasa de producción diaria y la eficiencia del sistema en la generación de agua destilada.

Figura 16. Jeringa de 5 ml empleada para medición de volumen de agua salada recolectada



Fuente: elaboración propia

### Jarra volumétrica

La jarra volumétrica fue utilizada para medir el volumen inicial de agua salada colocado dentro del evaporador al inicio de la prueba y para recolectar el agua salada restante al finalizar el ensayo. Este instrumento permitió cuantificar con exactitud el volumen total de líquido involucrado en el proceso, asegurando la coherencia entre las mediciones de entrada y salida necesarias para el balance de masa y el cálculo del rendimiento del desalinizador solar.

Figura 17. Jarra volumétrica para medición de volumen de agua salada.



Fuente: elaboración propia

### Multímetro digital UNI-T UT33D

Se empleó el multímetro digital para realizar las mediciones de resistencia de las muestras de agua salada y destilada en ohmios, ya que con esta medida se puede calcular la conductividad eléctrica de las muestras y determinar la concentración de sal. Los electrodos se conectaron al equipo como se muestra en la Figura 18, el selector se colocó en la escala de resistencia y se sumergieron las puntas en las muestras a una separación mínima requerida de 1 cm. Dado a que las mediciones en líquidos presentan baja conductividad, se empleó una escala de 20 M $\Omega$  para la muestra de agua destilada y una escala de 200 k $\Omega$  para la muestra de agua salada

Figura 18. Multímetro digital UNI-T UT33D



Fuente: elaboración propia

Para la toma de datos se elaboró la plantilla mostrada en la Figura 19, la cual toma en cuenta los siguientes aspectos:

- Número de prueba a realizar
- Fecha y ubicación donde se realiza la prueba
- Condiciones climáticas y ambientales del día de prueba del sistema
- Tipo de agua colocada para evaporar (agua salada, agua potable)
- Datos iniciales del sistema
- Temperaturas experimentales para medir
- Datos finales del sistema
- Horario solar de prueba

Figura 19. Plantilla de registro de resultados de pruebas experimentales de prototipos

<b>PRUEBA #</b>	FECHA:													
<b>DATOS</b>														
<b>UBICACIÓN</b>														
<b>TIPO</b>														
<b>VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA</b>								ml						
<b>TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA</b>								°C						
<b>TEMPERATURA MÍNIMA DEL DÍA</b>								°C						
				<b>HORARIO SOLAR</b>										
	Estado del clima													
<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>CODIGO</b>													
TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	TDN_in													
TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	TDN_out													
TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	TDA_out													
TEMPERATURA AISLANTE REFLECTIVO	TAIS													
TEMPERATURA CONO	TC													
TEMPERATURA REFLECTOR	Tref													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%; text-align: center;"><b>VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA</b></td> <td></td> <td style="text-align: center;">ml</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA</b></td> <td></td> <td style="text-align: center;">ml</td> </tr> </table>									<b>VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA</b>		ml	<b>VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA</b>		ml
<b>VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA</b>		ml												
<b>VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA</b>		ml												

Fuentes: elaboración propia

El registro de las mediciones en la plantilla mostrada en Figura 19, se realizó de manera manual, donde adicionalmente se realizaron anotaciones acerca de observaciones de las pruebas. (Ver sección de Anexos)

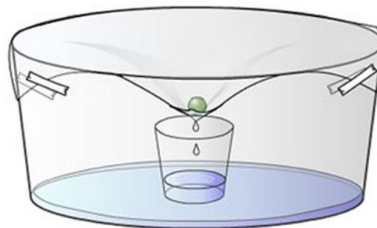
---

## 8. Fabricación

---

El diseño del sistema se tomó como referencia de los desalinizadores solares caseros, comúnmente empleados en prácticas de laboratorio y en demostraciones de técnicas de supervivencia. Se buscó replicar su principio de funcionamiento y la disposición general de sus componentes: un recipiente principal que contiene el agua salada y una cubierta superior con una inclinación pronunciada hacia el centro del sistema, encargada de condensar el vapor generado. Las gotas formadas se desplazan por efecto de la gravedad hacia el punto central, donde se recolecta el agua destilada en un recipiente. Esta configuración garantiza un proceso de destilación solar pasiva simple, funcional y eficiente, aprovechando el ciclo natural de evaporación y condensación impulsado por la radiación solar.

Figura 20. Diseño de desalinizador solar casero



Fuente: Espacio sustentable, 2011

La fabricación de los prototipos, tanto del sistema de prueba como del sistema final, se realizó siguiendo el mismo diseño estructural y geométrico, variando únicamente la escala de construcción. Esta correspondencia permite que ambos modelos compartan el mismo análisis teórico termodinámico y el mismo principio de funcionamiento, garantizando que los resultados obtenidos sean comparables y replicables entre ambos sistemas.

## 8.1. Fabricación prototipo de prueba

Se diseñó el prototipo de prueba pensando en que se requería de algo práctico y simple de fabricar utilizando los equipos y herramientas disponibles en el laboratorio del DHIVE en la Universidad del Valle de Guatemala. También que se hiciera uso de la menor cantidad de materiales disponibles.

Se inició con la fabricación del domo evaporador y del cono condensador. Para obtener la geometría definida en el diseño, se utilizó la técnica de termoformado. El material seleccionado fue plástico PETG, un tipo de tereftalato de polietileno modificado con glicol que ofrece mayor resistencia al impacto, alta transparencia (ideal para favorecer el efecto invernadero) y excelente propiedad termoformable para piezas de formas simples o complejas (Desu Tech, 2024).

Los moldes utilizados para el termoformado fueron diseñados en el software Autodesk Inventor y posteriormente impresos en 3D con filamento PLA empleando una impresora Ultimaker 3. Debido a que las impresiones 3D presentan relieves superficiales por las capas de filamento, las piezas fueron lijadas para obtener una superficie lisa y uniforme, evitando que dichas irregularidades se transfirieran al PETG durante el termoformado y afectaran el deslizamiento de las gotas en las pruebas experimentales.

Se aplicó pintura negra mate en una sección de la superficie del domo evaporador, con el propósito de que esta zona actuara como concentrador de calor. No se recubrió toda el área superficial, ya que se requería mantener una parte del material PETG translúcida para comparar la diferencia de temperatura entre las zonas pintadas y no pintadas. Además, esta área transparente permitió observar la formación de gotas en la punta del cono condensador y monitorear el funcionamiento interno del sistema durante las pruebas experimentales.

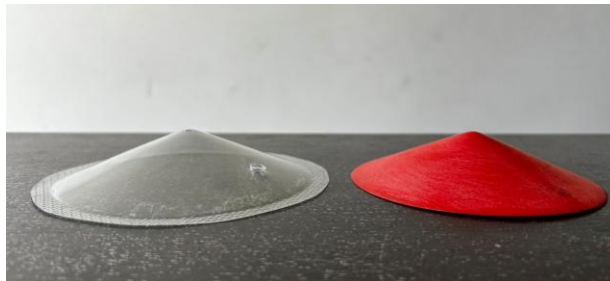
Figura 21. Domo evaporador termoformado y molde impreso en 3D



Fuente: elaboración propia

La configuración mostrada en la Figura 20 sugiere la colocación de una lámina plástica con un peso en el centro, formando una geometría cónica. A partir de esta referencia, se determinó que la forma más adecuada para el condensador de vapor es la de un cono invertido transparente, ya que esta geometría facilita el desplazamiento de las gotas de agua condensada hacia el punto central por efecto de la gravedad, optimizando así la recolección del destilado sin pérdidas de gotas fuera del recipiente.

Figura 22. Cono condensador termoformado y molde impreso en 3D



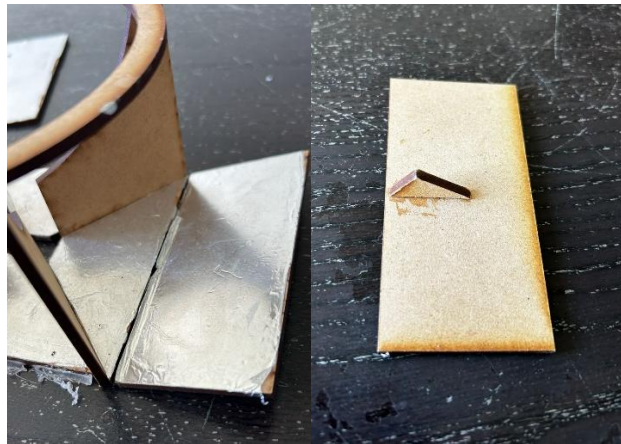
Fuente: elaboración propia

El cono condensador fue perforado en su parte superior para permitir la introducción del termómetro utilizado en la medición de la temperatura del agua salada contenida en el domo evaporador. Esta abertura se selló con un tapón de silicón con el fin de reducir las fugas de vapor y mantener el aislamiento térmico del sistema. Gracias a la transparencia del material acrílico, es posible observar con claridad el proceso de condensación del vapor de agua y la formación de gotas durante el funcionamiento del prototipo.

El plástico PETG presenta una deformación plástica en un rango de temperatura comprendido entre 50 °C y 80 °C (Kondo, 2024). Dado que ambos componentes estarán expuestos a temperaturas superiores a 40 °C durante el funcionamiento, se termoformaron tres capas de hojas de PETG colocadas de manera superpuesta, con el propósito de incrementar el espesor y garantizar la estabilidad dimensional del material; evitando así deformaciones por efecto del calor, asegurando la integridad estructural y el desempeño adecuado del sistema durante las pruebas experimentales.

Para los reflectores se utilizó MDF como material para la base y se recubrieron con hoja de aluminio. A los reflectores se les colocó una pequeña pestaña que actúa como cuña para poder darle la inclinación requerida.

Figura 23. Reflector con cubierta reflectiva y cuña



Fuente: elaboración propia

La estructura del sistema está conformada por cuatro patas de soporte que sostienen un anillo encargado de mantener en posición el domo evaporador y el cono condensador. La geometría de las patas fue diseñada para adaptarse a la forma semiesférica del domo, proporcionando estabilidad y un apoyo uniforme sobre la base. El anillo cumple la función de soporte principal, sujetando el sistema desde el borde inferior del domo. El diseño estructural considera que los elementos de soporte no interfieran con la radiación solar

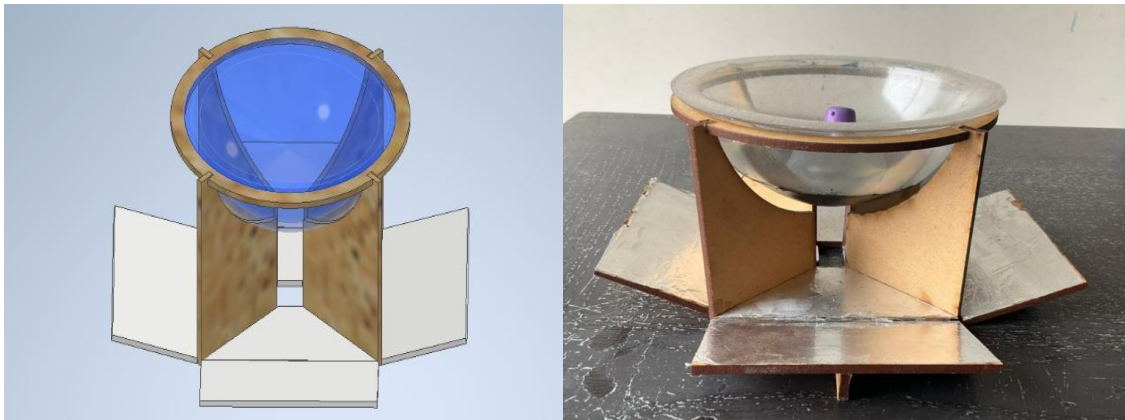
directa reflejada por los reflectores, ubicando la estructura de manera que la luz solar concentrada cubra la mayor área posible alrededor del domo evaporador y optimice el aprovechamiento térmico del sistema.

Figura 24. Estructura de soporte del sistema



Fuente: elaboración propia

Figura 25. Diseño CAD y prototipo prueba físico



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc. y elaboración propia

Finalmente, el sistema fue sellado completamente utilizando cinta industrial blanca en las uniones entre el domo evaporador y el cono condensador. Este sellado tiene como propósito generar un cierre hermético que garantice el aislamiento total del sistema, evitando pérdidas o fugas de vapor de agua hacia el exterior. Se empleó cinta de color blanco con el fin de que su superficie actuara como reflector, evitando la absorción de calor adicional en las zonas de unión y manteniendo la diferencia de temperatura requerida en la base del cono para favorecer la condensación del vapor.

Figura 26. Prototipo de prueba sellado con cinta industrial



Fuente: elaboración propia

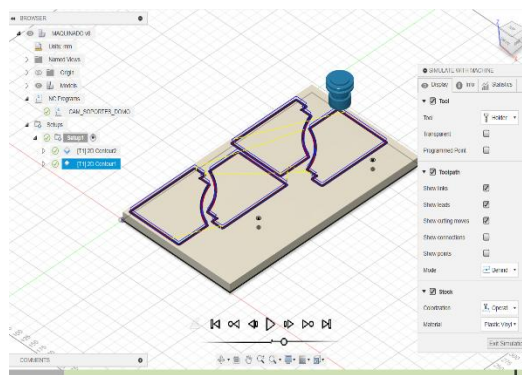
## 8.2. Prototipo final

Con base en el diseño del prototipo de prueba a pequeña escala, se desarrolló el diseño del prototipo final a escala real de funcionamiento. Aunque ambos comparten los mismos componentes principales, geometrías y disposiciones estructurales, el diseño final incorpora modificaciones y componentes secundarios adicionales. Estas mejoras se implementaron a partir de las observaciones obtenidas durante la fase experimental del prototipo de prueba, con el objetivo de optimizar la funcionalidad, el desempeño térmico y la eficiencia global del sistema.

