

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA



**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNO-ECONOMICO DE UN SISTEMA
DE CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR
TÉRMICA, PARA LA ACTIVACIÓN DE UNA INNOVADORA MÁQUINA
QUE PRODUCE AGUA Y ENFRIAMIENTO”**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA
PRESENTA:

LUIS ANTONIO LÓPEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. NICOLÁS VELÁZQUEZ LIMÓN

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. SAÚL ISLAS PEREDA

MEXICALI, B.C., MÉXICO A JUNIO DE 2025.

Dedicatoria

Con todo el cariño y amor que les tengo a mis padres y hermana, dedico este trabajo de tesis a ellos, quienes han sido un soporte vital para mí en este proceso de formación profesional y personal. Sin su presencia, no sería posible encontrarme en el lugar en el que estoy ahora. Son mi fuente de inspiración, gracias a la cual he aprendido a valorar el esfuerzo propio y, sobre todo, a saber, que siempre estarán para mí.

A las personas que me acompañaron en este recorrido, en especial a mis maestros y compañeros de trabajo, quienes fueron una fuente constante de aprendizaje, agradezco profundamente a cada uno por los momentos compartidos durante esta experiencia y por hacer que cada instante fuera lo más ameno posible.

Agradecimiento

Dr. Nicolas Velázquez Limón y Dr. Saúl Islas Pereda

Agradezco profundamente que me hayan considerado como su alumno en este posgrado, lo cual representa un gran significado para mí. Gracias por mostrarme el mundo de la investigación y todas las maravillas que lo rodean. Agradezco las enseñanzas que hoy puedo transmitir a otros y, sobre todo, les doy las gracias por su tiempo y por la paciencia que siempre mostraron hacia mí.

Para el **Dr. Armando Aguilar, Dr. Ernesto López, M.I. Juan Ríos y M.I. Cristian Casares**, mi más sincero agradecimiento por el apoyo brindado y por los buenos momentos compartidos durante el desarrollo del proyecto. A cada uno les agradezco por tomarse el tiempo para orientarme y ayudarme en mi investigación, con el objetivo de mejorarla constantemente. Sobre todo, gracias por los valiosos recuerdos que me llevo de todo este proceso.

A **José Daniel Gámez y Naomi Akane Saguchi**, quienes fueron mis acompañantes en esta aventura. De ellos aprendí a trabajar con esfuerzo y dedicación; a cada uno les agradezco por dedicar parte de su tiempo para ayudarme a resolver dudas o problemas surgidos durante el desarrollo de mi proyecto. Más allá de ello, gracias por su compañía, por el apoyo en cada charla, y por todas las emociones compartidas que hicieron que este camino fuera, sin duda, mucho mejor.

Agradezco también a la **Universidad Autónoma de Baja California** por permitirme ingresar a este posgrado de maestría, con el cual mi futuro podrá volverse más brillante y mejorar en todos los aspectos.

Asimismo, agradezco a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación** por haberme otorgado la beca de apoyo como alumno de posgrado, la cual me permitió dedicar todo mi tiempo a la investigación. Sin este respaldo, mi camino habría sido muy distinto, ya que no habría podido centrarme completamente en el desarrollo de este trabajo.

Resumen

El recurso del agua disminuye a pasos agigantados, provocando que, con el paso de los años, su disponibilidad sea cada vez más limitada, al grado de que algunas zonas ya no cuenten con acceso a este elemento vital para una vida digna. Al mismo tiempo, el uso de aire acondicionado ha dejado de ser un lujo para convertirse en una necesidad, especialmente en regiones donde las condiciones de vida son precarias y el acceso a este tipo de tecnología es prácticamente nulo. Ante este contexto, la presente investigación estudia la factibilidad tecno-económica de un sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica para la activación de una innovadora máquina capaz de producir simultáneamente agua y enfriamiento, cubriendo ambas necesidades fundamentales. El estudio se enfocó en una localidad costera con viviendas cercanas al mar, caracterizada por su limitado acceso a recursos hídricos y a sistemas de confort térmico. El sistema propuesto se diseñó específicamente para resolver las necesidades de esta comunidad, permitiendo evaluar con mayor claridad el impacto de implementar esta tecnología en un entorno real con alta vulnerabilidad. El principal hallazgo se centra en comparar el desempeño de esta máquina con un sistema convencional. Se evidenció que, al requerir una menor cantidad de energía para operar siendo que aun así se entrega la misma cantidad de agua y enfriamiento, se logra una reducción considerable en el tamaño del sistema solar necesario, lo cual representa menores costos de inversión y operación. El sistema fue diseñado y evaluado mediante simulaciones en el programa TRNSYS, donde se llevaron a cabo estudios de sensibilidad y análisis operativo, incluyendo la producción de agua y enfriamiento. Los resultados obtenidos muestran que, para operar un sistema convencional, se requieren 92.61 m^2 de colectores solares y 10 m^3 de almacenamiento térmico; en contraste, la innovadora máquina requiere solo 39.69 m^2 y 2 m^3 , respectivamente. En conclusión, la máquina innovadora productora de agua y enfriamiento representa una ventaja significativa en cuanto al consumo energético y los costos asociados, demostrando ser una alternativa altamente atractiva y funcional para zonas costeras con necesidades prioritarias. Comparada con un sistema convencional, presenta una reducción de casi 60 % en el área de captación requerida, un 80 % menos en la capacidad de almacenamiento térmico y una disminución del 60 % en el consumo energético de las bombas utilizadas en el sistema solar, lo que repercute directamente en la reducción de los costos operativos.

Abstract

Water scarcity is escalating at an alarming rate, leading to increasingly limited availability and leaving some regions without access to this essential resource for a dignified life. Concurrently, air conditioning has transitioned from being a luxury to a basic necessity, particularly in underserved regions where access to thermal comfort technologies is virtually nonexistent. This study investigates the techno-economic feasibility of a solar thermal energy collection and storage system designed to power an innovative device capable of simultaneously producing potable water and cooling. The research focuses on a coastal settlement with housing located near the shoreline, characterized by limited access to both freshwater resources and thermal comfort infrastructure. The system was specifically designed to meet the critical needs of this community, enabling a realistic assessment of the implementation of this novel technology in a highly vulnerable environment. The key outcome of this work is a comparative performance analysis between the proposed system and a conventional configuration. Results demonstrate that the innovative system achieves equivalent outputs in water and cooling production while requiring significantly lower energy input. Consequently, a substantial reduction in the size of the solar thermal system was achieved, resulting in decreased capital investment and operational expenditures. System modeling and evaluation were carried out using the TRNSYS simulation environment, including sensitivity analyses and operational assessments focused on water and cooling outputs. Findings indicate that while a conventional system demands 92.61 m² of solar collectors and 10 m³ of thermal storage, the proposed configuration operates effectively with only 39.69 m² and 2 m³, respectively. In conclusion, the innovative water-and-cooling production unit offers significant advantages in energy efficiency and cost-effectiveness, making it a highly viable solution for coastal regions with critical resource constraints. Compared to traditional systems, it achieves nearly a 60% reduction in collector area, an 80% reduction in thermal storage volume, and a 60% decrease in auxiliary pump energy consumption, directly contributing to reduced operating costs.

Contenido

Dedicatoria.....	i
Agradecimiento	ii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
1 Introducción	1
1.1 Problemática y Justificación.....	1
1.2 Antecedentes	5
1.2.1 Integración de colectores solares en sistemas de desalinización	7
1.2.2 Integración de módulos fotovoltaicos y colectores híbridos (PV-T).....	13
1.3 Hipótesis.....	17
1.4 Objetivos	17
1.4.1 General.....	17
1.4.2 Específicos	17
1.5 Descripción General de la tesis	18
2 Fundamentos Teóricos de la Captación Solar y la Desalinización Térmica	20
2.1 Fundamentos de energía solar.....	20
2.2 Geometría Solar.....	26
2.3 Tecnologías de captación solar térmica	35
2.4 Almacenamiento de Energía Térmica	41
2.5 Desalinización solar térmica	43
2.6 Indicadores económicos	47
3 Diseño y Simulación de un Sistema de Energía Solar Térmica.....	51
3.1 Descripción del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica	51
3.2 Metodología de simulación	56
3.3 Creación de simulador.....	64
3.4 Establecimiento de criterios para selección óptima	73
4 Evaluación y Comparación de Resultados Bajo Escenarios de Alta y Baja TBT	74
4.1 Configuración de alto TBT	74

4.1.1	Temporada de Invierno	77
4.1.2	Temporada de Verano	82
4.2	Configuración de bajo TBT.....	87
4.2.1	Temporada de Invierno	89
4.2.2	Temporada de Verano	96
4.3	Comparación	101
4.3.1	Invierno	101
4.3.2	Verano	107
4.4	Comparación de resultados	111
5	Estudio Económico del Sistema de Captación y Almacenamiento de Energía Solar	
	Térmica	113
5.1	Costos generales de sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica 113	
5.2	Estudio económico del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica implementado en la máquina de ATBT	115
5.3	Estudio económico del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica implementado en la máquina de BTBT.....	119
5.4	Desempeño económico de sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica para la máquina de ATBT y BTBT.....	124
6	Conclusiones y trabajos futuros	126
6.1	Conclusión.....	126
6.2	Trabajos Futuros.....	129
7	Referencias	130
	Anexo A.....	136
	Anexo B.....	142

Lista de Figuras

Figura 1. Sistemas de captación solar:	a) Arreglo de paneles	
fotovoltaico (energía eléctrica) y	b) Arreglo de colectores solares (energía térmica) ..	5
Figura 2. Diagrama esquemático de los componentes del sistema y mecanismo operativo (Abu-Arabi et al., 2020).		7
Figura 3. (a) Sistema MD indirecto con energía solar (SP-MD), (b) sistema SP-MD directo que utiliza un colector de placa plana y (c) sistema SP-MD directo que utiliza un colector de tubo de vacío (Bamasag et al., 2020).		9
Figura 4. Diagrama esquemático del sistema de desalinización (Chen et al., 2023).		9
Figura 5. Imagen solar mejorada con lente Fresnel (Johnson et al., 2019).		10
Figura 6. Configuración experimental de diagrama esquemático detallado (Bahrami et al., 2019).		12
Figura 7. Fotografía de todo el banco de pruebas montado (Alsehli et al., 2022).		12
Figura 8. Esquema del sistema propuesto (Siddiqui & Dincer, 2018).		12
Figura 9. Esquema del sistema de desalinización de destilación por membrana de gas de barrido (SGMD) totalmente impulsado por energía solar (Li & Lu, 2019).		13
Figura 10. Sistemas de generación de energía térmica y eléctrica: a) Colector híbrido PVT	b)	
Colector híbrido CPTV, (Anand & Murugavelh, 2019).		15
Figura 11. Clasificación de colector fotovoltaico-térmico (Anand et al., 2021).		15
Figura 12. Vista esquemática de la propuesta solar activa híbrida (PV/T) con aislamiento HNFC (Balachandran et al., 2019).		16
Figura 13. La configuración experimental del CPVT (Al-Hrari et al., 2020).		16
Figura 14. Plano de la eclíptica.		27
Figura 15. Periodos de incidencia normal de los rayos solares en la tierra.		28
Figura 16. Representación de bóveda celeste.		29
Figura 17. Ángulo de Incidencia (Fuentes, V., 2002).		32
Figura 19. Diagrama de las partes que conforman captador solar plano.		38
Figura 18. Diagrama de las partes que conforman calentador solar de aire.		38
Figura 20. Diagrama de las partes que conforman captador parabólico compuesto (CPC).		39
Figura 21. Diagrama de las partes que conforman captador solar de tubos evacuados.		40
Figura 22. Tecnologías de desalinización.		44
Figura 23. Diagrama del sistema de desalinización y refrigeración alimentado por energía solar.		46
Figura 24. Propuesta tecnológica para su posterior desarrollo en el entorno de TRNSYS.		52
Figura 25. Diagrama de la metodología de simulación y selección del sistema con mejor desempeño.		56
Figura 26. Encuestas realizadas para estimar el consumo de agua en las viviendas de la zona de estudio.		57
Figura 27. Variación horaria de temperatura ambiente y radiación incidente en invierno.		61
Figura 28. Variación horaria de temperatura ambiente y radiación incidente en verano.		61
Figura 29. Perfil horario de temperatura ambiente y radiación incidente durante la semana de invierno (24 feb - 2 mar).		63
Figura 30. Comportamiento horario de temperatura ambiente y radiación incidente durante la semana de verano (25-31 ago).		64
Figura 31. Evolución diaria de la temperatura en el termotanque: proceso de calentamiento solar, en sistema de ATBT (invierno).		78

Figura 32. Comportamiento térmico diario del sistema durante producción de agua en invierno, en sistema de ATBT.....	79
Figura 33. Balance energético diario: Demanda del sistema MED vs. calor suministrado por colectores solares en invierno, en sistema de ATBT.	80
Figura 34. Producción y almacenamiento de agua durante semana de invierno: volumen acumulado vs. demanda diaria, en sistema de ATBT.	81
Figura 35. Evolución diaria de la temperatura en el termotanque: proceso de calentamiento solar, en sistema de ATBT (verano).....	82
Figura 36. Comportamiento térmico diario del sistema durante producción de agua y enfriamiento en verano, en sistema de ATBT.	84
Figura 37. Balance energético diario: Demanda del sistema MED vs. calor suministrado por colectores solares en verano, en sistema de ATBT.	85
Figura 38. Producción y almacenamiento de agua durante semana de verano: volumen acumulado vs. demanda diaria, en sistema de ATBT.	87
Figura 39. Evolución diaria de la temperatura en el termotanque: proceso de calentamiento solar, en sistema de BTBT (invierno).	91
Figura 40. Comportamiento térmico diario del sistema durante producción de agua en invierno, en sistema de BTBT.....	92
Figura 41. Balance energético diario: Demanda del sistema MED vs. calor suministrado por colectores solares en invierno, en sistema de BTBT.	95
Figura 42. Producción y almacenamiento de agua durante semana de invierno: volumen acumulado vs. demanda diaria, en sistema de BTBT.	95
Figura 43. Evolución diaria de la temperatura en el termotanque: proceso de calentamiento solar, en sistema de BTBT (verano).	97
Figura 44. Figura 32. Comportamiento térmico diario del sistema durante producción de agua y enfriamiento en verano, en sistema de BTBT.	99
Figura 45. Balance energético diario: Demanda del sistema MED vs. calor suministrado por colectores solares en verano, en sistema de BTBT.	99
Figura 46. Producción y almacenamiento de agua durante semana de verano: volumen acumulado vs. demanda diaria, en sistema de BTBT.	100
Figura 47. Tiempo de arranque comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en invierno.....	102
Figura 48. Comportamiento térmico comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en invierno.	104
Figura 49. Balance energético comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en invierno.	105
Figura 50. Comportamiento de producción y almacenamiento de agua comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en invierno.....	106
Figura 51. Tiempo de arranque comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en verano.....	107
Figura 52. Comportamiento térmico comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en verano.....	109
Figura 53. Balance energético comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en verano.	110
Figura 54. Comportamiento de producción y almacenamiento de agua comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en verano.....	111
Figura 55. Distribución Porcentual del Costo de los Equipos del Sistema Solar Térmico para máquina de ATBT.	116
Figura 56. Distribución Porcentual del Costo de los Equipos del Sistema Solar Térmico para máquina de BTBT.....	121

Lista de Tablas

Tabla 1. Descripción de tipos de colectores solares.....	6
Tabla 2. Albedos en fracción de algunas superficies.	22
Tabla 3. Emisividad infrarroja (%) de diferentes superficies naturales y artificiales.	22
Tabla 4. Meridiano de referencia horaria oficiales en la república mexicana.....	34
Tabla 5. Comparación de parámetros operativos: ATBT vs. BTBT.....	59
Tabla 6. Condiciones climáticas simuladas: invierno vs. verano.....	61
Tabla 7. Condiciones climáticas durante las semanas de análisis: producción de agua y enfriamiento. ...	62
Tabla 8. Configuración de componentes en TRNSYS: Types, simbología y características clave.	65
Tabla 9. Estructura modular del simulador TRNSYS: subsistemas y funciones principales.....	68
Tabla 10. Configuración inicial de parámetros operativos: comparación ATBT vs. BTBT.....	71
Tabla 11. Opciones de diseño del sistema de captación y almacenamiento térmico para máquinas con alta TBT.....	75
Tabla 12. Parámetros de operación y diseño del sistema productor de agua y enfriamiento.....	76
Tabla 13. Opciones de diseño del sistema de captación y almacenamiento térmico para máquinas con bajo TBT.	88
Tabla 14. Parámetros de simulación para sistema MED-BTBT: configuración optimizada de captación y almacenamiento solar.....	90
Tabla 15. Comparación ATBT vs. BTBT: Eficiencia, infraestructura y desempeño.	112
Tabla 16. Costo Unitario de los Equipos del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico.	114
Tabla 17. Inversión Inicial del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de ATBT.	116
Tabla 18. Costos Anuales de Operación del Sistema de Energía Solar Térmica para la máquina de ATBT.	119
Tabla 19. Indicadores Económicos del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de ATBT.	119
Tabla 20. Inversión Inicial del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de BTBT.	121
Tabla 21. Costos Anuales de Operación del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmica para la máquina de BTBT.....	123
Tabla 22. Indicadores Económicos del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmica para máquina de BTBT.....	123
Tabla 23. Comparación de Parámetros Económicos para Sistemas de Alta y Baja TBT.	125

Capítulo 1

1 Introducción

En este capítulo se establecen las bases que sustentan el desarrollo del proyecto de tesis, abordando desde la problemática actual que se busca resolver hasta la justificación del estudio. Se presentan los antecedentes relevantes que permitieron definir el marco de trabajo y fundamentar la investigación. Además, se plantea la hipótesis a resolver, junto con el objetivo general y los objetivos específicos que guían el desarrollo del estudio. Finalmente, se incluye una breve descripción de cada capítulo de la tesis, proporcionando una visión general de la estructura y el contenido del documento.

1.1 Problemática y Justificación

El agua y la electricidad son recursos fundamentales para el bienestar humano y el desarrollo sostenible. Ambos influyen directa e indirectamente en la salud, la alimentación y los servicios esenciales de la vida diaria. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos y de infraestructura, más de 800 millones de personas aún carecen de acceso a servicios básicos de agua y saneamiento, y más de 2,000 millones dependen de combustibles como leña y carbón para cocinar sus alimentos (ONU, Carlos Mario Gómez De et al., 2014).

Por otro lado, el consumo de energía ha aumentado considerablemente en las últimas décadas. En septiembre de 2021, la Agencia Internacional de Energía (IEA) informó que la energía utilizada en 1973 fue de 254 Exajoules (EJ), mientras que en 2019 ascendió a 606 EJ, lo que representa un incremento del 138% («Key World Energy Statistics 2021», 2021). Esta energía proviene principalmente de recursos no renovables como petróleo, carbón y gas natural, los cuales constituyen el 87% del suministro energético total. No obstante, su uso genera altas emisiones de gases de efecto invernadero, impactando negativamente tanto el medio ambiente como la calidad de vida de los seres vivos en el planeta.

Por otro lado, la lucha contra la escasez de agua y la falta de saneamiento sigue siendo un desafío global. Según el Banco Mundial (**Agua: Panorama General, s. f.**), aproximadamente 2,000 millones de personas en el mundo carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura, mientras que 3,600 millones no cuentan con servicios de saneamiento seguros y 2,300 millones carecen de instalaciones básicas para lavarse las manos.

Las disparidades en la disponibilidad de recursos hídricos y en el acceso a infraestructuras de saneamiento, junto con el incremento demográfico, la explotación intensiva del agua, la alta variabilidad climática en las precipitaciones y los procesos de contaminación, constituyen factores críticos que, en diversas regiones, posicionan al recurso hídrico como una de las principales amenazas para el desarrollo socioeconómico, la reducción de la pobreza y la sostenibilidad ambiental.

El recurso hídrico cumple una función esencial en los procesos productivos, y la reducción en su disponibilidad podría provocar una ralentización del desarrollo económico. En determinadas regiones, las tasas de crecimiento podrían disminuir hasta en un 6 % del Producto Interno Bruto (PIB) hacia el año 2050, debido a las pérdidas vinculadas al agua en sectores como la agricultura, la salud, los ingresos y el bienestar. Garantizar un abastecimiento suficiente y sostenido de agua, en un contexto de escasez creciente, será clave para alcanzar las metas globales de disminución de la pobreza.

El Banco Mundial (**Saneamiento: Panorama General, s. f.**) resalta que, a escala global, 3,600 millones de personas no cuentan con servicios de saneamiento gestionados de forma segura. Asimismo, cerca del 8 % de la población mundial aún lleva a cabo la defecación al aire libre. Pese a los progresos notables entre los años 2000 y 2020, cuando 2,400 millones de personas obtuvieron acceso a letrinas o inodoros mejorados, el saneamiento continúa siendo uno de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) más rezagados en cuanto a su cumplimiento.