### 8.2.1. Estructura de soporte del domo

Se utilizó el software Fusion 360 de Autodesk para generar las estrategias de maquinado de las piezas y obtener el código G correspondiente a la trayectoria de la herramienta de corte. Se seleccionó la estrategia de contorno 2D, ya que las piezas no presentan relieves internos y únicamente fue necesario realizar el mecanizado de su perímetro siguiendo el perfil de su geometría. Se utilizó la máquina herramienta router CNC ShopBot para la manufactura de las piezas, empleando una fresa de corte de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro. Durante la fabricación de estas piezas se seleccionó tablero MDF como material base para el mecanizado de la estructura, principalmente por su disponibilidad, bajo costo y facilidad de manufactura en la router CNC. Este material es ampliamente utilizado en procesos de maquinado debido a su uniformidad, estabilidad dimensional y buena respuesta al corte, lo que permitió obtener piezas con acabados precisos y tiempos de fabricación reducidos

Figura 27. Simulación CAM de estrategias de maquinado con Fusion 360



Fuente: Captura de pantalla de Fusion reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Cuadro 20. Especificaciones de fresa utilizada para estrategia de maquinado 2D


<b>Diámetro</b>	1/4 in
<b>Largo de corte</b>	0.75 in
<b>Largo total</b>	2.5 in
<b>Tipo</b>	cabeza plana
<b>Material</b>	Carburo
<b>Referencia</b>	

Figura 28. Maquinado de piezas de soporte en router CNC Shop



Fuente: elaboración propia

En el diseño original del prototipo se había previsto fabricar el anillo como una sola pieza; sin embargo, la plancha de material disponible no contaba con el área suficiente para producirlo de esa forma. Por este motivo, se rediseñó el anillo dividiéndolo en dos secciones complementarias tipo hembra y macho, unidas mediante una junta tipo rompecabezas. De esta manera, se optimizó el aprovechamiento del material disponible, reduciendo el área requerida para la fabricación sin alterar las dimensiones ni las características del diseño propuesto inicialmente.

Figura 29. Unión de piezas de anillo de soporte



Fuente: elaboración propia

Figura 30. Estructura de soporte de sistema prototipo final



Fuente: elaboración propia

Se reconoce que el MDF no es el material más adecuado para aplicaciones que impliquen exposición a la humedad o contacto directo con el agua, ya que tiende a absorber líquidos y deteriorarse estructuralmente al hincharse o desintegrarse. A pesar de esta limitación, su elección fue justificada al tratarse de un prototipo experimental, cuyo propósito principal era validar la funcionalidad del diseño, la geometría de los componentes y el proceso de ensamblaje, más que garantizar su durabilidad a largo plazo.

El uso de MDF permitió reducir costos y facilitar el transporte del prototipo gracias a su bajo peso, lo cual resultó conveniente para la etapa de pruebas y ajustes iniciales. No obstante, se considera que, para futuras versiones del sistema, orientadas a la implementación real en campo, sería recomendable sustituir este material por alternativas resistentes a la humedad, como polímeros estructurales, madera tratada o aluminio, que aseguren un desempeño sostenido en condiciones ambientales más exigentes.

### 8.2.2. Reflectores

El diseño adoptado para los reflectores fue plano e inclinado, esta configuración permite direccionar de manera controlada la radiación solar directa hacia la superficie del domo. A diferencia de los reflectores curvos o parabólicos, que requieren una alineación más precisa y pueden concentrar excesivamente la energía en un punto, el reflector plano distribuye la irradiancia sobre un área más amplia, lo que favorece un calentamiento más uniforme del sistema. (Duffie y Beckman, 2006).

Para los reflectores se utilizó una hoja de aluminio galvanizado con un espesor de 6 mm, lo que permitió realizar el corte de las placas de forma sencilla mediante herramientas manuales, como tijeras para lámina. El reducido espesor del material facilitó también el ajuste del ángulo de inclinación de los reflectores conforme al valor calculado previamente.

Figura 31. Fabricación y colocación de reflectores



Fuente: elaboración propia

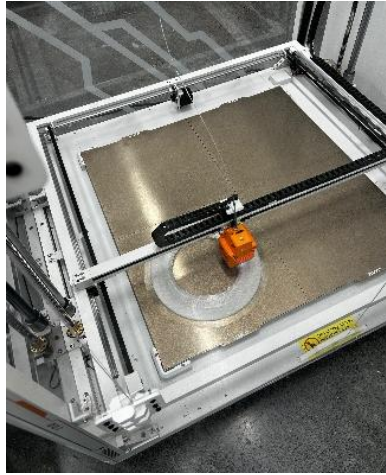
La selección del aluminio galvanizado presenta propiedades de reflectividad térmica que permiten maximizar la redirección de la radiación solar hacia la superficie del domo evaporador. Esta característica incrementa la transferencia de calor por radiación y contribuye a elevar la temperatura del agua salada, mejorando la eficiencia térmica del sistema sin necesidad de emplear fuentes energéticas externas

### 8.2.3. Cono condensador

Para el cono condensador se elaboraron dos versiones: una fabricada mediante impresión 3D con filamento PLA y otra mediante termoformado de acrílico. Durante las pruebas experimentales realizadas con el cono impreso en 3D, se observó que el componente no alcanzó la funcionalidad esperada. Como resultado de esta observación, se tomó la decisión de modificar el diseño y fabricar una nueva versión del cono utilizando acrílico termoformado.

En el caso del cono impreso en 3D, se utilizó una impresora Elegoo Giga y filamento PLA blanco translúcido. Este método de manufactura permitió obtener con precisión la geometría definida en el modelo digital, garantizando dimensiones exactas, uniformidad en el espesor y una superficie regular. La impresión 3D facilitó además la evaluación dimensional del diseño y su comportamiento estructural, sirviendo como referencia para comparar el desempeño con el cono termoformado en pruebas experimentales posteriores

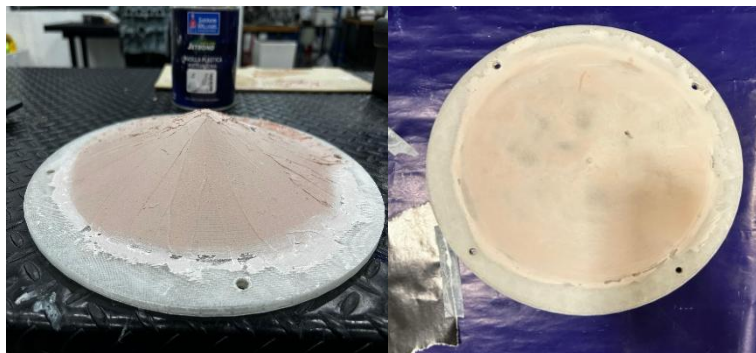
Figura 32. Impresión 3D como condensador en Eleego Giga



Fuente: elaboración propia

El cono impreso presentó relieves superficiales que impidieron obtener una textura lisa y uniforme, lo que provocó la acumulación de gotas entre las líneas del relieve y dificultó su deslizamiento hacia el centro del sistema. Se aplicó una capa de masilla plástica sobre la superficie, la cual fue posteriormente lijada hasta lograr un acabado liso y suave.

Figura 33. Masillado y alisado de superficie domo condensador



Fuente: elaboración propia

Luego, se aplicó una pintura en aerosol blanca de uso en electrodomésticos, con el propósito de que actuara como superficie reflectora y contribuyera a mantener una distribución térmica uniforme. Finalmente, se añadió una capa antiadherente para favorecer el desplazamiento de

las gotas condensadas hacia el punto central del sistema, mejorando así la eficiencia del proceso de recolección

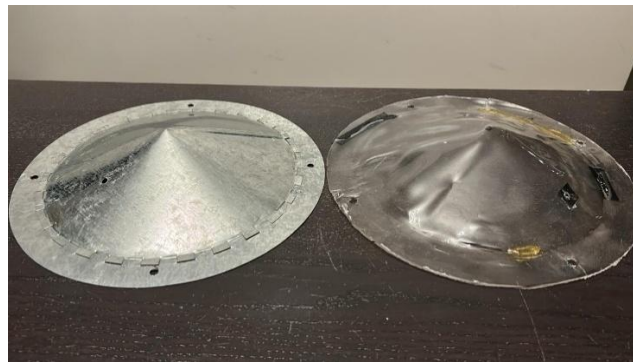
Figura 34. Recubrimiento con pintura blanca y prueba antiadherente de gotas



Fuente: elaboración propia

Para la fabricación del cono de acrílico se empleó la técnica de termoformado, la cual requirió la elaboración de un molde metálico con forma cónica fabricado en aluminio galvanizado. Este molde permitió dar al acrílico la geometría exacta definida en el diseño. Durante el proceso, se utilizó una pistola de aire caliente para ablandar el material y facilitar su deformación, permitiendo que se adaptara gradualmente a la superficie del molde hasta adquirir la forma deseada.

Figura 35. Molde metálico y cono acrílico termoformado



Fuente: elaboración propia

La geometría obtenida mediante el proceso de termoformado presentó algunas irregularidades durante su elaboración. Entre las principales fallas observadas se identificaron pequeños orificios provocados por el sobrecalentamiento localizado del material, fisuras generadas por la presión ejercida en los extremos de la plancha durante el enfriamiento y una superficie cónica lisa, pero con leves abolladuras.

En comparación con el cono fabricado mediante impresión 3D, la pieza termoformada resultó menos precisa e irregular en su forma final, aunque su proceso de fabricación fue más rápido y requirió menos etapas de acabado para obtener una superficie lisa

#### 8.2.4. Domo evaporador

La geometría del domo evaporador no fue manufacturada, sino es un componente previamente fabricado y adquirido. Se recubrió la mayor parte de su superficie con pintura negra mate, con el propósito de maximizar la absorción de radiación solar y asegurar que la mayor cantidad posible de agua salada estuviera expuesta a este concentrador de calor. Se dejó un área libre de recubrimiento para permitir la observación y control visual del interior del sistema y la temperatura de pared durante las pruebas experimentales. Finalmente, se colocaron cuatro tornillos de 6 mm de diámetro y 40 mm de largo para realizar la unión del cono condensador al domo evaporador, asegurando un cierre estable y hermético del sistema

Figura 36. Domo evaporador original y modificado para pruebas de funcionalidad



Fuente: elaboración propia

### 8.2.5. Sello hermético

Se elaboró un sello hermético utilizando un forro de PVC con un espesor de 6 mm, cortado con las mismas dimensiones del borde del domo evaporador y con perforaciones alineadas a la ubicación de los tornillos de sujeción.

Figura 37. Anillo de forro PVC para sello hermético



Fuente: elaboración propia

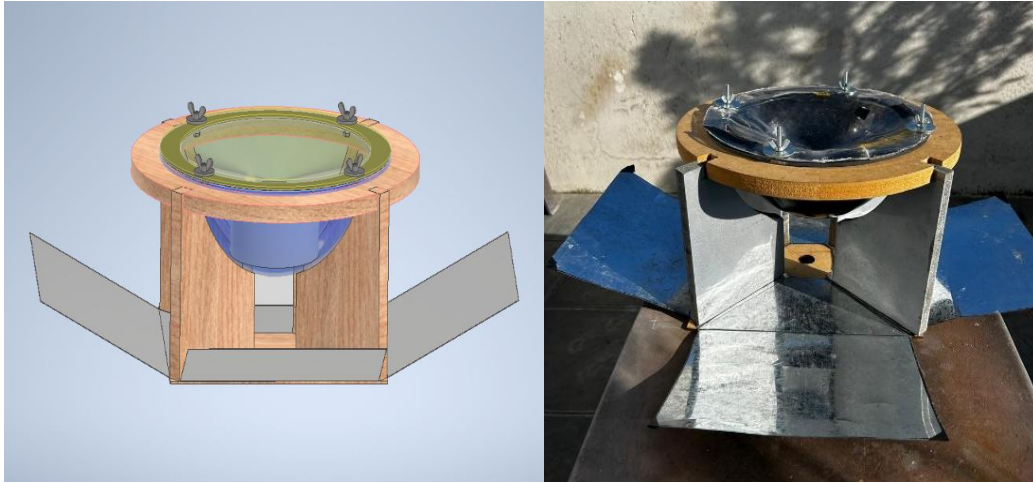
Este sello se colocó entre la unión del domo y el cono condensador con el propósito de garantizar que el sistema se encuentre hermético, evitando fugas de vapor hacia el entorno y asegurando un aislamiento térmico adecuado durante las pruebas de funcionamiento. Se colocaron 4 roldanas y 4 tuercas de tipo mariposa para cerrar el sistema y apretar el sello entre la unión del domo y el cono y garantizar su aislamiento.