Actualmente, 1,700 millones de personas aún no tienen acceso a servicios básicos de saneamiento. De ellas, 580 millones dependen de instalaciones compartidas con otros hogares, consideradas servicios “limitados”, mientras que 616 millones utilizan instalaciones “no mejoradas”.

Los datos reflejan grandes disparidades, ya que dos tercios de quienes carecen de servicios básicos viven en zonas rurales, lo que evidencia la necesidad de mayores esfuerzos en infraestructura y políticas públicas para garantizar el acceso universal al saneamiento.

Abordar los desafíos del saneamiento ofrece múltiples beneficios, tanto a nivel individual como comunitario. La mejora en el acceso al saneamiento contribuye a la reducción de la carga de morbilidad, lo que se traduce en una mejora significativa en la salud pública.

Además, un saneamiento adecuado favorece una mejor nutrición, ya que reduce las enfermedades intestinales que afectan la absorción de nutrientes, previniendo así el retraso en el crecimiento infantil y mejorando el bienestar general de la población.

El Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) **(Staff, 2025)** señala que México ya está experimentando los efectos negativos de la falta de agua. En los últimos años, las regiones centro y norte del país han enfrentado problemas de escasez debido al aumento de las sequías. Según datos del Banco Mundial, la disponibilidad promedio anual per cápita en México pasó de 10,000 m³ en 1960 a 4,000 m³ en 2012. Se estima que para 2030 esta cifra descenderá por debajo de los 3,000 m³ por habitante al año, lo que agrava la crisis hídrica en el país y resalta la necesidad de implementar estrategias de gestión sostenible del agua.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) **(Del Agua, s. f.)** hizo un llamado a los diferentes órdenes de gobierno y a la sociedad en general para adoptar un uso responsable del agua, promoviendo medidas que prevengan su desperdicio y optimicen su aprovechamiento. Esto se debe a las condiciones de sequía que han afectado al territorio nacional en los últimos años, generando desafíos significativos en el abastecimiento de este recurso esencial.

Cerca de la ciudad de San Felipe, en el estado de Baja California, se encuentra la localidad de Puertecitos, la cual carece de infraestructura básica para el suministro de agua potable, drenaje y electricidad. En 2016, con el respaldo de la UABC, CONACYT y el Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER) **(Aguilar-Jiménez et al., 2018)**, se implementó una microrred de servicios energéticos comunitarios, que provee energía a la localidad en horarios determinados.

En Puertecitos se encuentran un jardín de niños y una escuela primaria, en los cuales se instaló un sistema de aire acondicionado termo solar con el propósito de garantizar la continuidad de las actividades escolares durante el verano, periodo en el que las temperaturas pueden alcanzar hasta 50 °C (**Aguilar-Jiménez et al., 2019**). A pesar de estos avances, el abastecimiento de agua continúa siendo una limitante, ya que la localidad carece de un sistema de distribución por tuberías. En consecuencia, las familias deben adquirir agua mediante cisternas, lo que representa una dependencia económica variable según la capacidad financiera de cada hogar.

El presente proyecto tiene como objetivo el análisis técnico-económico de un sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica destinado a la activación de una máquina innovadora capaz de producir agua y enfriamiento. Dicha máquina corresponde a un sistema de desalinización por evaporación multiefecto (MED), en el cual se ha reducido la temperatura mínima requerida para la producción de agua desalinizada. La disminución de esta temperatura operativa permite aprovechar el diferencial térmico para la generación de enfriamiento, lo que representa una oportunidad significativa en términos de eficiencia energética.

En este contexto, el estudio comparará diferentes configuraciones de sistemas de captación y almacenamiento de energía solar térmica, tanto para el sistema convencional al alto vacío como para el sistema de desalinización al alto vacío con reducción en la temperatura de activación, con el propósito de evaluar los beneficios técnicos y económicos de esta última tecnología.

1.2 Antecedentes

El Sol es la fuente de energía más antigua y la más importante para el planeta, ya que la vida depende de su radiación. La mayoría de los procesos químicos y biológicos que ocurren en la Tierra tienen su origen en la energía solar. Incluso los combustibles, tanto de origen fósil como renovable, derivan en última instancia de esta fuente de energía. Sin embargo, la mayor parte del suministro energético global depende de los combustibles fósiles, lo que los convierte en uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero responsables del cambio climático. Para mitigar estos impactos, se han desarrollado tecnologías de generación de energía limpia, agrupadas bajo el término de energías renovables. A pesar de sus beneficios ambientales, solo alrededor del 20 % de la energía mundial proviene actualmente de fuentes renovables. **(Islam et al., 2018).**

Las tecnologías de captación de energía solar se dividen en dos categorías principales: la conversión de radiación solar en energía eléctrica, mediante el uso de paneles fotovoltaicos **(Figura 1 a))**, y la conversión de radiación solar en energía térmica, a través de colectores solares **(Figura 1 b))**. Ambas tecnologías aprovechan la radiación solar incidente para su transformación en energía utilizable. Mientras que la energía eléctrica generada puede ser inyectada a la red o utilizada en sistemas autónomos, la energía térmica es transferida a un fluido caloportador, generalmente agua, que posteriormente puede emplearse en diferentes aplicaciones o almacenarse en un termotanque para su uso posterior **(Jha et al., 2023).**



Figura 1. Sistemas de captación solar:
a) Arreglo de paneles fotovoltaico (energía eléctrica) y
b) Arreglo de colectores solares (energía térmica)

Existen diversos tipos de colectores solares térmicos, cuya selección depende directamente de la aplicación específica para la cual serán utilizados, principalmente en función del rango de temperatura requerido. Cada colector alcanza diferentes niveles de temperatura en función del tipo de absorbedor solar que incorpora, así como del mecanismo de captación que emplea. La clasificación de los colectores va desde los sistemas estáticos, como los colectores planos, hasta los sistemas de seguimiento solar en dos ejes, que permiten un mayor aprovechamiento de la radiación solar directa y, por ende, una mayor eficiencia térmica. Esta variabilidad se resume en la **Tabla 1**, donde se describen las principales características operativas, rangos de temperatura y los distintos tipos de absorbedores que se utilizan en los colectores solares (**Kalogirou, 2004**).

Tabla 1. Descripción de tipos de colectores solares.

Mecanismo (Movimiento)	Tipo de colector	Receptor/Absorbedor	Rango de funcionamiento
Estático	Colector de placa plana	Tipo plano	35 °C - 90 °C
	Colector de tubos de vacío	Tipo plano	70 °C - 210 °C
	Colector parabólico compuesto	Tipo tubular	70 °C - 260 °C
Seguimiento de un solo eje	Reflector Fresnel lineal	Tipo tubular	70 °C - 500 °C
	Colector cilindro parabólico	Tipo tubular	70 °C - 400 °C
Seguimiento de doble eje	Reflector de disco parabólico	Punto	150 °C - 600 °C
	Colector de campo de heliostatos	Punto	500 °C - 1750 °C

1.2.1 Integración de colectores solares en sistemas de desalinización

Colector de placa plana

En avances recientes **Ma et al. (2018)** desarrollaron una unidad de destilación por membrana al vacío integrada dentro de un colector solar de placa plana, lo cual permitió una configuración compacta y eficiente para la producción de agua. Posteriormente, en 2020, **Rabie et al. (2020)** implementaron la incorporación de un colector de placa plana en un sistema de desalinización solar, con el objetivo de producir agua purificada a partir de pozos en una zona rural de Egipto. En ese mismo año, **Abu-Arabi et al. (2020)** (**Figura 2**) analizaron el rendimiento de un destilador solar modificado mediante la integración de un calentador externo, específicamente un colector de placa plana, logrando con ello una mejora significativa en el rendimiento térmico del sistema.

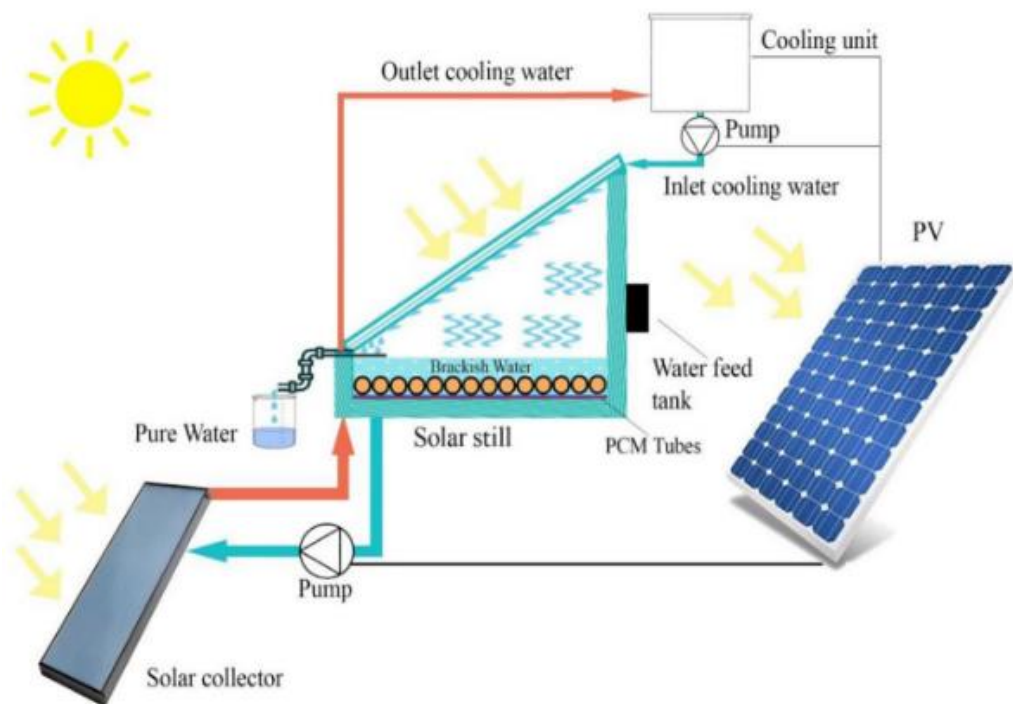


Figura 2. Diagrama esquemático de los componentes del sistema y mecanismo operativo (Abu-Arabi et al., 2020).

1.2.1.1 Colector de tubos de vacío

En estudios recientes, **Bamasag et al. (2020)** (**Figura 3**) desarrollaron un innovador módulo de destilación por membrana, en el cual se integraron membranas de fibra hueca dentro de colectores solares de tubos de vacío, obteniendo así un sistema más compacto y eficiente. Esta integración permitió alcanzar una mejora del 17 % en la eficiencia del proceso en comparación con sistemas que no emplean dicha tecnología. Posteriormente, en 2022, **Shoeibi et al. (2021)** propuso la integración de un sistema de desalinización con colectores de tubos de vacío y la incorporación de un condensador externo, logrando duplicar la producción de agua desalinizada en comparación con un sistema convencional.

1.2.1.2 Colector parabólico compuesto

En el año 2021, **Mishra et al. (2021)** realizó un estudio paramétrico de un sistema PVT-CPC, en el cual un destilador solar operaba con una cubierta de condensación de geometría cónica, acoplada a un colector parabólico compuesto fotovoltaico-térmico (PVT-CPC). Los resultados del estudio demostraron que el desempeño del sistema depende en gran medida de la profundidad de la cuenca, concluyendo que una menor profundidad del agua en dicha cuenca favorece la eficiencia del proceso de destilación. Posteriormente **Chen et al. (2023)** (**Figura 4**) propuso un sistema de desalinización activado térmicamente mediante CPC, en el que se emplearon subsistemas de precalentamiento y calefacción basados en agua y aceite térmico como medios de trabajo, respectivamente. Gracias a la recuperación de calor, el sistema alcanzó un ahorro energético de 6720.68 kJ/día y una producción diaria de agua dulce de 4.55 kg/h y 15.72 kg/día.

1.2.1.3 Lente y reflector Fresnel

En el año 2019, Johnson et al. (2019) (**Figura 5**) desarrolló un modelo teórico para simular las temperaturas y la productividad de un alambique solar, incorporando un lente de Fresnel de enfoque puntual con el fin de intensificar la radiación solar incidente. Los resultados demostraron que el uso del lente permitió un aumento significativo en la productividad del proceso de desalinización, gracias a la mejora en el aprovechamiento de la energía solar. Posteriormente, Xiao

et al. (2021) empleó un reflector de Fresnel con el objetivo de concentrar la radiación solar directamente en la cámara de evaporación de un sistema de desalinización por humidificación–deshumidificación (HDH) mediante burbujeo. El sistema logró alcanzar una eficiencia térmica aproximada del 71 % en condiciones de operación en estado estacionario, evidenciando el potencial de los sistemas ópticos concentradores en aplicaciones de desalación solar.

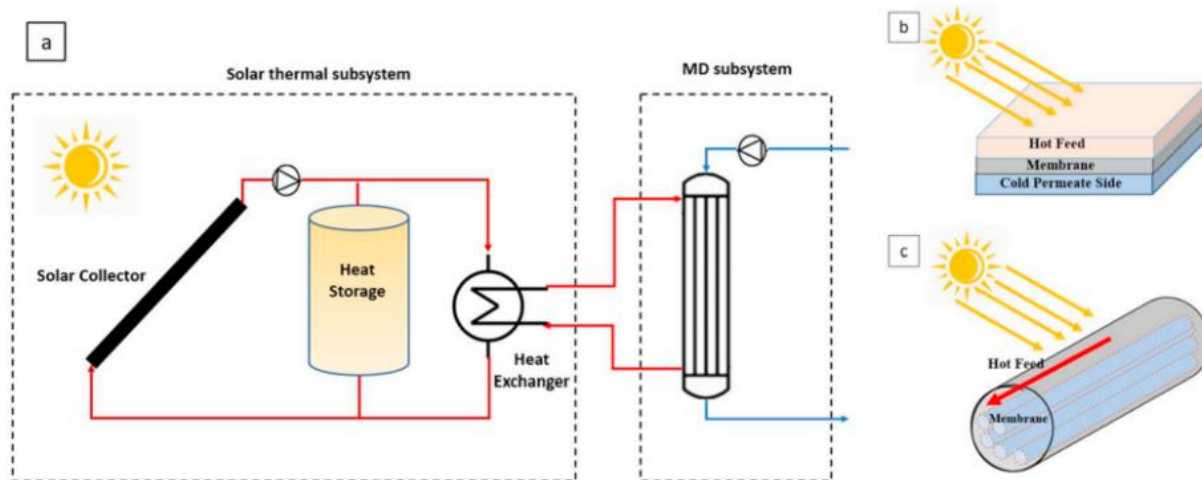


Figura 3. (a) Sistema MD indirecto con energía solar (SP-MD), (b) sistema SP-MD directo que utiliza un colector de placa plana y (c) sistema SP-MD directo que utiliza un colector de tubo de vacío (Bamasag et al., 2020).

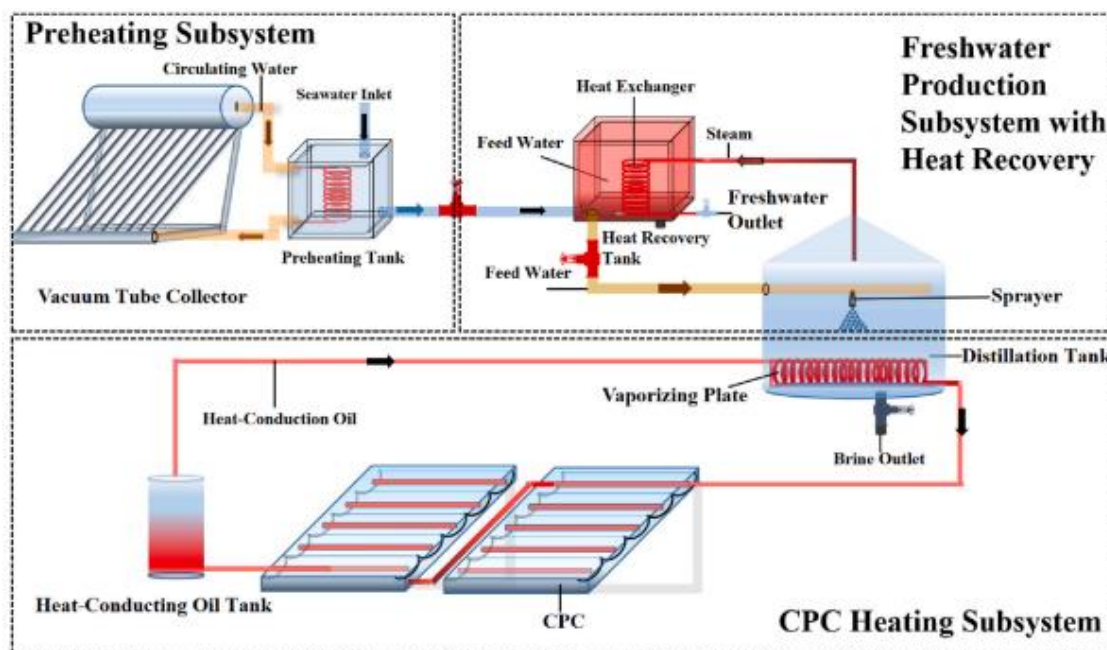


Figura 4. Diagrama esquemático del sistema de desalinización (Chen et al., 2023).

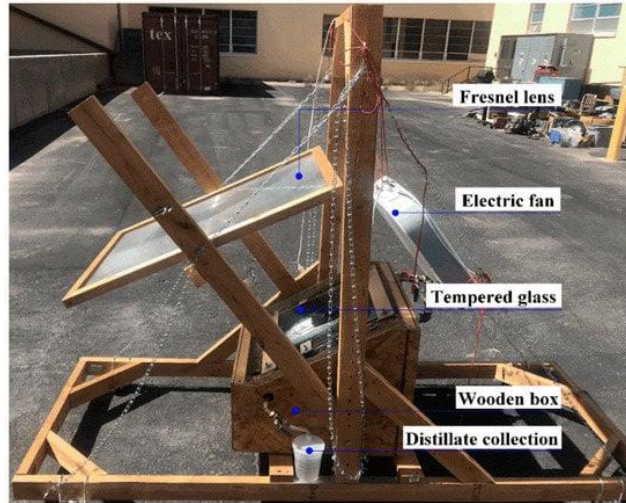


Figura 5. Imagen solar mejorada con lente Fresnel (Johnson et al., 2019).

1.2.1.4 Colector cilindro parabólico

En años recientes, **Arun y Sreekumar (2018)** realizaron un estudio experimental en el que integraron un sistema de desalinización solar con colectores cilindro-parabólicos (CCP) acoplados a un sistema de seguimiento solar. Durante el estudio, se probaron diferentes configuraciones del tubo receptor con el objetivo de evaluar el rendimiento térmico del CCP. Como resultado, se logró una producción de hasta 2 L/m², evidenciando la efectividad del sistema bajo condiciones óptimas. **Alsehli et al. (2022)** propusieron un sistema híbrido que integraba un colector cilindro-parabólico con un destilador solar modificado (**Figura 7**). En esta configuración, el CCP se encargaba de calentar agua salina hasta una temperatura suficiente para generar vapor. Posteriormente, el vapor era separado del líquido restante, y este último, al estar pre-calentado, se reutilizaba como alimentación para el destilador solar. El sistema logró alcanzar una producción diaria de 91 litros, demostrando la viabilidad de utilizar colectores solares de concentración en sistemas híbridos de desalinización de alta eficiencia.

1.2.1.5 Reflector de disco parabólico

En tiempos más recientes, **Bahrami et al. (2019)** (**Figura 6**) desarrollaron un sistema de desalinización solar utilizando un colector de disco parabólico, en cuyo foco fue instalado un destilador solar de nuevo diseño. El sistema logró una producción de 75 kg de agua destilada en un solo día, empleando un disco parabólico con una apertura de 3 metros, lo cual evidencia su alta capacidad de concentración térmica. Asimismo, **Abubakkar et al. (2020)** diseñaron un sistema de desalinización a pequeña escala, en el que un colector de disco parabólico concentra la radiación solar en un punto focal donde se ubica un destilador solar. Este enfoque permitió obtener una reducción significativa en la cantidad de sólidos totales disueltos (TDS), lo que demuestra la efectividad del sistema para mejorar la calidad del agua desalinizada.

1.2.1.6 Colector de campo de heliostatos

Para el año 2018, **Siddiqui y Dincer (2018)** (**Figura 8**) desarrollaron una unidad trigenerativa capaz de producir agua potable, energía eléctrica e hidrógeno, integrando una torre solar, un sistema de ósmosis inversa y un electrolizador de membrana. Este sistema alcanzó una eficiencia global del 23.2%, destacando por su enfoque integral en el aprovechamiento de la energía solar. Posteriormente **Khanmohammadi et al. (2021)** propusieron un nuevo diseño de sistema basado en torre solar, en el cual integraron un generador termoeléctrico acoplado a un ciclo Brayton, dos ciclos Rankine orgánicos (ORC) y una unidad de ósmosis inversa. Esta configuración permite la co-generación de agua destilada y electricidad, con un enfoque modular y de alta eficiencia. Posteriormente, **Nedaei et al. (2022)** diseñaron una unidad multigenerativa avanzada, que combina un campo de torre solar con un ciclo Brayton cerrado, un sistema de refrigeración por absorción, desalinización por humidificación y deshumidificación (HDH) y un electrolizador de membrana. Este sistema logró una producción de 8.32 MW de potencia eléctrica, 3.16 kg/s de agua potable, una carga de refrigeración de 8.37 MW y una producción de hidrógeno de 0.22 kg/h, posicionándolo como una solución integral para aplicaciones a gran escala.