Figura 38. Sello con roldanas y mariposas



Fuente: elaboración propia

Figura 39. Diseño CAD y prototipo final físico



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc. y elaboración propia

### 8.3. Análisis de costos de fabricación

Cuadro 21. Análisis de costos de fabricación de prototipo final

Componente	Material	Dimensiones/ Especificaciones	Metodo fabricación	Proveedor	Cantidad	Precio unitario	Total
Reflector solar	Hoja de aluminio galvanizado	3 mm, 60x60 cm	Corte de lámina	Novex	4	Q27.88	Q111.52
Domo evaporador	Acrílico	grosor de 0.15 "	adquirido	Amazon	2	Q290.00	Q580.00
Cono condensador	Acrílico	3 mm, 1.22 m	3 mm, 1.22 m x 2.44 m	Novocolor	1	Q7.68	Q7.68
Anillo de soporte	MDF	17 mm, 1.22x 2.44 m	Maquinado Router CNC	EPA	1	Q4.00	Q4.00
Bases soporte anillo	MDF	18 mm, 1.22x 2.44 m	Maquinado Router CNC	EPA	4	Q18.00	Q72.00
Recipiente recolector	Vidrio	recipiente para 4 tazas	adquirido	Novex	1	Q65.00	Q65.00
Piso base	MDF	15 mm, 1.22 m x 2.44m	Cortadora láser	UVG	1	Q6.69	Q6.69
Concentrador de calor	Pintura en aerosol negra mate	Lata de 11 oz	Adquirido	Novex	1	Q72.25	Q72.25
Anillo sellador	Forro pvc	grosor de 2 mm	Adquirido	Dollarcity	1	Q32.00	Q32.00
Tornillos	Zinc	¼ " * ¾ "	Adquirido	Novex	4	Q0.75	Q3.00
Tuercas tipo mariposa	acero inoxidable	¼ "	Adquirido	Novex	4	Q1.00	Q4.00
<b>Costo total prototipo fabricado</b>						<b>Q</b>	<b>958.14</b>

### 9.1. Prototipo experimental

Figura 40. Sistema prototipo experimental en funcionamiento, prueba #4 (17 de abril, 2025.  
Chiquimulilla, Santa Rosa)



Fuente: elaboración propia

Figura 41. Distribución de calor en superficie externa domo evaporador con recubrimiento negro mate en sistema prototipo experimental, prueba #4



Fuente: elaboración propia

Figura 42. Distribución de calor en reflectores de sistema prototipo experimental, prueba #4



Fuente: elaboración propia

Figura 43. Temperatura superficial externa como evaporador de sistema prototipo experimental, prueba #4

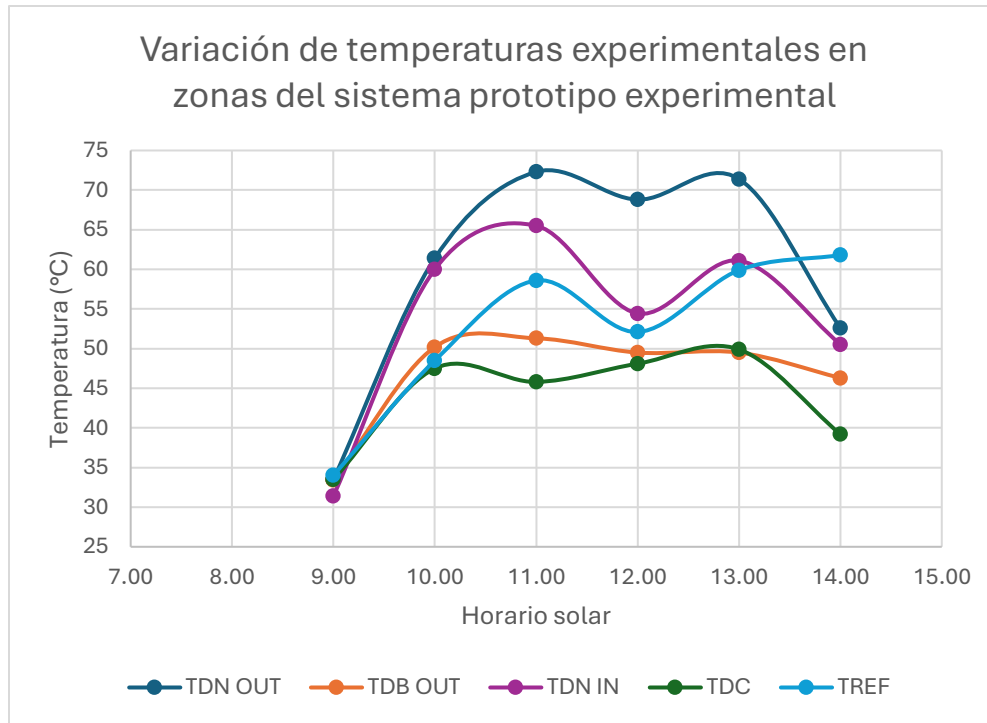


Fuente: elaboración propia

Cuadro 22. Temperaturas registradas en zonas del sistema prototipo experimental, prueba #4 (17 de abril 2025. Chiquimulilla, Santa Rosa)

<b>Horario solar</b>	$T_{DN,in}$ (°C)	$T_{DN,out}$ (°C)	$T_{DB,out}$ (°C)	$T_{DC}$ (°C)	$T_{REF}$ (°C)
<b>09:15</b>	31.4	33.5	33.4	33.5	34
<b>10:15</b>	60	61.4	50.2	47.5	48.5
<b>11:15</b>	65.5	72.3	51.3	45.8	58.6
<b>12:15</b>	54.44	68.8	49.5	48.1	52.1
<b>13:15</b>	61.1	71.4	49.5	49.9	59.9
<b>14:15</b>	50.55	52.6	46.3	39.2	61.8

Figura 44. Variación de temperaturas experimentales en zonas del sistema prototipo experimental prueba #10 según horario solar de funcionamiento.



Fuente: elaboración propia

Cuadro 23. Diferenciales de temperatura entre pared interna de domo evaporador y superficies de condensación de sistema prototipo experimental, prueba #4

$T_{DN,in}$	$T_{DB,out}$	Diferencial de temperatura $T_{DN,in}-T_{DB,out}$	$T_C$	Diferencial de temperatura $T_{DN,in}-T_D$
31.4	33.4	2	(°C)	2.1
60	50.2	9.8	47.5	12.5
65.5	51.3	14.2	45.8	19.7
54.44	49.5	4.94	48.1	6.34
61.1	49.5	11.6	49.9	11.2
50.55	46.3	4.25	39.2	11.35
Promedio		7.80	Promedio	10.53

Cuadro 24. Temperaturas experimentales de prueba #4 y temperaturas teóricas estimadas para sistema prototipo experimental

Horario solar	$T_{sref,teo}$	$T_{sref,exp}$	% dispersión	$T_{sdomo,teo}$	$T_{sdomo,exp}$	% dispersión
	(°C)	(°C)	$T_{REF}$	(°C)	(°C)	$T_{REF}$
09:15	45.48	34	25%	54.34	33.5	38%
10:15	51.24	48.5	5%	56.81	47.5	16%
11:15	53	52.1	2%	57.55	48.1	16%
12:15	50.83	52.1	2%	56.64	48.1	15%
13:15	49.45	59.9	21%	56.05	49.9	11%
14:15	43.88	61.8	41%	53.67	39.2	27%

Cuadro 25. Resultados de operación del sistema prototipo experimental, prueba #4 (17 de abril 2025.Chiquimulilla, Santa Rosa)

Variable	Magnitud	Dimensional
Volumen de agua salada inicial	15	mL
Volumen de agua salada final	5	mL
Volumen de agua destilada recolectada	5.5	mL
Temperatura máxima del día	33	°C
Temperatura mínima del día	31	°C
Eficiencia	25.28	%

Cuadro 26. Eficiencia teórica y experimental del sistema prototipo experimental, prueba #4

Variable	Magnitud	Dimensional
Límite máximo de masa a evaporar	15	g
Masa experimental de agua recolectada	5	g
% dispersión	33.33	%
$\eta_{teórica}$	99.10	%
$\eta_{exp}$	25	%
% dispersión	73.82	%

## 9.2. Prototipo final

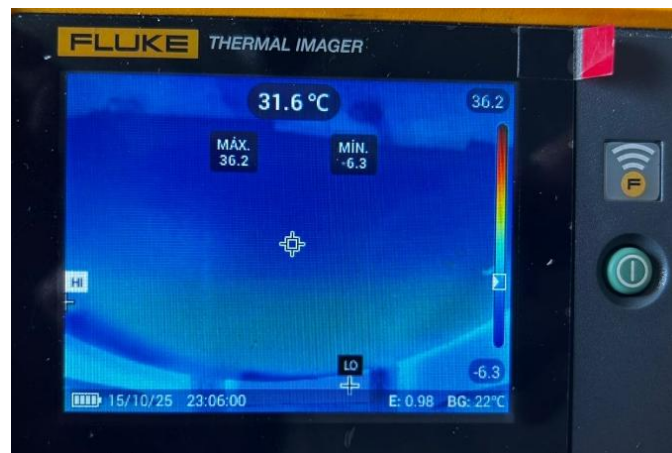
### 9.2.1. Resultados prueba #2

Figura 45. Sistema prototipo final en funcionamiento con cono condensador impreso en 3D y aislante reflectivo añadido, prueba #4 (10 de octubre, 2025. Ciudad, Guatemala)



Fuente: elaboración propia

Figura 46. Distribución de calor en superficie externa domo evaporador con recubrimiento negro mate en sistema prototipo final, prueba #2



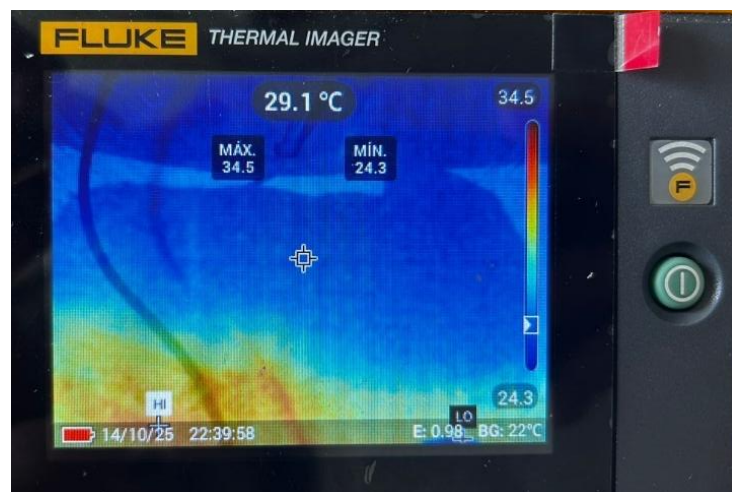
Fuente: elaboración propia

Figura 47. Distribución de calor en reflectores de sistema prototipo final, prueba #2



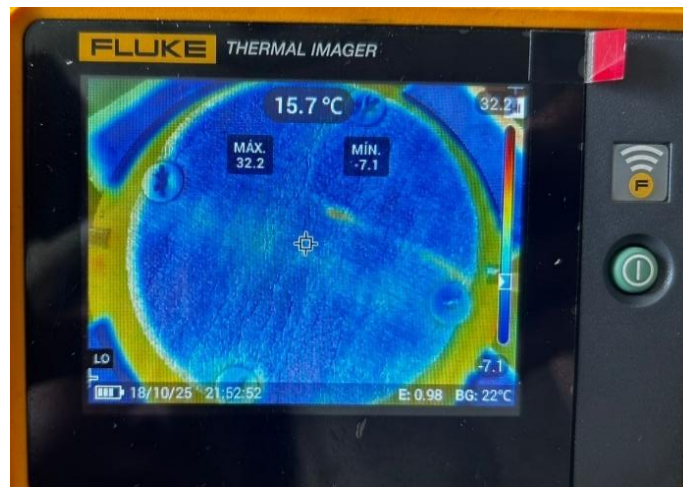
Fuente: elaboración propia

Figura 48. Distribución de calor en cono condensador de sistema prototipo final, prueba #2



Fuente: elaboración propia

Figura 49. Distribución de calor en cono condensador de sistema prototipo final, prueba #2



Fuente: elaboración propia

Cuadro 27. Temperaturas registradas en zonas del sistema prototipo final con aislante reflectivo añadido, prueba #2 (10 de octubre 2025. Ciudad de Guatemala, Guatemala)

Horario solar	$T_{DN,in}$ (°C)	$T_{DN,out}$ (°C)	$T_{DB,out}$ (°C)	$T_{DC}$ (°C)	$T_{AIS}$ (°C)	$T_{REF}$ (°C)
<b>07:00</b>	21.1	21.5	19.1	20.7	-4.4	27.1
<b>08:00</b>	23.89	25.3	25.1	26.4	7.3	35.7
<b>09:00</b>	26.66	29	25.4	27.5	-3	41.4
<b>10:00</b>	33.33	35.3	31.1	33.9	11	43.1
<b>11:00</b>	42.22	57.7	38.7	33.9	21.1	51.1
<b>12:00</b>	47.77	66.1	42.5	51	0.8	64.7
<b>13:00</b>	47.77	53.3	44.1	45.9	2.9	74.2

Figura 50. Acumulación de gotas condensadas en cono condensador elaborado con impresión 3D con aislante reflectivo, prueba #2



Fuente: elaboración propia

Figura 51. Recipiente recolector sin muestra de agua destilada recolectada para prueba#2 empleando como condensador impreso en 3D con aislante reflectivo

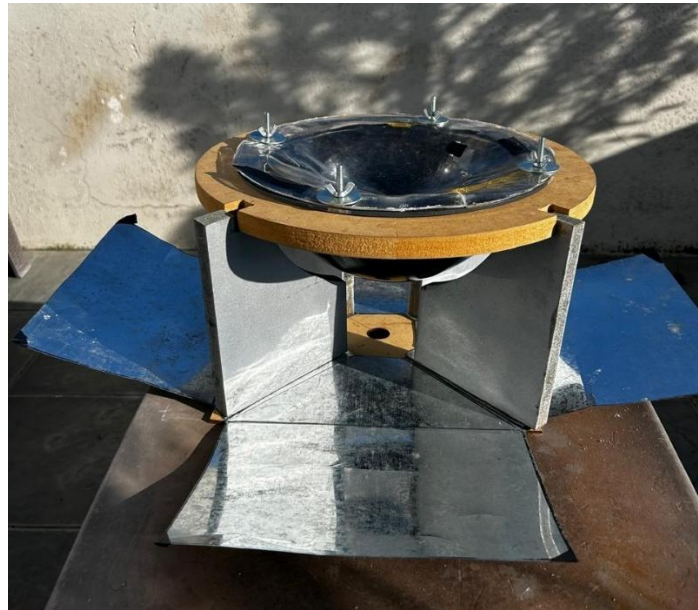


Fuente: elaboración propia

### 9.2.2. Resultados prueba #10

Figura 52. Sistema prototipo final en funcionamiento con cono condensador de acrílico transparente y recubrimiento total del domo evaporador, prueba #10 (25 de octubre, 2025.