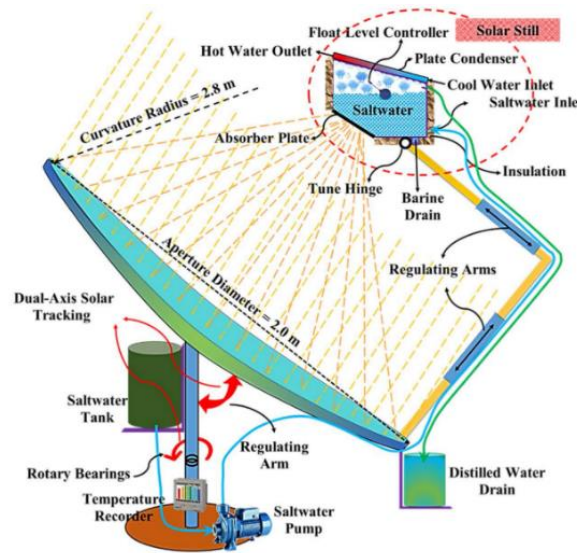


Figura 6. Configuración experimental de diagrama esquemático detallado (Bahrami et al., 2019).

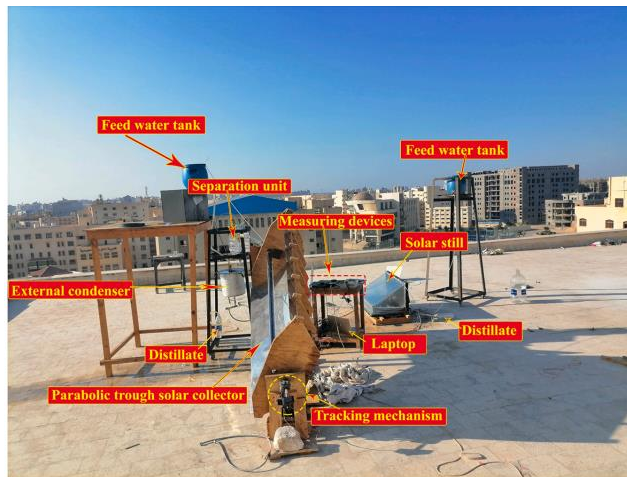


Figura 7. Fotografía de todo el banco de pruebas montado (Alsehli et al., 2022).

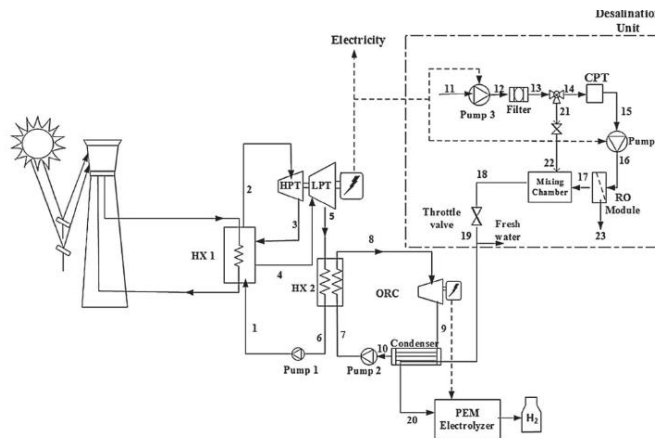


Figura 8. Esquema del sistema propuesto (Siddiqui & Dincer, 2018).

1.2.2 Integración de módulos fotovoltaicos y colectores híbridos (PV-T)

1.2.2.1 Módulos fotovoltaicos

En la actualidad, el uso de módulos fotovoltaicos para la desalinización de agua de mar ha experimentado un notable crecimiento. **Li y Lu (2019) (Figura 9)** desarrollaron un sistema de destilación por membrana, impulsado por energía solar tanto térmica como eléctrica, mediante la instalación de un colector solar y un conjunto de módulos fotovoltaicos. Este sistema híbrido logró una producción promedio de agua desalinizada entre 9.98 kg/d y 23.26 kg/d. Posteriormente, **Alrbai et al. (2022)** diseñaron un sistema de desalinización por humidificación-deshumidificación (HDH), acoplado a paneles solares fotovoltaicos y un colector de tubos evacuados, alcanzando una producción de 1.70 kg/h de agua producto. En el mismo año, Abdalla A. et al. [44] propusieron un enfoque de desalinización integrada, que incorpora pilas de combustible de óxido sólido, módulos fotovoltaicos y un sistema de ósmosis inversa, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad del proceso.

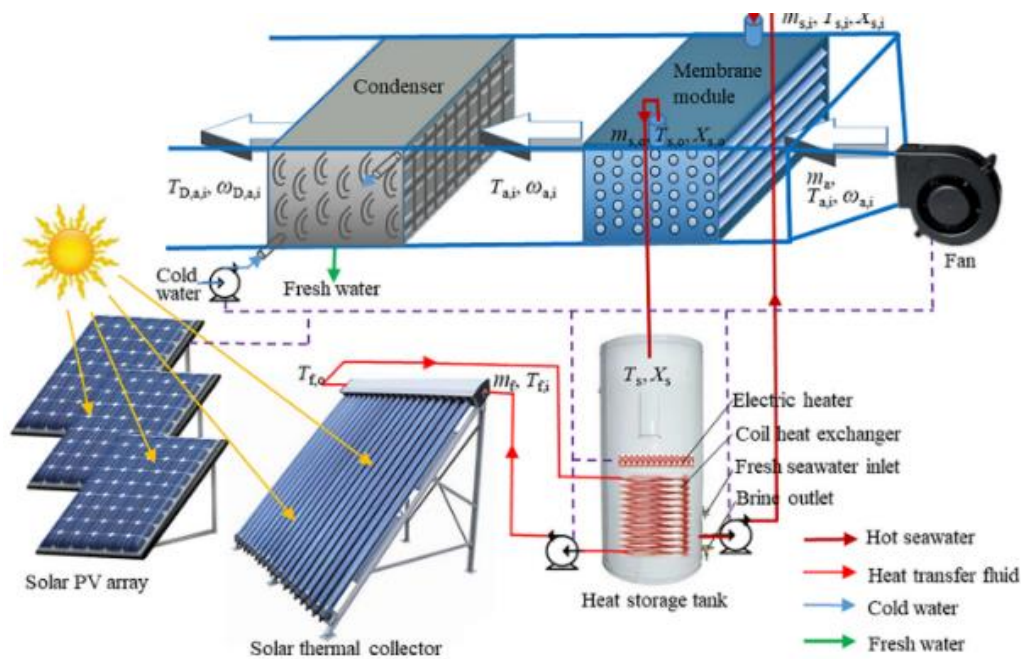


Figura 9. Esquema del sistema de desalinización de destilación por membrana de gas de barrido (SGMD) totalmente impulsado por energía solar (Li & Lu, 2019).

1.2.2.2 Colectores híbridos (fotovoltaicos-térmicos)

Los colectores híbridos fotovoltaicos-térmicos (PVT, por sus siglas en inglés) **Figura 10** son dispositivos que integran en un solo sistema tecnologías de conversión fotovoltaica y termosolar. Están diseñados para aprovechar la radiación solar incidente, convirtiéndola en energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas, mientras que el calor residual generado en el proceso es captado por un tubo absorbedor ubicado en la parte posterior del panel, calentando un fluido de trabajo. Este sistema no solo permite recuperar calor útil, sino que también contribuye al enfriamiento de las celdas fotovoltaicas, mejorando su eficiencia operativa. Su aplicación es común en sistemas de agua caliente sanitaria, calefacción de edificios, climatización de piscinas, generación eléctrica y procesos industriales que requieren calor, lo que los convierte en soluciones versátiles y eficientes para una amplia gama de demandas energéticas.

Los primeros estudios sobre los colectores PVT (fotovoltaico-térmicos) datan de mediados de la década de 1970. Estos colectores se clasifican principalmente en colectores PVT de plataforma plana y colectores PVT de concentración (CPVT) (**Anand et al., 2021**). En la **Figura 11**, se muestran los distintos tipos de colectores PVT disponibles, cada uno con características y aplicaciones específicas según las necesidades energéticas.

1.2.2.3 Fotovoltaico – Térmico (PVT)

En años recientes, **Balachandran et al. (2019)** (**Figura 12**) utilizaron un colector PVT en una innovadora unidad destiladora solar de pendiente única, logrando una producción máxima de 2.253 L/m²/día. Por otro lado, **Zhang et al. (2019)** propusieron un novedoso sistema de desalinización con concentración fotovoltaica/térmica, diseñado para satisfacer las demandas esenciales de electricidad, calefacción y agua en islas aisladas. Además, **Anand y Murugavelh (2019)** **presentaron** un modelado matemático en el cual integraron un colector fotovoltaico-térmico concentrado a una planta combinada de desalinización y refrigeración, obteniendo resultados sobresalientes.

1.2.2.4 Concentrador Fotovoltaico – Térmico (CPVT)

En el ámbito de los CPVT, el investigador **Xinxin et al. (2019)** presentaron un artículo en el que diseñaron y fabricaron un sistema de desalinización con PVT que consistía en un CPVT, un subsistema de seguimiento y un destilador solar. Posteriormente, **Al-Hrari et al. (2020)** (**Figura 13**) estudiaron el rendimiento de un sistema térmico/fotovoltaico concentrado, combinado con la destilación por membrana de contacto directo, logrando una producción de 3 kg/m²/h de agua destilada.

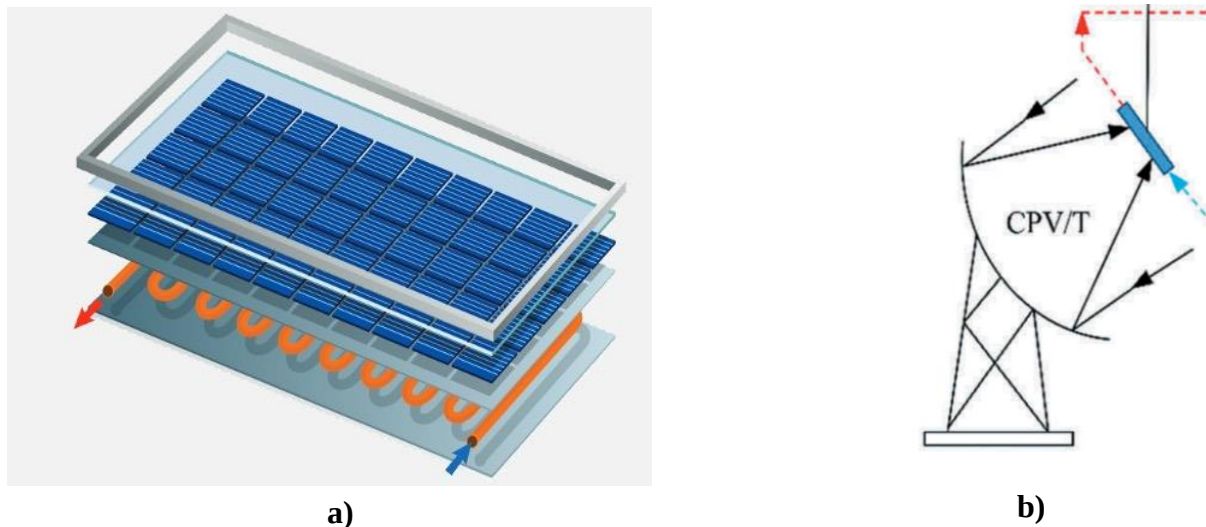


Figura 10. Sistemas de generación de energía térmica y eléctrica: a) Colector híbrido PVT b) Colector híbrido CPTV, (Anand & Murugavelh, 2019).

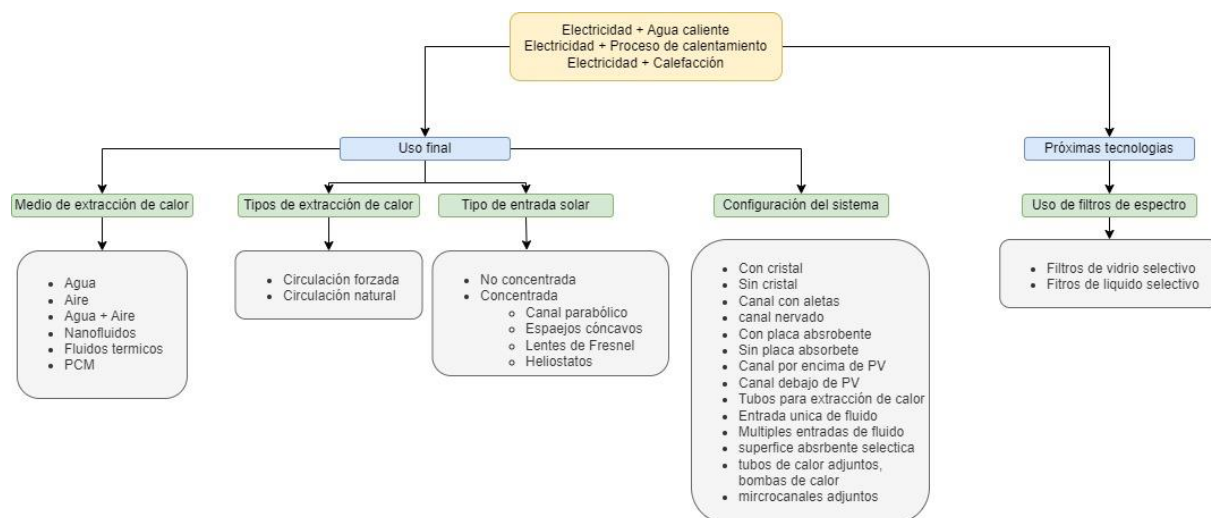


Figura 11. Clasificación de colector fotovoltaico-térmico (Anand et al., 2021).

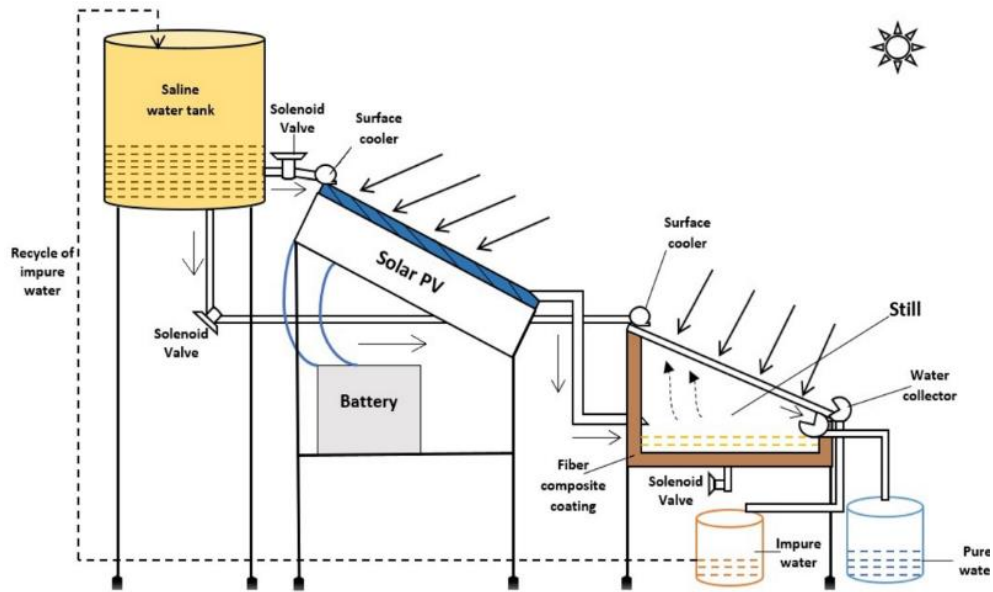


Figura 12. Vista esquemática de la propuesta solar activa híbrida (PV/T) con aislamiento HNFC (Balachandran et al., 2019).

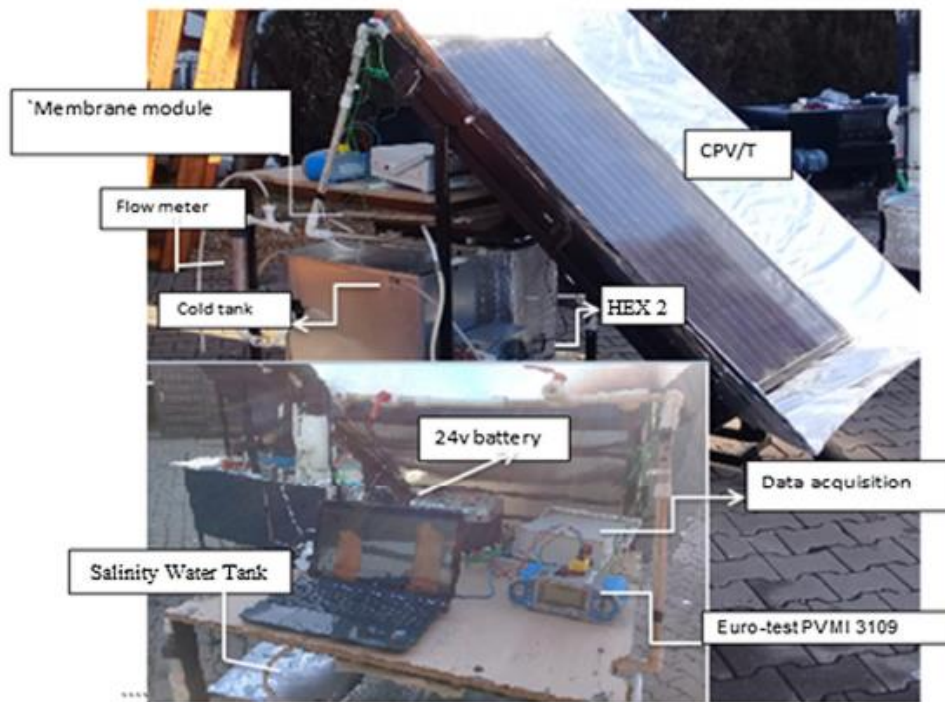


Figura 13. La configuración experimental del CPVT (Al-Hrari et al., 2020).

1.3 Hipótesis

El sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica que activa un proceso de desalinización MED al alto vacío con bajo TBT será mejor técnica y económicamente en comparación con el sistema que activa un MED al alto vacío con TBT convencional.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Comparar técnica y económicamente los sistemas de captación y almacenamiento de energía solar térmica aplicados en un proceso de desalinización MED al alto vacío con TBT convencional y baja TBT.

1.4.2 Específicos

- Realizar el estado del arte sobre el uso de colectores solares en procesos de desalinización, identificando los tipos de colectores más eficientes y sus aplicaciones en diferentes tecnologías de desalinización.
- Generar propuestas de sistemas de captación y almacenamiento de energía solar térmica que activaran un proceso de desalinización MED al alto vacío para alto TBT y Bajo TBT.
- Desarrollar un modelo de simulación en TRNSYS para sistemas de captación y almacenamiento de energía solar, que permitan la activación de un proceso de desalinización MED al alto vacío, considerando tanto condiciones de alta TBT como de baja TBT.
- Realizar una evaluación técnica y económica de los sistemas de captación y almacenamiento de energía solar, comparando diferentes configuraciones y su impacto en la eficiencia del proceso de desalinización.

1.5 Descripción General de la tesis

Capítulo 1: En el primer capítulo se expone de manera detallada la problemática de la escasez de agua potable, abordando sus repercusiones tanto a nivel global como nacional, y analizando cómo esta afecta diversas regiones del país. Asimismo, se examina el incremento sostenido en el consumo de energía eléctrica y su relación con la emisión de gases de efecto invernadero, lo que agrava los problemas ambientales y sociales a nivel mundial. En este contexto, se presentan los antecedentes relevantes sobre los sistemas de captación y almacenamiento de energía solar, con el propósito de comprender su aplicación en la activación de procesos de desalinización. Además, se formulan la hipótesis y los objetivos que guiarán el desarrollo del estudio, estableciendo las bases para la implementación del sistema propuesto.

Capítulo 2: En el segundo capítulo se presentarán los fundamentos teóricos relacionados con la energía solar y su aplicación en la captación y almacenamiento de energía térmica. Asimismo, se analizará en detalle el proceso de desalinización, con énfasis en la desalinización térmica, explorando sus principios y aplicaciones. Además, se revisarán los conceptos esenciales para la realización de un estudio técnico económico integral, proporcionando el marco necesario para evaluar la viabilidad de las diferentes propuestas.

Capítulo 3: En el tercer capítulo se presentan las diferentes propuestas del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, detallando su funcionamiento y los controles implementados en cada una. Además, se describe su implementación en el programa TRNSYS, incluyendo una breve explicación de los tipos utilizados. Asimismo, se expone la metodología aplicada para el análisis, permitiendo una evaluación detallada de los resultados obtenidos.