Mixco, Guatemala)



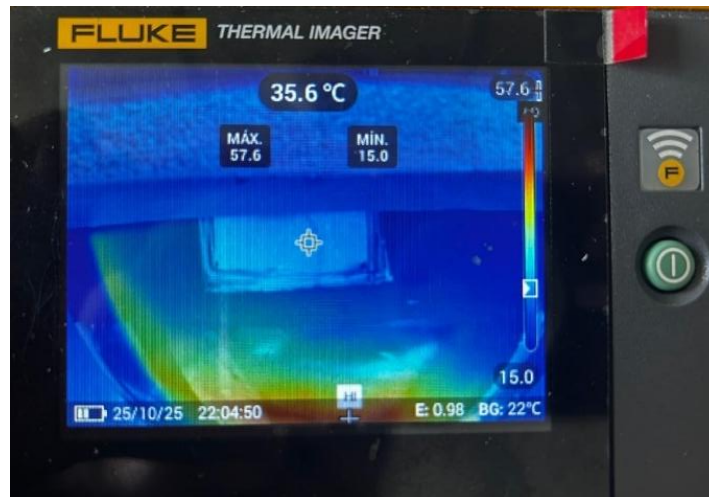
Fuente: elaboración propia

Figura 53. Distribución de calor en superficie externa domo evaporador con recubrimiento negro mate en sistema prototipo final, prueba #10



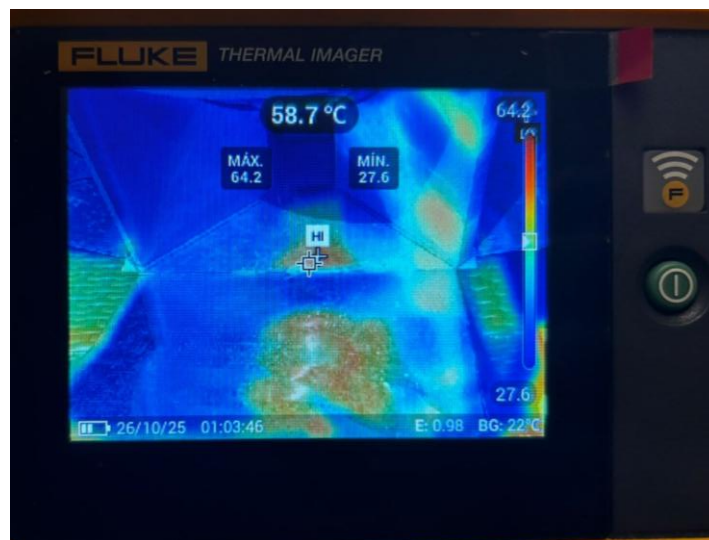
Fuente: elaboración propia

Figura 54. Distribución de calor en superficie externa domo evaporador sin recubrimiento negro mate en sistema prototipo final, prueba #10



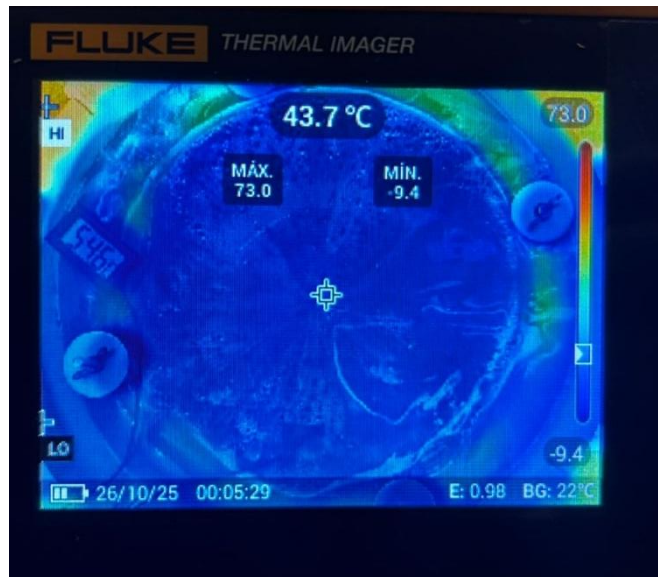
Fuente: elaboración propia

Figura 55. Distribución de calor en reflectores de sistema prototipo final, prueba #10



Fuente: elaboración propia

Figura 56. Distribución de calor en cono condensador de sistema prototipo final, prueba #10



Fuente: elaboración propia

Figura 57. Acumulación de gotas condensadas en cono condensador elaborado con acrílico termoformado, prueba #10

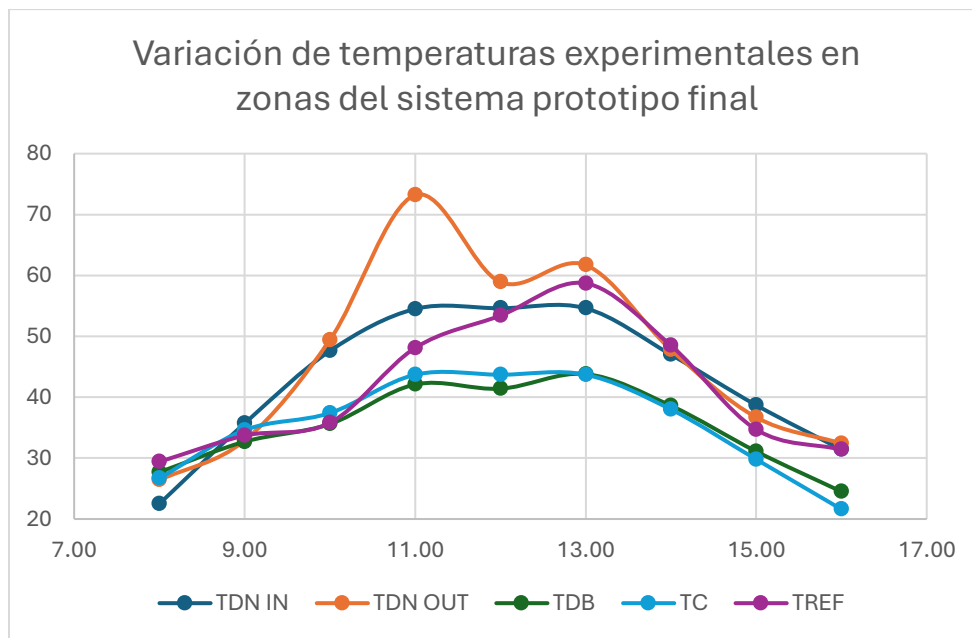


Fuente: elaboración propia

Cuadro 28. Temperaturas registradas en zonas del sistema prototipo final, prueba #10 (25 de octubre 2025. Mixco, Guatemala)

Horario solar	$T_{DN,in}$ (°C)	$T_{DN,out}$ (°C)	$T_{DB,out}$ (°C)	$T_C$ (°C)	$T_{REF}$ (°C)
<b>08:00</b>	22.5	26.4	27.7	26.7	29.4
<b>09:00</b>	35.7	32.9	32.7	34.6	33.7
<b>10:00</b>	47.6	49.4	35.6	37.4	35.8
<b>11:00</b>	54.5	73.2	42.1	43.7	50
<b>12:00</b>	54.6	58.9	41.4	43.7	53.4
<b>13:00</b>	54.6	61.7	43.8	43.7	58.7
<b>14:00</b>	47	47.8	38.6	38	48.5
<b>15:00</b>	38.7	36.7	31.1	29.8	34.7
<b>16:00</b>	31.4	32.4	24.5	21.6	31.4

Figura 58. Variación de temperaturas experimentales en zonas del sistema prototipo experimental prueba #10 según horario solar de funcionamiento.



Fuente: elaboración propia

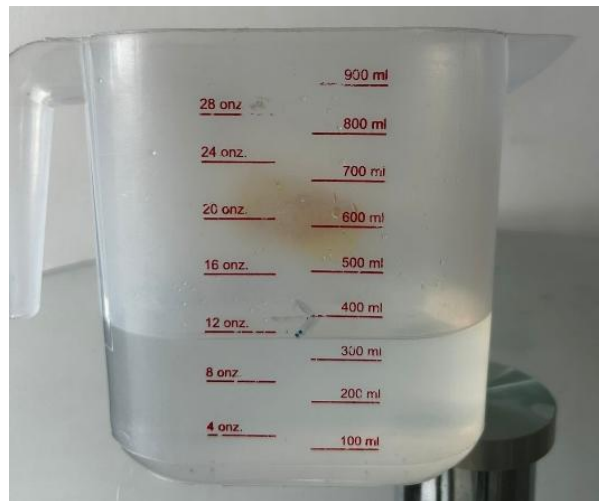
Cuadro 29. Diferenciales de temperatura entre pared interna de domo evaporador y superficies de condensación de sistema prototipo final, prueba #10

$T_{DN,in}$	$T_{DB,out}$	Diferencial de temperatura $T_{DN,in}-T_{DB,out}$	$T_C$	Diferencial de temperatura $T_{DN,in}-T_D$
31.4	33.4	2	(°C)	2.1
60	50.2	9.8	47.5	12.5
65.5	51.3	14.2	45.8	19.7
54.44	49.5	4.94	48.1	6.34
61.1	49.5	11.6	49.9	11.2
50.55	46.3	4.25	39.2	11.35
	Promedio	7.80	Promedio	10.53

Cuadro 30. Temperaturas experimentales de prueba #10 y temperaturas teóricas estimadas para sistema prototipo final

Horario solar	$T_{sref,teo}$ (°C)	$T_{sref,exp}$ (°C)	% dispersión $T_{REF}$	$T_{sdomo,teo}$ (°C)	$T_{sdomo,exp}$ (°C)	% dispersión $T_{REF}$
<b>08:00</b>	20.65	29.4	30%	41.97	26.4	37%
<b>09:00</b>	53.27	33.7	58%	52.46	32.9	37%
<b>10:00</b>	52.6	35.8	47%	54.26	49.4	9%
<b>11:00</b>	79.47	50	65%	60.97	73.2	20%
<b>12:00</b>	77.43	53.4	45%	60.25	58.9	2%
<b>13:00</b>	69.47	58.7	18%	57.54	61.7	7%
<b>14:00</b>	41.81	48.5	14%	48.56	47.8	2%
<b>15:00</b>	23.55	34.7	32%	42.79	36.7	14%

Figura 59. Volumen de agua salada restante en domo evaporador luego de período de 8 horas de funcionamiento, prueba #10



Fuente: elaboración propia

Figura 60. Volumen de agua destilada recolectada luego de período de 8 horas de funcionamiento, prueba #10



Fuente: elaboración propia

Cuadro 31. Resultados prueba #10 de operación del sistema prototipo final (25 de octubre 2025. Mixco, Guatemala)

<b>Variable</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Dimensional</b>
Volumen de agua salada inicial	400	mL
Volumen de agua salada final	350	mL
Volumen de agua destilada recolectada	32	mL
Temperatura máxima del día	25	°C
Temperatura mínima del día	15	°C
Eficiencia	9.72%	%

Cuadro 32. Eficiencia teórica y experimental del sistema prototipo final, prueba #10

<b>Variable</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Dimensional</b>
Límite máximo de masa a evaporar	400	g
Masa experimental de agua recolectada	32	g
% masa evaporada	12.50	%
% masa evaporada y recolectada	8	%
$\eta_{\text{límite máximo}}$	15.18	%
$\eta_{\text{teórica}}$	7.2	%
$\eta_{\text{exp}}$	1.897	%
% dispersión	5.32	%

### 9.3. Pruebas de salinidad

Figura 61. Medición de resistencia eléctrica para muestra de agua destilada recolectada de prueba #10



Fuente: elaboración propia

Figura 62. Medición de resistencia eléctrica para muestra de agua salada de prueba #10



Fuente: elaboración propia

Cuadro 33. Conductividad eléctrica de muestras de agua de sistema prototipo prueba #7

<b>Muestra de agua</b>	<b>Resistencia (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Conductividad <math>\mu S/cm</math></b>
Agua salada	94800E3	10.55
Agua destilada recolectada	430000E6	2.33

Cuadro 34. Comparación de conductividad agua destilada recolectada con parámetros NTG 20091 y ASTM D1193-91

<b>Parámetro</b>	<b>Conductividad <math>\mu S/cm</math></b>	<b>Clasificación</b>
Agua destilada recolectada	2.32	-
NTG 20091	750	LMP
ASTM D1193-91	< 3	Tipo III

### 10.1. Pruebas experimentales

Se realizaron un total de 14 pruebas experimentales para validar el funcionamiento del sistema, distribuidas en dos etapas: 4 pruebas con el prototipo experimental y 10 pruebas con el prototipo final. En todas ellas se observó el comportamiento esperado del ciclo de evaporación y condensación, evidenciando la formación de gotas en el cono condensador y su desplazamiento hacia el centro del sistema, donde caían dentro del recipiente recolector. Las pruebas #4 del prototipo experimental y #10 del prototipo final fueron las más destacadas, ya que permitieron obtener un volumen medible significativo de agua destilada.

En la prueba #4, se introdujeron 15 mL de agua salada a una temperatura inicial de 34.4 °C. Durante un periodo de 6 horas de exposición continua a luz solar directa, se recolectaron 5.5 mL de agua destilada. En este intervalo, las temperaturas medidas en diferentes zonas del sistema oscilaron entre 39.2 °C y 72.3 °C, siendo la temperatura más alta registrada en la superficie externa del domo evaporador recubierto con pintura negra mate, que superó los 70 °C.

En la prueba #10, se colocaron 400 mL de agua salada a una temperatura inicial de 22.5 °C, y se recolectaron 32 mL de agua destilada después de 8 horas de funcionamiento bajo condiciones similares de radiación solar. En esta prueba, las temperaturas oscilaron entre 30 °C y 73 °C, nuevamente registrándose las temperaturas más altas en la pared externa del domo evaporador.

En ambas pruebas, la temperatura del agua salada alcanzó su punto máximo alrededor de las 11:10 a. m., con valores de 65.5 °C en la prueba #4 y 54.5 °C en la prueba #10. Estas temperaturas se correlacionan con el calentamiento máximo de la superficie recubierta del domo evaporador, lo que indica un buen desempeño del sistema como captador térmico.

A pesar de que el cono condensador también está expuesto a la radiación solar, no superó los 50 °C en ninguna de las pruebas. El diferencial térmico entre el agua salada y el cono condensador fue en promedio de 10.53 °C para la prueba #4 y de 8.42 °C para la prueba #10, lo cual favoreció el proceso de condensación.

Además, se observó acumulación de gotas en zonas internas del domo evaporador que no estaban recubiertas con pintura negra, con diferenciales de temperatura similares. La diferencia promedio entre las paredes sin recubrimiento y la temperatura del agua salada fue de 8.00 °C en la prueba #4 y de 8.95 °C en la prueba #10. Esto permite establecer que, para que ocurra el fenómeno de condensación de forma eficiente en el sistema, debe existir al menos un diferencial térmico de 8 °C entre el agua salada y la superficie del condensador.

Durante el periodo de funcionamiento, se comprobó que la radiación solar reflejada se concentra en un punto específico del domo evaporador, alcanzando ahí la mayor temperatura superficial. No obstante, la luz reflejada también cubre una porción considerable del área del domo, como se ilustra en la Figura 53. En ambas configuraciones (prototipo y diseño final), la zona más caliente se localizó en la parte inferior del domo, lo que permitió mantener un volumen constante de agua salada en calentamiento continuo.

El análisis térmico mediante imágenes de distribución de temperatura mostró que, en el prototipo experimental (Figura 41), la zona recubierta con pintura negra presentaba colores rojo-amarillo (alta temperatura), mientras que las superficies sin recubrimiento se mantenían en azul (baja temperatura). Esto evidencia la importancia del recubrimiento negro mate en la absorción de calor por radiación y su transferencia eficiente por conducción hacia el fluido.

En el diseño final, se optó por recubrir completamente la superficie del domo evaporador, dejando únicamente un área de control sin recubrimiento para efectos comparativos. Esta decisión permitió ampliar el volumen de agua tratada y asegurar un calentamiento más uniforme en todo el sistema.

Durante todas las pruebas, se constató que los componentes externos como la estructura de soporte, los reflectores y el anillo no presentaron restos de humedad ni evidencia de fugas. Al desmontar el cono condensador, el sello de PVC mostró presencia moderada de humedad,

sin llegar a formar condensación visible, lo cual indica un buen desempeño como sistema de sellado hermético, minimizando la pérdida de vapor.

En ningún caso se evaporó por completo el volumen inicial de agua salada; siempre quedó un remanente dentro del domo. No se detectaron visualmente diferencias significativas entre el agua salada remanente y el agua recolectada, ni cambios de color, ni formación de cristales de sal en el interior del sistema. Sin embargo, debido a que estos indicadores visuales no son concluyentes, se determinó la necesidad de realizar pruebas de conductividad del agua para comprobar la calidad del agua destilada obtenida y confirmar la separación efectiva de sales presentes

## 10.2. Temperaturas superficiales reflector, domo y agua salada

El Cuadro 24 y 30 se comparan las temperaturas teóricas estimadas con las temperaturas experimentales registradas para el prototipo experimental y el sistema final. Se calculó el porcentaje de dispersión entre ambos conjuntos de valores, centrando el análisis en las superficies del reflector y del domo evaporador. En todos los casos, se obtuvo una dispersión menor al 50 % entre los resultados experimentales y los valores teóricos.

Se observó que varias de las dispersiones son negativas, lo cual indica que, durante ciertas horas del día, la temperatura experimental registrada superó la teórica estimada para esa misma hora. Este fenómeno sugiere una irradiancia solar real mayor a la prevista en los modelos teóricos.

En la prueba #4, se registraron temperaturas superficiales experimentales del reflector superiores a las teóricas a partir de las 11:15 a. m., con una máxima dispersión del 30 %. Esto sugiere que la irradiancia solar real durante ese día fue mayor a la estimada por las fuentes teóricas, como el Global Solar Atlas. En cambio, las temperaturas experimentales de la pared externa del domo evaporador no superaron las temperaturas teóricas. Esta discrepancia podría atribuirse a una mayor pérdida de calor por convección hacia el ambiente, provocada

por la circulación de aire durante el ensayo. Aun así, la dispersión fue menor al 20 %, lo que indica una buena aproximación del modelo teórico a la realidad.

En la prueba #10, tanto la temperatura superficial del reflector como la de la pared del domo evaporador con pintura negra mate fueron mayores que las teóricas. La temperatura máxima del reflector superó la estimada en un 30 %, mientras que la temperatura máxima de la pared externa del domo la superó en un 49 %. Estas diferencias se explican por el hecho de que los cálculos teóricos se realizaron utilizando los valores horarios de irradiancia solar promedio para el mes de noviembre, cuando se anticipa una menor radiación solar. Sin embargo, el día en que se ejecutó la prueba experimental, la radiación solar real fue significativamente mayor a la estimada.

En la prueba #4 del prototipo experimental, realizada en Chiquimulilla, Santa Rosa, se identificó que la temperatura máxima alcanzada por el sistema ocurrió a las 11:15 a.m., con valores de 72.3 °C en la superficie externa del domo evaporador recubierto de pintura negra (*TDN\_out*) y 58.6 °C en la superficie del reflector (*TREF*). Este comportamiento coincide con el pico de irradiancia solar del día y refleja una buena captación y aprovechamiento del efecto invernadero.

La distribución térmica evidencia una clara diferencia entre la temperatura interna del domo (*TDN\_in*) y su superficie externa, lo que confirma una transmisión efectiva de calor hacia el fluido contenido. Las temperaturas superficiales del cono (*TC*) se mantuvieron por debajo de la temperatura del domo y el reflector, alcanzando un máximo de 48.1 °C, lo que es coherente con la transferencia de calor desde las superficies absorbentes hacia el fluido.

La gráfica correspondiente muestra un ascenso térmico progresivo desde las 9:15 a.m. hasta el mediodía, seguido por un descenso moderado, comportamiento típico en sistemas solares pasivos. Es notable la coherencia entre el aumento de *TREF* y *TDN\_out* con el incremento de la radiación solar, confirmando el funcionamiento adecuado del diseño semiesférico como receptor térmico.

En la prueba #10 del prototipo final, llevada a cabo en Mixco, Guatemala, se identificaron diferencias relevantes. La temperatura máxima de la superficie externa del domo recubierto (*TDN\_out*) fue de 73.2 °C a las 11:00 a.m., coincidiendo nuevamente con el momento de

mayor irradiación. Sin embargo, se observa una menor eficiencia térmica general, especialmente en las zonas internas del sistema. La temperatura del agua ( $TC$ ) solo alcanzó  $43.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual es considerablemente inferior a la del domo, lo que sugiere una pérdida de eficiencia en la transferencia de calor.

Además, el reflector en esta prueba alcanzó un valor máximo de  $53.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , significativamente menor al registrado en el prototipo experimental, lo cual puede atribuirse a diferencias de ubicación, nubosidad parcial, o a la geometría y orientación del sistema.

Un aspecto relevante es que, en el prototipo final, la temperatura en la superficie del domo y el reflector no se mantiene estable en las horas pico, sino que presenta una ligera caída posterior a las 12:00 p.m. Esto podría estar relacionado con obstrucciones temporales de radiación solar (sombra o nubes) o con un aumento en las pérdidas térmicas por convección debido a las condiciones climáticas locales.

La comparación entre ambos sistemas permite identificar que el prototipo experimental logra una mayor consistencia térmica en las superficies clave, gracias a una geometría más eficiente y mejor aislamiento, el diferencial de temperatura entre la superficie del domo y el agua fue más amplio en el prototipo experimental, lo cual favorece la tasa de evaporación, en ambos casos, se confirma que el recubrimiento negro mate del domo permite alcanzar temperaturas superiores a los  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , condición crítica para la eficiencia del sistema.

Se concluye que el análisis de temperaturas superficiales y su variación horaria es clave para optimizar el diseño geométrico, el tipo de materiales y la orientación del sistema. La eficiencia térmica del sistema está fuertemente ligada al efecto invernadero, a la continuidad de la radiación solar incidente, y a la capacidad de minimizar pérdidas térmicas hacia el entorno.

### 10.3. Efecto invernadero en pruebas prototipo final

Durante la etapa de validación del prototipo final, se evaluaron dos versiones del cono condensador: una fabricada mediante impresión 3D con filamento PLA y otra termoformada en acrílico. Aunque el diseño original contemplaba el uso de acrílico, se optó inicialmente por la fabricación en 3D debido a la mayor facilidad para lograr una geometría uniforme, similar a la obtenida en el prototipo experimental por termoformado.

De las 10 pruebas realizadas con el prototipo final, cuatro se llevaron a cabo utilizando el cono impreso en 3D. En la prueba #1, el cono se colocó expuesto directamente al medio ambiente y a la radiación solar, replicando la configuración del prototipo experimental. Las temperaturas medidas no superaron los 50 °C, a excepción de un valor puntual de 50.3 °C registrado en el cono condensador a las 12:00 p. m. La temperatura del agua salada alcanzó los 40 °C a partir de las 11:00 a. m., aumentando progresivamente hasta un máximo de 48.33 °C. (Anexo 5).

Aunque el sistema operó durante al menos tres horas con el mínimo térmico requerido para generar evaporación, no se recolectó agua destilada en el recipiente recolector. No obstante, se observaron gotas de condensación adheridas a la superficie del cono, lo cual indica que la evaporación sí ocurrió, pero en cantidades muy reducidas, insuficientes para provocar el deslizamiento hacia la punta del cono, incluso con la aplicación de una capa antiadherente para líquidos.

El diferencial térmico promedio entre el agua salada y la superficie del cono durante esta prueba fue de apenas 2.1 °C, lo que refuerza lo observado en secciones anteriores: para que la condensación ocurra de forma efectiva y se logre la recolección de agua, debe existir un diferencial mínimo de 8 °C entre la temperatura del agua y la superficie del condensador.

Con el objetivo de reducir la temperatura superficial del cono impreso en 3D y mejorar el diferencial térmico, se aplicaron modificaciones tanto al componente como al sistema. Se recubrió el cono con pintura blanca reflectiva para disminuir la absorción de calor por radiación, y se incorporó un aislante reflectivo de poliestireno en la parte superior, actuando como barrera para la radiación directa.

Estos cambios se implementaron en la prueba #2, logrando reducir en un 10 % la temperatura superficial promedio del cono, manteniéndola en torno a 34.19 °C. Sin embargo, pese a esta reducción térmica, no se obtuvo una recolección significativa de agua destilada; únicamente se evidenció la acumulación de gotas, sin formación de flujo hacia el centro.

El análisis posterior determinó que este diseño bloqueaba el efecto invernadero, ya que el recubrimiento opaco del cono impedía el ingreso de radiación solar al interior del sistema. Al no ser traslúcido, el cono no permitía la entrada de radiación solar directa, ni retenía la radiación infrarroja emitida por las superficies internas, lo cual es un principio fundamental del efecto invernadero (Çengel, 2013). Esta ausencia afectó negativamente el comportamiento térmico general del sistema.

Ante estos resultados, se procedió a la fabricación del cono en acrílico termoformado, el cual sí permite el paso de la radiación solar. No obstante, este proceso presentó algunas limitaciones técnicas: se generaron defectos como agujeros por exceso de calor y fisuras en zonas sometidas a presión por el sistema de sellado con tuercas tipo mariposa.

A partir de la prueba #10, se empleó el cono de acrílico. Desde el momento en que se selló la última tuerca, se observó empañamiento inmediato en su superficie, lo que evidenció el inicio del ciclo de evaporación-condensación. En esta configuración, la prueba #10 mostró los mejores resultados: se produjo una acumulación constante de gotas desde la primera hora, las cuales descendían por gravedad y se depositaban en el centro del sistema, proceso que no ocurrió con el cono impreso en 3D.

Se concluye, por tanto, que no basta con optimizar el diferencial térmico entre el agua salada y el cono condensador. El efecto invernadero es un componente crítico para completar el ciclo funcional del sistema. Su ausencia limita significativamente el rendimiento del destilador solar pasivo, mientras que su incorporación, a través de materiales traslúcidos como el acrílico, permite alcanzar resultados significativos en la producción de agua destilada.

## 10.4. Agua destilada recolectada y eficiencia del sistema

En la prueba #4 del prototipo experimental, se colocaron 15 mL de agua salada en el domo evaporador. Al finalizar el ensayo, se recolectaron 5 mL de agua destilada en el recipiente recolector y se midieron 5.5 mL de agua salada remanente en el domo, lo que indica que un total de 9.5 mL se evaporaron durante las 6 horas de exposición solar. Esto representa una pérdida de 4.5 mL de vapor que no fue condensado ni recolectado, sin contar las gotas adheridas que no se desprendieron del cono condensador.

Según los cálculos teóricos, el sistema tiene capacidad para evaporar una masa de 100.8 g en 6 horas, utilizando la irradiancia promedio del mes de abril. En estas condiciones ideales, y con un suministro constante de agua que cubra completamente el área superficial de 0.00382 m<sup>2</sup>, se estima una eficiencia térmica teórica del 85 %.

Sin embargo, en condiciones experimentales reales, el sistema trabajó con un volumen limitado de 15 mL sin recarga. Suponiendo que este volumen pudiera evaporarse por completo, la eficiencia máxima alcanzable sería de 12.4 %. En la práctica, se obtuvo una eficiencia de 4.21 %, lo que representa una dispersión del 66 % respecto a la eficiencia máxima estimada. Del total de agua colocada, se evaporó el 63.33 %, y solo el 33.33 % fue recolectado como agua destilada.