Capítulo 4: En el cuarto capítulo se realizará una comparación entre las distintas propuestas con el objetivo de identificar aquella con el mejor desempeño. Este análisis permitirá evaluar sus fortalezas y debilidades, brindando una visión integral de su viabilidad tanto técnica como económica. Además, se presentará un estudio operativo de cada alternativa, analizando su comportamiento a lo largo del año para determinar su eficiencia en diferentes condiciones.

Capítulo 5: En el último capítulo de esta tesis, se presentarán las conclusiones derivadas del desarrollo del proyecto. Se resumirán los hallazgos clave, los resultados obtenidos y cómo estos contribuyen al objetivo general de la investigación. Además, se discutirán las posibles direcciones para trabajos futuros. Estas podrían incluir áreas que requieran más investigación, como también posibles mejoras en la metodología utilizada.

Capítulo 2

2 Fundamentos Teóricos de la Captación Solar y la Desalinización Térmica

En este capítulo se establecen los principales fundamentos relacionados con la energía solar térmica, con un enfoque particular en los sistemas de captación. Se revisará la literatura sobre desalinización, poniendo énfasis en la desalinización térmica y sus aplicaciones con sistemas de captación solar. Además, se abordarán los conceptos técnicos y económicos necesarios para llevar a cabo el análisis de los resultados, proporcionando una base sólida para la evaluación de las propuestas.

2.1 Fundamentos de energía solar

Energía solar

El Sol, la estrella más próxima a nuestro planeta, posee una edad estimada en 5 000 millones de años y se encuentra en la fase intermedia de su ciclo vital. Se trata de una esfera gaseosa constituida mayoritariamente por hidrógeno y helio. En su núcleo tienen lugar reacciones de fusión termonuclear mediante las cuales 564 millones de toneladas de hidrógeno se convierten en 560 millones de toneladas de helio, liberando vetas ingentes de energía que se dispersan en forma de radiación electromagnética. La potencia de esta radiación en la parte superior de la atmósfera terrestre, conocida como constante solar, asciende a aproximadamente $1\,353\text{ W/m}^2$.

Radiación

La radiación solar (**Adalberto & Gabriel, 2015**) se mide en términos de irradiancia, que es la cantidad de energía solar recibida por unidad de área en un tiempo determinado, generalmente expresada en watts por metro cuadrado (W/m^2). Esta medición es crucial para aplicaciones como la energía solar fotovoltaica y térmica, donde se utiliza la energía del Sol para generar electricidad o calor.

Absortividad (α)

Es la proporción de la energía radiante que una superficie absorbe con respecto al total de energía que incide sobre ella.

Albedo

Es la proporción de la radiación incidente que una superficie refleja en una longitud de onda o rango espectral específico (

Tabla 2).

Cuerpo Negro

Se define por la capacidad de emitir íntegramente toda la radiación que absorbe. Cualquier material libera energía en forma de ondas electromagnéticas, aunque no lo hace con igual intensidad en todas las frecuencias o longitudes de onda, sino que obedece la distribución establecida por la ley de Planck.

Tipo de superficie	Albedo (fraccional)
Tierra y atmosfera	0.30
Agua Líquida	0.05 – 0.20
Nieve Fresca	0.75 – 0.95
Nieve Vieja	0.40 – 0.70
Nubes Espesas	0.30 – 0.90
Nubes delgadas	0.20 – 0.70
Mar	0.25 – 0.40
Suelo	0.05 – 0.20
Hierba	0.16 – 0.26
Desierto	0.20 – 0.40
Bosques	0.10 – 0.25
Asfalto	0.05 – 0.20
Concreto	0.10 – 0.35

Tabla 2. Albedos en fracción de algunas superficies.

Emisividad ($\epsilon\lambda$)

Corresponde al cociente entre la radiación emitida por una superficie a una longitud de onda y temperatura específicas y la radiación que emitiría un cuerpo negro ideal bajo las mismas condiciones. En la **Tabla 3** se presentan valores de emisividad para distintas superficies.

Tipo	Superficie	Emisividad infrarroja (%)
Agua	Agua	92-96
	Hielo	96
Suelos pétreos	Arena seca de playa	84
	Arena seca ligera	9589-90
	Arena húmeda	95
	Concreto seco	71-88
Suelo natural	Suelo al descubierto húmedo	95-98
	Suelo revuelto o arado seco	90
	Desierto	90-91
Misceláneo	Hoja blanca	89-95
	Hoja de vidrio	87-94
	Pintura blanca	91-95
	Pintura negra	88-95
	Pintura aluminio	43-55
	Hoja de aluminio	1-5
	Hierro galvanizado	13-28
	Plata altamente pulida	2

Tabla 3. Emisividad infrarroja (%) de diferentes superficies naturales y artificiales.

Irradiación

Es la energía radiante acumulada sobre una superficie o región durante un intervalo de tiempo. Sus unidades pueden expresarse en Joules/m², cal/cm² (también denominado Langley, abreviado ly) o kWh/m²·día, esta última siendo una forma muy empleada para cuantificar este parámetro.

Irradiancia

Es la potencia radiante instantánea que incide o se emite sobre una superficie o área determinada, y se mide en W/m².

Ley de Kirchhoff

Afirma que, en equilibrio termodinámico con su entorno, la emisividad de un cuerpo coincide con su absorptividad; en otras palabras, un excelente reflector es un emisor deficiente.

Ley de Planck

El físico alemán Max Planck formuló que la energía radiada por un cuerpo negro a una temperatura determinada es proporcional a su frecuencia ν , y se cuantiza en múltiplos enteros de $h\nu$, donde h representa la constante de Planck. Este principio se expresa mediante la siguiente relación:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}$$

Donde:

$B_{\lambda}(T)$ = energía por unidad de superficie por unidad de tiempo y por unidad de intervalo de longitud de onda λ , en función de la temperatura (W/m³).

T = temperatura de la superficie del cuerpo en unidades absolutas en Kelvin (K).

h = constante de Planck = $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

k = constante de Boltzman = $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

λ = longitud de onda (metros).

c = velocidad de la luz = $2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$

Ley de Stefan-Boltzmann

Describe la densidad de energía radiante emitida (E) por un cuerpo negro como una función de la temperatura de dicho cuerpo elevada a la cuarta potencia:

$$E = \sigma T^4$$

Donde:

σ = constante de Stefan-Boltzman = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T = temperatura de la superficie del cuerpo en unidades absolutas (K).

Radiación difusa

Corresponde a la energía solar que, tras ser dispersada por la atmósfera, llega a la superficie. Incluye tanto la irradiación que atraviesa las nubes como la que se difunde desde el firmamento. Sin este componente disperso, el cielo permanecería oscuro incluso durante el día, tal como ocurre, por ejemplo, en la Luna.

Radiación directa

Es la porción de energía solar que llega al receptor sin experimentar dispersión atmosférica; en consecuencia, la radiación extraterrestre puede considerarse radiación directa.

Radiación global

Es la suma de la radiación directa más la difusa.

Radiación terrestre

Es la energía que emiten los cuerpos sobre la superficie terrestre, por ejemplo, la radiación emitida por una pared, un charco o un lago.

Radiación total

Es la suma de la radiación global más la terrestre.

Radiancia

Es la componente de irradiancia que se propaga en una dirección específica e incluye un ángulo sólido definido, incidiendo sobre una superficie con un ángulo determinado. Se expresa en unidades de $\text{W/m}^2\text{sr}$ (watts por metro cuadrado por estereorradián).

Reflectividad (ρ_λ)

Es la proporción entre la energía radiante que una superficie devuelve y la energía total que incide sobre ella.

Transmisividad (τ_λ)

Es la fracción de la radiación incidente que atraviesa un medio (agua, vidrio, aire, etc.) con respecto al total de energía que incide sobre la superficie.

2.2 Geometría Solar

Movimiento característico de la tierra

En lo que concierne a los movimientos de la Tierra, dos de ellos resultan ser los más relevantes: el de traslación y el de rotación (**Ferreiro, 1991**). El movimiento de traslación orbital alrededor del Sol ocurre a lo largo de un año solar, con una duración de 365 días, 5 horas, 40 minutos y 46 segundos, y una velocidad orbital de aproximadamente 29 km/s. Este desplazamiento sigue una órbita elíptica, casi circular, producto de la interacción entre la fuerza gravitacional del Sol y la fuerza centrífuga generada por la inercia de la Tierra (**Figura 14**).

Por otro lado, el movimiento de rotación consiste en el giro de la Tierra sobre su propio eje, completando una vuelta en un período de 24 horas. Este eje es una línea conceptual que conecta los polos norte y sur, y permite que la Tierra realice una revolución completa. Durante su traslación, la Tierra describe un plano que contiene a su órbita, denominado plano de la eclíptica. Cabe mencionar que el Sol se encuentra ligeramente desplazado del centro de esta órbita; su afelio, o punto más lejano, se sitúa a unos 152 millones de kilómetros, mientras que su perihelio, o punto más cercano, es de aproximadamente 147 millones de kilómetros.

Solsticios de verano e invierno

La máxima intensidad de la radiación solar siempre se presenta en un plano perpendicular a su dirección de propagación. Sin embargo, debido a que la inclinación del eje de rotación terrestre permanece paralela a sí misma durante todo su recorrido orbital, los rayos solares inciden sobre la superficie terrestre en puntos diferentes cada día del año. Como consecuencia, la intensidad de la radiación solar que alcanza la superficie varía dependiendo tanto de las condiciones atmosféricas como de las coordenadas solares. Estas coordenadas se determinan en función de la longitud de la masa de aire o atmósfera que la radiación debe atravesar, lo cual está condicionado por las variaciones horarias y estacionales a lo largo del año.

De ello se deduce que las variaciones estacionales del clima están directamente relacionadas con la inclinación del eje terrestre. Por ejemplo, el 21 de junio, las regiones situadas a una latitud de

$23^{\circ}27'$ norte reciben los rayos solares en forma perpendicular. En esa fecha tiene lugar el solsticio de verano en el hemisferio norte, mientras que en el hemisferio sur ocurre el solsticio de invierno. Las líneas imaginarias que atraviesan los lugares donde suceden estos eventos se denominan Trópico de Cáncer y Trópico de Capricornio, en los hemisferios norte y sur, respectivamente.