En la prueba #10 del prototipo final, se colocaron 400 mL de agua salada en el sistema. Se recolectaron 32 mL de agua destilada y quedaron 350 mL de agua salada, lo que implica una evaporación de 50 mL en total, con una pérdida estimada de 22 mL de vapor no condensado ni recolectado. El período de prueba fue de 8 horas, bajo irradiancia solar directa.

De acuerdo con los cálculos teóricos, el sistema tiene capacidad para evaporar 190 g de agua en ese tiempo, bajo las condiciones solares promedio de octubre. Considerando un suministro constante de agua cubriendo el área superficial de 0.0447 m<sup>2</sup>, se estima una eficiencia térmica teórica del 7.2 %.

En el experimento, se utilizó un volumen mayor al estimado para asegurar el suministro durante todo el periodo de prueba, permitiendo así alcanzar la máxima eficiencia teórica del

sistema, que bajo estas condiciones se calcula en 15.18 %. No obstante, la eficiencia real obtenida fue de 1.89 %, con una dispersión del 5.32 % respecto al valor teórico. En términos de volumen, se evaporó el 12.5 % del agua inicial, de la cual solo el 8 % fue efectivamente recolectada como agua destilada.

En ambas pruebas, la cantidad de agua recolectada fue menor que la estimada teóricamente. Esto se debe a que los modelos teóricos consideran condiciones ideales: irradiancia constante durante toda la jornada, ausencia de nubosidad, funcionamiento isotérmico, ángulo fijo de incidencia solar, y nulas pérdidas por fugas o condensación no dirigida. En la práctica, múltiples factores afectaron el rendimiento real del sistema.

Las pérdidas de masa de vapor pueden atribuirse a varios factores de diseño y operación, tales como:

- Fugas en las uniones entre componentes.
- Pérdidas a través del sello del termómetro, que no es completamente hermético.
- Acumulación de gotas en el cono que no llegaron al punto de recolección.
- Condensación en las paredes del domo sin recubrimiento, evitando que el vapor llegara al condensador.
- Microfugas en el cono de acrílico derivadas de defectos por termoformado.
- Presencia de sombras proyectadas por objetos cercanos no contemplados en el diseño experimental, que redujeron la captación de radiación solar.

Estos elementos explican la diferencia entre los valores teóricos y los resultados prácticos, y servirán como base para futuras mejoras en el diseño, aislamiento y geometría del sistema.

## 10.5. Pruebas de salinidad

Se analizaron las muestras de agua destilada y agua salada remanente recolectadas durante la prueba #10 del prototipo final, como se muestra en las Figuras 61 y 62. Al comparar ambas muestras, se observó que la resistencia eléctrica de la muestra de agua destilada fue mayor que la del agua salada, lo cual indica una menor presencia de iones conductores, particularmente sales disueltas, en la muestra destilada. Esta diferencia evidencia una reducción significativa de la concentración de sal como resultado del proceso de destilación.

La conductividad eléctrica de ambas muestras se presenta en el Cuadro 33. Se observó que el agua destilada recolectada mostró una conductividad 22 % menor que la del agua salada, lo cual confirma la eficiencia del sistema en la remoción de sales disueltas durante el ciclo de evaporación y condensación.

Al comparar los resultados con los parámetros establecidos por la norma NGT 29001, se determinó que la conductividad eléctrica del agua destilada se encuentra por debajo del límite máximo permisible, por lo que cumple con los requisitos para considerarse adecuada para el consumo humano en términos de salinidad.

Asimismo, según los criterios establecidos por la norma ASTM D1193-91, el valor de conductividad obtenido clasifica la muestra dentro del Tipo III de agua destilada, lo que respalda aún más la efectividad del sistema como tecnología de purificación.

En consecuencia, se concluye que el sistema es capaz de entregar al usuario final un agua con niveles aceptables de concentración de sales, apta para consumo humano desde el punto de vista de la conductividad eléctrica.

Sin embargo, es importante señalar que, aunque la muestra recolectada cumple con los límites de salinidad establecidos, la prueba de conductividad representa solo una de las seis pruebas físicas y organolépticas requeridas por la norma NGT 29001 para declarar un agua como completamente potable. Por lo tanto, se recomienda complementar el análisis con las pruebas restantes para confirmar la calidad integral del agua producida por el sistema.

## 10.6. Cumplimiento de requisitos

Cuadro 35. Verificación de cumplimiento de requisitos y justificación.

<b>CÓDIGO</b>	<b>REQUISITO</b>	<b>Cumplido o no</b>	<b>Justificación</b>
R-DIS01	Debe reflejar la mayor incidencia solar en la hora solar definida.	si	
R-DIS02	Debe colocarse con una inclinación que maximice la captación de irradiancia en la ubicación de funcionamiento	si	
R-DIS03	El material reflectivo debe tener un rango de 0.8 y 0.95 de emisividad	si	
DE-DIS01	Debe maximizar la absorción de energía térmica reflejada.	si	
DE-DIS02	Debe distribuir uniformemente el calor sobre el agua salada.	si	
DE-DIS03	No debe presentar deformación por expansión térmica.	si	
DE-DIS04	El agua salada debe tener al menos 10 cm de profundidad.	si	
CC-DIS01	Debe estar expuesto a circulación de aire exterior.	si	
CC-DIS02	El diámetro de su base debe ser igual al diámetro del domo.	si	
CC-DIS03	La superficie del condensador debe ser deslizante.	si	
DE-REND01	El agua salada debe alcanzar una temperatura de 40 °C para su evaporación.	si	
DE-REND02	Debe evaporar por lo menos el 10 % del agua almacenada durante un ciclo de prueba	si	

CC-REND01	Debe condensar la mayor cantidad posible de masa de agua evaporada.	no	Pérdidas por condensación en zonas no canalizadas, diferencial térmico insuficiente en algunas pruebas y fugas menores en el sistema, lo cual redujo la eficiencia de recolección del vapor.
CC-REND02	La temperatura superficial del domo debe ser de mínimo de 45 °C.	si	
G-REND01	El agua recolectada debe cumplir con la norma NTG 20091 para conductividad eléctrica permisible en agua de consumo humano	si	
G-REND02	El agua recolectada debe cumplir con la es estándar ASTM D1193-91 de conductividad eléctrica para clasificar el agua como agua destilada.	si	
G-ACCS01	Debe ser montado y desmontado por una persona.	si	
G-ACCS02	El ensamble debe constar de tornillería y roscas de fácil adquisición en ferreterías locales.	si	
G-COS01	El costo total del sistema no debe exceder Q1,000.00.	si	
G-DIS01	La longitud del sistema no debe exceder 1 m de extensión.	si	
G-MAN01	Debe ser de fácil mantenimiento empleando utensilios de limpieza domésticos.	si	
G-REND01	Las partes metálicas deben tener alta resistencia a la corrosión.	si	
S-DIS01	El sistema completo debe estar herméticamente sellado.	no	

---

## 11. Conclusiones

---

- El sistema de destilación solar pasivo demostró ser funcional, evidenciando el ciclo completo de evaporación y condensación en ambas versiones del prototipo, con acumulación visible de gotas y recolección parcial de agua destilada.
- El recubrimiento negro mate aplicado al domo evaporador fue determinante para maximizar la captación y retención de calor. Las zonas recubiertas alcanzaron temperaturas superiores a 70 °C, mientras que las áreas sin recubrimiento se mantuvieron en valores significativamente menores, determinando su importancia en la eficiencia térmica.
- Se estableció que el diferencial térmico mínimo requerido para lograr una condensación efectiva es de 8 °C entre la temperatura del agua salada y la superficie del condensador. Al ser este diferencial inferior (como en el cono 3D de PLA), no se logró recolectar agua, pese a observarse una evaporación parcial.
- La inclusión del efecto invernadero resultó ser un factor crítico para el funcionamiento eficiente del sistema. El cono impreso en 3D, al ser opaco, bloqueó el ingreso de radiación solar y redujo significativamente la eficiencia del sistema, mientras que el cono de acrílico termoformado, al ser traslúcido, permitió el ingreso de radiación y facilitó el ciclo térmico completo.
- Las temperaturas superficiales máximas se alcanzaron entre las 11:00 a.m. y 12:00 p.m., coincidiendo con el pico de irradiancia solar, y fueron mayores en el prototipo experimental que en el prototipo final, lo que refleja mejor aislamiento y captación térmica en el primer prototipo
- A nivel de eficiencia, el prototipo experimental obtuvo una eficiencia real de 4.21 % frente a una máxima estimada de 12.4 %, mientras que el prototipo final alcanzó 1.89 %, frente a una estimación de 15.18 %. Las diferencias se atribuyen a pérdidas por fugas, condiciones climáticas, errores de fabricación y diseño no óptimo del condensador.

- En cuanto a calidad del agua, la muestra recolectada en la prueba #10 presentó un 22 % menos conductividad eléctrica que el agua salada, cumpliendo con los límites establecidos por la norma NGT 29001 y clasificándose como agua destilada tipo III según la norma ASTM D1193-91, lo cual valida la reducción de salinidad en el proceso.
- A pesar de los resultados positivos, se identificaron limitaciones estructurales y térmicas en el sistema, lo que indica que es necesario mejorar la hermeticidad del sello, la calidad del cono condensador y la protección contra interferencias solares externas para incrementar la eficiencia global del sistema.

---

## 12. Recomendaciones

---

Se recomienda realizar un análisis detallado de transferencia de calor en el cono condensador, ya que el presente estudio se centró principalmente en el comportamiento térmico del domo evaporador para maximizar la evaporación del agua salada. Sin embargo, orientar el análisis hacia el condensador podría abrir nuevas oportunidades de mejora en la eficiencia del sistema, al optimizar la fase de condensación y recolección del agua destilada.

La irradiancia solar utilizada en los cálculos teóricos fue obtenida a partir de estimaciones proporcionadas por la plataforma Global Solar Atlas para el año 2025. Estos valores corresponden a proyecciones mensuales promedio y no reflejan con exactitud la irradiancia real del día en que se realizaron las pruebas experimentales, lo que pudo contribuir a la dispersión observada entre los datos teóricos y los resultados medidos. Por ello, se recomienda el uso de plataformas, herramientas digitales o dispositivos de medición en tiempo real, que permitan registrar datos de irradiancia solar específicos del momento de la prueba, con el fin de mejorar la precisión en futuros análisis térmicos y comparaciones experimentales.

Dado que el sistema prototipo opera bajo exposición directa a radiación solar durante períodos prolongados, se recomienda implementar medidas de protección personal para resguardar la integridad física del experimentador. Esto incluye el uso de bloqueador solar, lentes con protección UV, camisas de manga larga, sombreros o gorras, y prendas que cubran la piel expuesta. Estas precauciones son fundamentales para prevenir efectos adversos por sobreexposición a la radiación solar durante la ejecución de las pruebas en campo

Se recomienda reajustar el diseño del sistema para permitir su orientación según la inclinación solar correspondiente a la ubicación geográfica y la época del año en que será utilizado. Esta capacidad de ajuste facilitará su adaptación a diferentes latitudes y

estaciones, optimizando la captación de radiación solar directa y, en consecuencia, mejorando el rendimiento térmico del sistema.

Se recomienda utilizar recipientes de medición con mayor precisión y resolución, que permitan observar con mayor exactitud la disminución del volumen de agua salada antes y después de cada prueba. Esto facilitará la obtención de datos más confiables sobre los volúmenes evaporados y recolectados, y contribuirá a reducir el margen de error humano en las mediciones experimentales.

Se recomienda utilizar un conductímetro de laboratorio en lugar de un multímetro para las pruebas de conductividad eléctrica, ya que, aunque el multímetro permitió obtener medidas aproximadas de resistencia, no está diseñado específicamente para evaluar la conductividad de soluciones líquidas. El uso de un conductímetro garantiza mayor precisión, confiabilidad y trazabilidad en los resultados, cumpliendo con los estándares establecidos para la caracterización fisicoquímica del agua.

Se recomienda realizar la prueba completa de potabilidad del agua destilada en un laboratorio de análisis químico acreditado, conforme a los parámetros establecidos por la norma COGUANOR NTG 29001. Si bien las pruebas de conductividad realizadas indicaron una reducción significativa en la concentración de sales, dicha medición representa solo uno de los requisitos fisicoquímicos y organolépticos exigidos por la norma para considerar el agua apta para consumo humano. La validación en laboratorio permitirá confirmar la inocuidad del agua recolectada y garantizar el cumplimiento integral de los estándares de calidad.

---

## 13. Referencias

---

- Ahmed, H. M., Ibrahim, G., Alfiras, M., & Mutasher, S. A. (2023). Experimental assessment of hemispherical solar still design with reflectors. 2023 IEEE 8th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), 1–6.
- Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Using solar energy to desalinate water. *Solar Energy*, 86(10), 3247–3255. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.015>
- Al Nadabi, A., & Karthikeyan, G. R. D. B. (2023, agosto 10). Performance investigation on a double-slope passive solar desalination system targeting towards sustainable development of Oman. *Energies*.
- ASTM International. (1991). ASTM D1193-91: Standard specification for reagent water. ASTM International. <https://www.astm.org/>
- Aybar, H. S. (2017). A review of solar desalination systems and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 747–758.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa* (4.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- Chandler, D. L. (2020, febrero 6). Desalination system could produce freshwater that is cheaper than tap water. MIT News. <https://news.mit.edu/2023/desalination-system-could-produce-freshwater-cheaper>
- Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR). (2002). NTG 29001: Agua potable. Requisitos. Ministerio de Economía de Guatemala. <https://conformidad.mineco.gob.gt>
- Conductivity in water, salinity and specific conductance measurement. (s. f.). YSI. <https://www.ysi.com/parameters/conductivity>
- Consejo Departamental de Desarrollo del Departamento de Santa Rosa. (2025). Plan de desarrollo departamental 2011–2025. SEGEPLAN.
- Desu Technology (Shanghai) Co., Ltd. (2024). PETG sheet roll: Polyethylene terephthalate glycol sheet for thermoforming. <https://desuplastic.com/pet-sheet/petg-sheet/>

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes (4th ed.). Wiley.
- Essa, M. A., Eewayed, E. N., Gobran, M. H., & Mostafa, N. H. (2020). Passive solar desalination systems: Classification, study parameters and future trends. *Engineering Sciences and Technology*. <https://eijest.journals.ekb.eg/>
- Gámez, M. J. (2015, septiembre 17). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Naciones Unidas Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Global Solar Atlas. (s. f.). Global Solar Atlas. World Bank Group & Solargis. <https://globalsolaratlas.info>
- Hilarydoss, S. (2023). A detailed review on various aspects of inverted solar still desalination systems proposed for clean water production. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30760-w>
- Kondo Plastics Co. (2024). Technical data sheet: PETG thermoforming properties. <https://www.kondoplastics.com>
- Lgalvez, P. (s. f.). Agua segura y saneamiento. Habitatguate. <https://habitatguate.org>
- Mohmooda, M. A., Salih, M. M. M., Alomar, O. R., & Mohammed, K. H. (2023, diciembre 15). An experimental study on performance analysis of solar water distiller system using extended fins under Iraq climatic conditions. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0171639>
- Narayanan, S. S., Yadav, A., & Khaled, M. N. (2019). A concise review on performance improvement of solar stills. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.111>
- Palma, F. (2018, julio 11). Acceso al agua, indispensable para el bienestar. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <https://www.undp.org/es/guatemala/blog/acceso-al-agua-indispensable-para-el-bienestar>
- Quan, I. (2022). Desalinización y purificación de agua marítima de la Costa Sur de Guatemala por medio de la fabricación de un destilador solar [Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala].
- Rubio, E. (2023, septiembre 3). Destilación solar pasiva de agua de mar. *MasScience*.

- <https://www.masscience.com/destilacion-solar-pasiva-de-agua-de-mar/>
- Salinas Freire, H. A., Pérez Ones, O., & Rodríguez Muñoz, S. (2019). Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos. *Revista ION*.
- Samp, J. (2025, abril 14). Understanding and calculating electrical conductivity. *Sensorex Liquid Analysis Technology*. <https://sensorex.com/understanding-and-calculating-electrical-conductivity/>
- Sampathkumar, K., Arjunan, T. V., Pitchandi, P., & Senthilkumar, P. (2010). Active solar distillation—A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(6), 1503–1526. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.023>
- Signorato, F., Morciano, M., Bergamasco, L., Fasano, M., & Asinari, P. (2020). Exergy analysis of solar desalination systems based on passive multi-effect membrane distillation. *Energy Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.02.005>
- Universidad de Tarapacá. (2018). Implementación de destiladores solares para comunidades rurales del norte de Chile. *Revista de Tecnologías Sustentables*, 12(3), 44–53.
- Zayed, M. E., Attia, M. E. H., Kabeel, A. E., Abdel-Aziz, M., & Abdelgaied, M. (2023). Optimal configuration of a semi-corrugated basin with inverted solar concentrator for performance augmentation of hemispherical shaped solar distiller: A comparative experimental investigation. *Desalination and Water Treatment*, 302, 53–64. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29763>
- Zhang, L., Xu, Z., Zhao, L., Bhatia, B., Zhong, Y., Gong, S., & Wang, E. N.. (2021). Passive, high-efficiency thermally localized solar desalination. *Energy & Environmental Science*, 14(4), 1771–1793. *Energy & Environmental Science*, 14(4), 1771–1793. <https://doi.org/10.1039/D0EE03991H>.

Anexo 1. Promedio de irradiancia solar directa por hora para el departamento de Santa Rosa año 2025

**Average hourly profiles**  
Direct normal irradiation [Wh/m<sup>2</sup>]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6					8	13	1					
6 - 7	45	81	160	236	200	225	220	213	206	220	178	125
7 - 8	480	483	492	444	323	340	356	375	365	381	468	502
8 - 9	598	578	555	506	372	362	405	416	394	400	518	596
9 - 10	650	614	614	552	406	376	442	454	417	405	543	645
10 - 11	671	653	658	593	435	401	476	488	422	396	549	657
11 - 12	683	689	689	606	445	393	483	484	422	393	537	643
12 - 13	674	691	679	590	457	397	486	452	389	387	527	631
13 - 14	654	666	652	580	407	372	463	400	331	376	521	604
14 - 15	632	645	636	541	354	292	391	346	271	357	495	580
15 - 16	591	605	587	455	285	231	333	296	227	310	446	530
16 - 17	505	537	491	342	198	179	267	254	193	257	281	346
17 - 18		204	187	121	94	134	194	154	76			
18 - 19												
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	6,182	6,447	6,399	5,567	3,984	3,716	4,518	4,330	3,712	3,883	5,062	5,860

Fuente: Global Solar Atlas, 2025

Anexo 2. Promedio de irradiancia solar directa por hora para Ciudad de Guatemala año 2025

**Average hourly profiles**  
Direct normal irradiation [Wh/m<sup>2</sup>]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6					9	12	1					
6 - 7	48	61	141	205	182	213	209	203	189	205	167	124
7 - 8	459	451	457	421	318	335	347	363	354	376	448	489
8 - 9	595	585	583	547	420	404	418	442	442	442	533	598
9 - 10	665	665	671	630	493	446	465	504	503	489	572	665
10 - 11	696	712	721	679	524	466	514	538	508	477	587	685
11 - 12	712	736	740	678	512	443	514	523	484	463	576	686
12 - 13	701	738	730	647	499	428	505	476	422	427	565	656
13 - 14	674	709	694	598	431	400	475	415	338	412	553	629
14 - 15	650	677	656	532	357	309	412	369	296	378	521	595
15 - 16	601	622	589	444	291	250	350	322	248	339	466	555
16 - 17	508	543	482	332	206	192	289	272	208	270	359	455
17 - 18	166	271	299	189	121	143	210	198	104	79	43	66
18 - 19					6	20	32	7				
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	6,475	6,771	6,763	5,904	4,369	4,060	4,740	4,631	4,095	4,357	5,390	6,202

Fuente: Global Solar Atlas, 2025

Anexo 3. Promedio de irradiancia solar directa por hora para municipio de Mixco año 2025

### Average hourly profiles

Direct normal irradiation [Wh/m<sup>2</sup>]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6					8	13	1					
6 - 7	45	81	160	236	200	225	220	213	206	220	178	125
7 - 8	480	483	492	444	323	340	356	375	365	381	468	502
8 - 9	598	578	555	506	372	362	405	416	394	400	518	596
9 - 10	650	614	614	552	406	376	442	454	417	405	543	645
10 - 11	671	653	658	593	435	401	476	488	422	396	549	657
11 - 12	683	689	689	606	445	393	483	484	422	393	537	643
12 - 13	674	691	679	590	457	397	486	452	389	387	527	631
13 - 14	654	666	652	580	407	372	463	400	331	376	521	604
14 - 15	632	645	636	541	354	292	391	346	271	357	495	580
15 - 16	591	605	587	455	285	231	333	296	227	310	446	530
16 - 17	505	537	491	342	198	179	267	254	193	257	281	346
17 - 18		204	187	121	94	134	194	154	76			
18 - 19												
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	6,182	6,447	6,399	5,567	3,984	3,716	4,518	4,330	3,712	3,883	5,062	5,860

Fuente: Global Solar Atlas, 2025

#### Anexo 4. Código de Octave para cálculo de temperaturas teóricas

##### Código de programación Octave:

```
% -----
% Cálculo de Ts_reflector, Talrd y Ts_domo
% con radiación directa, reflejada y aporte solar absorbido
% Basado en Cengel (Transferencia de Calor y Masa, 4a ed.)
% Autor: Amy Toledo
% -----

clear; clc;

% --- PARÁMETROS FÍSICOS DEL SISTEMA ---
sigma = 5.6703e-8;    % Constante de Stefan-Boltzmann [W/m²·K⁴]
alpha_ref = 0.90;    % Absortancia del reflector (pintura negra mate)
epsilon_ref = 0.85;   % Emisividad del reflector
epsilon_domo = 0.95;  % Emisividad del domo acrílico
alpha_domo = 0.90;   % Absortancia del domo
h_conv = 3.5;        % Coeficiente de convección [W/m²·K]
k_acrilico = 0.19;   % Conductividad térmica del acrílico [W/m·K]
dx = 0.003;         % Espesor del domo [m]
```

```

T_amb = 24 + 273.15;    % Temperatura ambiente [K]
T_agua = 29.4 + 273.15; % Temperatura inicial del agua salada [K]

% --- FACTOR DE CONCENTRACIÓN DEL REFLECTOR ---
Cf = 2.5;                % Ajustable (1.5 a 3.0 según geometría real)

% --- CONFIGURACIÓN DEL RANGO DE HORAS ---
hora_inicio = 8;        % Hora inicial (por ejemplo, 8 = 8:00 am)
hora_fin = 15;          % Hora final (por ejemplo, 15 = 3:00 pm)

% --- LISTADO DE IRRADIANCIA SOLAR DIRECTA (W/m²) ---
% El número de valores en G debe coincidir con el número de horas
simuladas.
% Ejemplo: de 8:00 a 15:00 son 8 valores
G = [399; 608; 603; 828; 809; 738; 527; 415];

% Validación automática
num_horas = hora_fin - hora_inicio + 1;
if length(G) != num_horas
    error("El número de valores en G (%d) no coincide con el rango horario
(%d a %d = %d horas).", ...
        length(G), hora_inicio, hora_fin, num_horas);
endif

% --- Vectores de resultados ---
Ts_reflector = zeros(size(G));
Talrd = zeros(size(G));
Ts_domo = zeros(size(G));

% --- Cálculo hora por hora ---
for i = 1:length(G)

    % 1. Temperatura del reflector
    Ts_reflector(i) = ((G(i) * alpha_ref) / (epsilon_ref * sigma))^(1/4);

    % 2. Temperatura radiante efectiva del entorno (Talrd)
    Q_rad_ref = h_conv * (Ts_reflector(i) - T_amb);
    Talrd(i) = ((Ts_reflector(i)^4 - Q_rad_ref/(epsilon_ref *
sigma)))^(1/4);
endfor

```

```

% Corrección mínima (aire confinado)
Talrd(i) = max(Talrd(i), 318.15); % 45 °C mínimo

% 3. Cálculo iterativo de Ts_domo
Ts_guess = T_agua;
tol = 1e-3;
err = 1;

while err > tol
    % (a) Ganancia solar absorbida
    q_solar = alpha_domo * Cf * G(i);

    % (b) Conducción hacia el agua
    q_cond = k_acrilico * (Ts_guess - T_agua) / dx;

    % (c) Convección con el aire caliente
    q_conv = h_conv * (Ts_guess - Talrd(i));

    % (d) Radiación con el aire caliente
    q_rad_air = epsilon_domo * sigma * (Ts_guess^4 - Talrd(i)^4);

    % (e) Radiación directa del reflector
    F_ref_domo = 1;
    q_ref_direct = F_ref_domo * epsilon_domo * sigma *
(Ts_reflector(i)^4 - Ts_guess^4);

    % (f) Balance total
    Ts_new = T_agua + dx/k_acrilico * (q_conv + q_rad_air +
q_ref_direct + q_solar);

    err = abs(Ts_new - Ts_guess);
    Ts_guess = Ts_new;
endwhile

Ts_domo(i) = Ts_guess;

endfor

% --- CONVERSIÓN A °C ---

```

```

Ts_reflector_C = Ts_reflector - 273.15;
Talrd_C = Talrd - 273.15;
Ts_domo_C = Ts_domo - 273.15;

% --- IMPRESIÓN TABULAR DE RESULTADOS ---
fprintf('\n-----\n');
fprintf(' HORA      G(W/m2)      Ts_reflector(°C)      Talrd(°C)
Ts_domo(°C)\n');
fprintf('-----\n');

for i = 1:length(G)
    hora = hora_inicio + (i - 1);
    fprintf(' %2d:00 %6.1f      %8.2f      %8.2f      %8.2f\n', ...
        hora, G(i), Ts_reflector_C(i), Talrd_C(i), Ts_domo_C(i));
endfor

fprintf('-----\n');

% --- GRÁFICA COMPARATIVA ---
figure;
horas = hora_inicio:hora_fin;
plot(horas, Ts_reflector_C, '-or', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(horas, Talrd_C, '-og', 'LineWidth', 1.5);
plot(horas, Ts_domo_C, '-ob', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Hora del día');
ylabel('Temperatura (°C)');
title('Evolución de Ts_{reflector}, Talrd y Ts_{domo} (modelo
completo)');
legend('T_{s,reflector}', 'T_{alrd}', 'T_{s,domo}', 'Location',
'northwest');
grid on;

```

Anexo 5. Registro de mediciones de temperaturas en pruebas experimentales de prototipo experimental y prototipo final

PRUEBA #2	FECHA: 9-10-2025
-----------	------------------

DATOS

UBICACIÓN	ZONA 11 CIUDAD	
TIPO	AGUA NO SALADA	
VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA	400	ml
TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA	26	°C
TEMPERATURA MÍNIMA DEL DÍA	17	°C

TEMPERATURA (°C)	CODIGO	HORARIO SOLAR							
		8:00	9:00	10:00	11:00	12	13:00	14:00	15:00
TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	TDN_in	21.3°C 69°F	40°F	100°F	109°F	112°F	119°F	114°F	99°F
TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	TDN_out	24.2°C	40.3°C	49.6°C	40.7°C	46.7°C	47.8°C	48.1°C	56.7°C
TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	TDA_out	21.0°C	29.5°C	40.3°C	35.9°C	46.3°C	42.1°C	41.9°C	32.9°C
TEMPERATURA CONO	TC	22.0°C	27.8°C	43.9°C	38.2°C	50.8°C	50.6°C	43.9°C	33.7°C
TEMPERATURA REFLECTOR	Tref	11.0°C	27.8°C	37.7°C	37.7°C	46.5°C	39.2°C	44.3°C	34.1°C

34.0°C

VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA		ml
VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA		ml

PRUEBA #2	FECHA: 10-10-25
-----------	-----------------

DATOS

UBICACIÓN	ZONA 11 CIUDAD	
TIPO	AGUA NO SALADA	
VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA	400	ml
TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA		°C
TEMPERATURA MÍNIMA DEL DÍA		°C

TEMPERATURA (°C)	CODIGO	HORARIO SOLAR							
		08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	
TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	TDN_in	75°F	80°F	92°F	108°F	118°F	118°F		
TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	TDN_out	25.3°C	29°C	35.8°C	57.7°C	66.1°C	53.3°C		
TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	TDA_out	25.1°C	25.4°C	31.1°C	38.7°C	42.5°C	44.1°C		
TEMPERATURA CONO	TC	26.4°C	27.5°C	33.9°C	33.9°C	51°C	45.9°C		
TEMPERATURA REFLECTOR	Tref	7.3°C	-3°C	11°C	21.1°C	0.8°C	-2.9°C		

VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA		ml
VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA		ml

PRUEBA #5	FECHA: 13 Oct 2025
-----------	--------------------

DATOS

UBICACIÓN	ZONA 11 CIUDAD	
TIPO	AGUA NO SALADA	
VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA	400	ml
TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA		°C
TEMPERATURA MINIMA DEL DÍA		°C

		HORARIO SOLAR					
		SIN SOL	50% NUB	50% NUB	NUBADO NUB		
		13	18°C	20°C	21°C	22°C	23°C
TEMPERATURA (°C)	CODIGO	7:30	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	TDN_in	68°F	72°F	78°F	86°F	89°F	92°F
TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	TDN_out	24°C	22.1°C	28.8°C	34.9°C	30.7°C	31°C
TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	TDA_out	22.9°C	20.5°C	23.4°C	28.9°C	26.2°C	27.5°C
TEMPERATURA AISLANTE REFLECTIVO	TAIS	15°C	4.8°C	-2°C	9.7°C	17.1°C	16.6°C
TEMPERATURA CONO	TC	20.9°C	21.6°C	28.9°C	31.6°C	27.7°C	29°C
TEMPERATURA REFLECTOR	Tref	22°C	21.8°C	27.7°C	30.9°C	26.3°C	32.4°C

VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA	48	ml
VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA		ml

PRUEBA #5	FECHA: 15-10-25
-----------	-----------------

DATOS

UBICACIÓN	ZONA 11 CIUDAD	
TIPO	AGUA NO SALADA	
VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA	400	ml
TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA		°C
TEMPERATURA MINIMA DEL DÍA		°C

		HORARIO SOLAR		
		SOL 20	SOL 25	NUB 23
TEMPERATURA (°C)	CODIGO	10:30	12:00	13:10
TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	TDN_in	24.5	36.8°C	33.9
TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	TDN_out	40.9	40.3°C	33.2
TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	TDA_out	26.3	34.1°C	29.0
TEMPERATURA AISLANTE REFLECTIVO	TAIS	23.0	15°C	16.5
TEMPERATURA CONO	TC	29.1	32.3°C	30.0
TEMPERATURA REFLECTOR	Tref	36.0	40°C	32.3

VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA	40.8	ml
VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA		ml

PRUEBA # 6 FECHA: 16-10-2025

DATOS GENERALES

UBICACIÓN	ZONA 11 CIUDAD
TIPO	AGUA NO SALADA
VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA	ml 400
TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA	°C
TEMPERATURA MÍNIMA DEL DÍA	°C

		HORARIO SOLAR						
		CLIMA	50L	50L	50L	NUB	NUB	NUB
		TEMP	20°	22°	23°	24°	24°	24°
TEMPERATURA (°C)	CODIGO		9:00	10:10	11:04	12:10		13:17
TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	TDN_in		27.9	33.1	36.6	31.8		
TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	TDN_out		28.5	36.5	31.6	35.9		
TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	TDA_out		24.3	32.5	31.0	32.9		
TEMPERATURA AISLANTE REFLECTIVO	TAIS		16.2	14.6	6.4	18.6		
TEMPERATURA CONO	TC		25.1	31.8	31	37.0		
TEMPERATURA REFLECTOR	Tref		25.9	34.8	29.5	33.3		
TEMPERATURA ESPEJO			27.1	43.8	32.8	34.7		

VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA		ml
VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA	X	ml

6.4 EN EL RECIPIENTE  
 7.4 CONDENSADO EN EL CONO

NOTA: POSIBLE FILTRACION DE AGUA RESIDUAL POR ORIFICIO DE INSPECCION EN CONO

PRUEBA # FECHA: 17-OCT-2025

DATOS GENERALES

UBICACIÓN	ZONA 11 CIUDAD
TIPO	AGUA NO SALADA
VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA	400 ml
TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA	°C
TEMPERATURA MÍNIMA DEL DÍA	°C

		HORARIO SOLAR			
		CLIMA	50L	50L	NUBADO
		TEMP	23°		
TEMPERATURA (°C)	CODIGO		10:00	11:39	1:10
TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	TDN_in		33	34.5	
TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	TDN_out		34.4	47.4	
TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	TDA_out		29.1	35.7	
TEMPERATURA AISLANTE REFLECTIVO	TAIS		3.7	20.1	
TEMPERATURA CONO	TC		29.5	33.8	
TEMPERATURA REFLECTOR	Tref		30.2	37.1	
TEMPERATURA ESPEJO			37.1	43.6	

VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA		ml
VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA	2.8	ml

1 ml recogiendo en recipiente  
 1.8 ml " " como

PRUEBA #	CONO ACRILICO	FECHA: 23-10-2025
----------	---------------	-------------------

DATOS GENERALES

UBICACIÓN	ZONA 11 CIUDAD
TIPO	AGUA NO SALADA
VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA	400 ml
TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA	29 °C
TEMPERATURA MÍNIMA DEL DÍA	20 °C

HORARIO SOLAR							
	9:00	10:30	13:20	13:45			
CLIMA	SOL SOL	SOL NUB	NUB	NUB			
TEMP	20°	22°	29°	29°			

CODIGO	TEMPERATURA (°C)						
TDN_in	TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	30.9	37.9	34.2			
TDN_out	TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	30.0	36.5	30.7			
TDA_out	TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	24.4	31.4	27.7			
TC	TEMPERATURA CONO	25.3	31.2	28.7			
Tref	TEMPERATURA REFLECTOR	25.1	31.3	28.5			

Recolectada

VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA	5 + 22 = 27	ml
VOLUMEN CONDENSADO AGUA DESTILADA	1.5	ml
VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA	399	ml

PRUEBA #	CONO ACRILICO	FECHA: 24 OCT 2025
----------	---------------	--------------------

DATOS GENERALES

UBICACIÓN	ZONA 11 CIUDAD
TIPO	AGUA NO SALADA
VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA	400 ml
TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA	°C
TEMPERATURA MÍNIMA DEL DÍA	°C

HORARIO SOLAR							
	9:10	10:10	11:15	12:20	13:20	14:40	15:55
CLIMA	SOL NUB	SOL SOL	SOL SOL	SOL SOL	SOL SOL	SOL SOL	SOL SOL
TEMP	20°	21°	22°	23°	24°	23°	22°

CODIGO	TEMPERATURA (°C)						
TDN_in	TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	30.	38.6	36.9	39.2	41.4	36.9
TDN_out	TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	29.4	35.5	35.1	38.4	37.5	33.8
TDA_out	TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	30.6	24.9	34.3	38.9	37.9	36
TC	TEMPERATURA CONO	26.9	33.6	29.5	30.5	33	33.5
Tref	TEMPERATURA REFLECTOR	29.2	32.2	31.9	38.9	33.8	32.8

VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA	4 + 4 + 4.5 = 12.5	ml
VOLUMEN CONDENSADO AGUA DESTILADA	2	ml
VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA		ml

PRUEBA #	CONO ACRILICO	FECHA: 25-OCT 2025
----------	---------------	--------------------

DATOS GENERALES

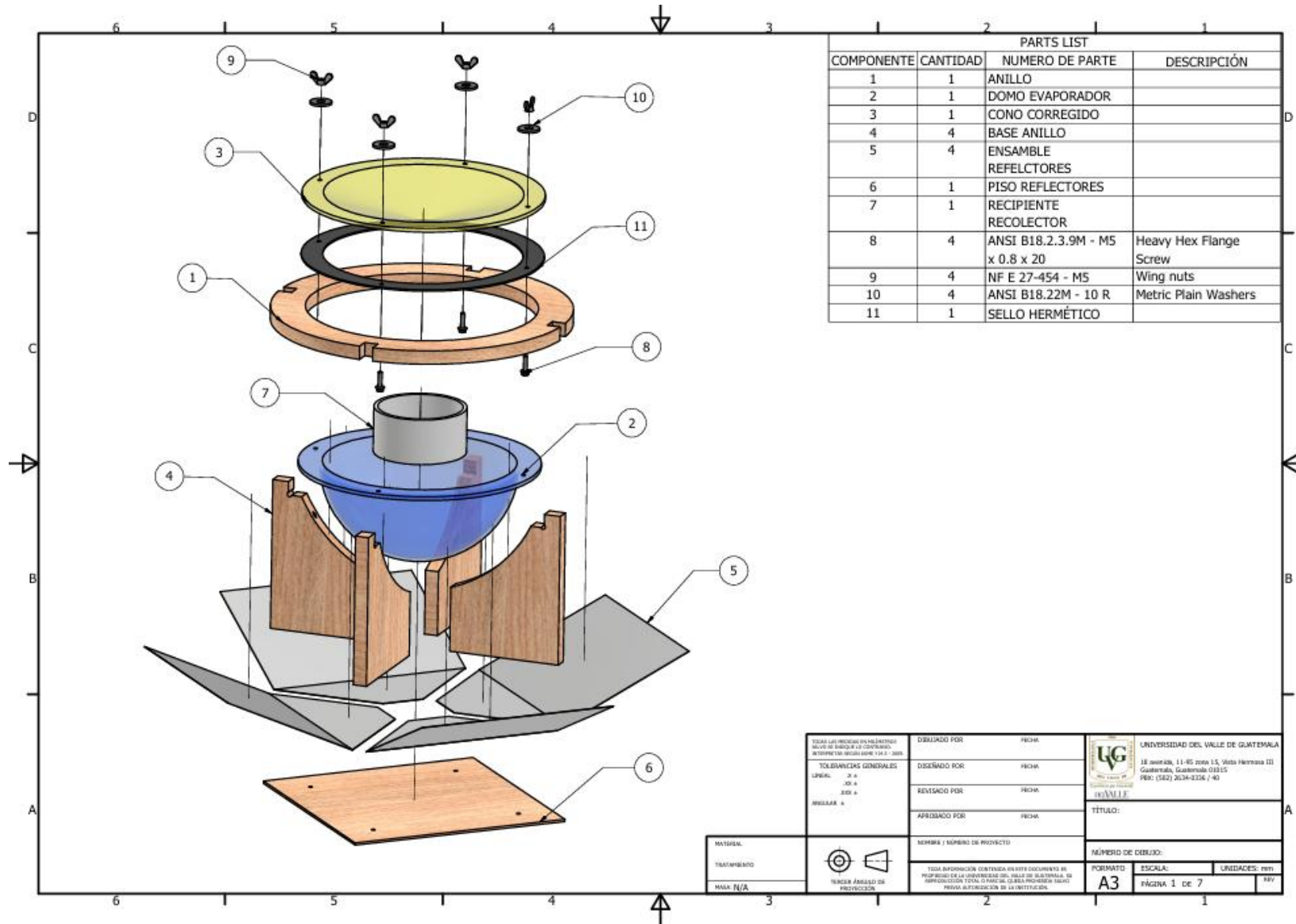
UBICACIÓN	ZONA 11 CIUDAD
TIPO	AGUA NO SALADA
VOLUMEN INICIAL AGUA SALADA	400 ml
TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA	°C
TEMPERATURA MÍNIMA DEL DÍA	°C

		HORARIO SOLAR						
		8:40	10:10	11:00				
CLIMA		SOL	SOL	SOL				
TEMP		19	22	23				
CÓDIGO	TEMPERATURA (°C)							
TDN_in	TEMPERATURA DOMO INTERNO NEGRO	25.7	41.4	49				
TDN_out	TEMPERATURA DOMO EXTERNO NEGRO	29.1	32.5	40.4				
TDA_out	TEMPERATURA DOMO EXTERNO ACRILICO	27.7	32.9	38.9				
TC	TEMPERATURA CONO	24.7	30.4	38				
Tref	TEMPERATURA REFLECTOR	28.1	35.7	38.1				

VOLUMEN RECOLECTADO AGUA DESTILADA		ml
VOLUMEN CONDENSADO AGUA DESTILADA		ml
VOLUMEN RESTANTE AGUA SALADA		ml

15 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 3  
 4 32ml

## Anexo 6. Planos de sistema desalinizador pasivo prototipo final



TITULO: MATERIA: TRANSFORMADO: MAX: N/A		DISEÑADO POR: FECHA: DISEÑADO POR: FECHA: REVISADO POR: FECHA: APROBADO POR: FECHA: NOMBRE / NUMERO DE PROYECTO:		UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 AVENIDA 11-95 ZONA 15, VILLA HERMINIA III GUATEMALA, GUATEMALA 011515 FÓN: (502) 2034-8336 / 40 TÍTULO: NÚMERO DE DISEÑO:	
TOLERANCIAS GENERALES LINEAL: ± 0.4 ANG: ± 0.4 PERFORA: ± 0.4		ESCALA: A3 PÁGINA 1 DE 7		UNIDADES: mm REV:	