El mayor número de horas de luz diurna ocurre el 21 de junio en el hemisferio norte y el 21 de diciembre en el hemisferio sur. Por el contrario, el menor número de horas de iluminación solar se presenta el 21 de diciembre en el hemisferio norte y el 21 de junio en el hemisferio sur. Existen dos momentos durante el año en los cuales los rayos solares inciden de forma perpendicular sobre el ecuador terrestre, es decir, cuando la declinación solar es de 0° . El primero ocurre el 21 de marzo, conocido como equinoccio de primavera, y el segundo el 23 de septiembre, denominado equinoccio de otoño. En estas fechas, en todos los puntos del planeta, el día y la noche tienen la misma duración. Durante estos equinoccios, los rayos solares que inciden perpendicularmente sobre la Tierra contribuyen, debido al movimiento de rotación del planeta, a definir los círculos imaginarios del trópico de Cáncer, el trópico de Capricornio y el ecuador terrestre (véase la **Figura 15**).

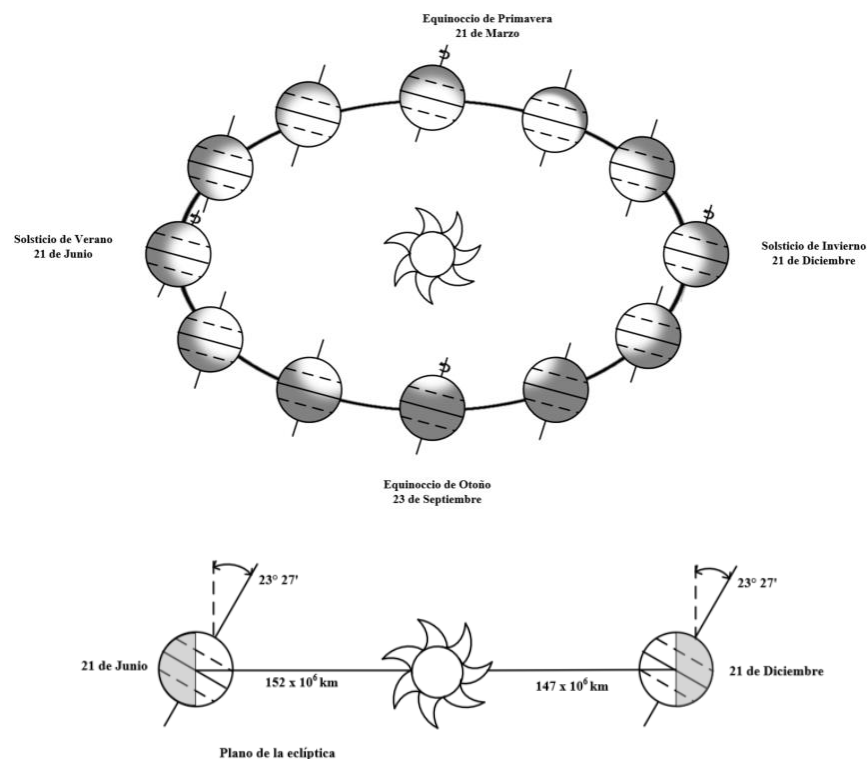


Figura 14. Plano de la eclíptica.

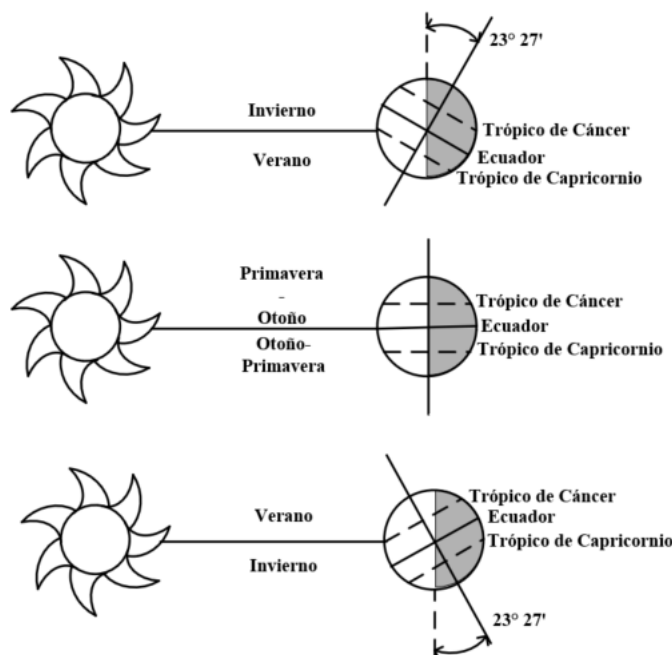


Figura 15. Periodos de incidencia normal de los rayos solares en la tierra.

Ruta aparente del Sol y de la bóveda celeste

El movimiento aparente del Sol alrededor de la Tierra se percibe, desde una ubicación sobre un plano horizontal, como una serie de trayectorias circulares paralelas que varían a lo largo del año. Estas trayectorias se proyectan sobre una semiesfera imaginaria conocida como bóveda celeste, donde cualquier rayo solar, sin importar la posición del Sol, parece dirigirse hacia el centro de dicha semiesfera. En este sentido, el firmamento puede interpretarse como una cúpula hemisférica que reposa sobre un plano horizontal en un punto determinado del globo.

Cualquier cuerpo celeste puede representarse mediante su proyección sobre la bóveda celeste, y su ubicación se define en función de una red de círculos imaginarios que permiten determinar los ángulos solares de altitud y acimut. Las trayectorias del Sol observadas durante el día desde un punto en la Tierra se conocen como la ruta solar. En esta bóveda se identifican puntos de referencia como el cenit, que corresponde al punto más alto directamente sobre el observador, y el nadir, que es su opuesto, situado directamente debajo.

Para localizar un punto en la superficie terrestre, se utilizan las coordenadas geográficas de latitud y longitud. La latitud (también llamada paralelo) es el ángulo formado entre la vertical del lugar y el plano del ecuador, y varía de 0° a 90° , siendo positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur. La longitud (o semimeridiano) es el ángulo diedro entre el meridiano que pasa por el punto en cuestión y el meridiano de referencia (generalmente Greenwich, 0°), con valores que oscilan entre 0° y 180° , tanto hacia el este como hacia el oeste.

Para determinar la posición del Sol en el espacio o sobre la bóveda celeste idealizada, se emplean las coordenadas solares de altitud y acimut, las cuales pueden observarse con mayor claridad en la **Figura 16**.

Por medio métodos matemáticos es posible calcular las coordenadas solares en forma precisa. Para lograr esto, se requiere conocer las coordenadas geográficas del lugar por estudiar (latitud y longitud), el día del año y la hora solar u oficial en que se deba fijar la posición del sol. La ecuación que permite determinar la hora solar verdadera es la siguiente:

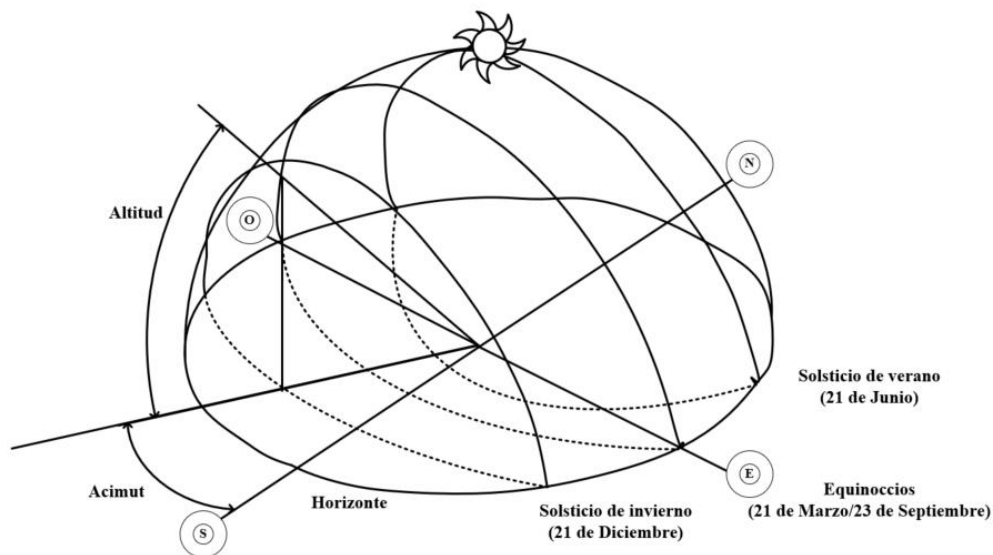


Figura 16. Representación de bóveda celeste

Posición solar

Mediante el uso de métodos numéricos, es posible calcular con precisión las coordenadas solares. Para ello, se requiere conocer la ubicación geográfica del sitio de interés, definida por su latitud (λ) y longitud (L), así como el día del año (n) y la hora solar en la que se desea determinar la posición del Sol.

En este contexto, la hora solar debe expresarse en términos de ángulo horario, el cual representa el desplazamiento angular del meridiano celeste del Sol respecto al meridiano local al mediodía solar verdadero. En este sistema, el ángulo horario es 0.00° a las 12:00 h del mediodía solar, y varía a razón de 15° por cada hora (equivalente a 1° cada 4 minutos).

Por convención:

- Antes del mediodía solar (A.M.), el ángulo horario es positivo.
Por ejemplo, a las 11:00 h, el ángulo horario es $+15^\circ$.
- Después del mediodía solar (P.M.), el ángulo horario es negativo.
Así, a las 13:00 h, el ángulo horario es -15° .

De esta forma, el ángulo horario (τ) se define como:

$$\tau = (12 - \text{hora}) * 15$$

El primer paso en el cálculo es determinar la declinación (δ), la cual puede obtenerse a partir de la ecuación de Cooper:

$$\delta = 23.45^\circ \text{sen} \left(360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right)$$

Donde:

n es el número del día consecutivo del año.

Las coordenadas solares: altura (h) y acimut (z), quedan definidas por las siguientes ecuaciones:

Altura solar:

$$\mathbf{sen\,h = (cos\,\lambda * cos\,\delta * cos\,\tau) + (sen\,\lambda * sen\,\delta)}$$

Acimut solar:

$$\mathbf{cos\,z = \frac{sen\,h * sen\,\lambda - sen\,\delta}{Cos\,h * Cos\,\lambda}}$$

Longitud del día

Haciendo uso de las expresiones anteriores puede calcularse la longitud del día, es decir, el tiempo de sol desde el orto hasta el ocaso. (haciendo $h=0$)

$$\mathbf{\omega = 2\,(arc\,cos\,(-tan\,\lambda * tan\,\delta))}$$

O bien:

$$\mathbf{duración\,del\,día = \frac{\omega}{15}}$$

Mientras que el Orto y el Ocaso se define por:

Orto:

$$\mathbf{\omega_1 = arc\,cos\,(tan\,\lambda * tan\,\delta)}$$

o bien:

$$\mathbf{Orto = \omega_1/15}$$

Ocaso:

$$\mathbf{\omega_2 = -arc\,cos\,(-tan\,\lambda * tan\,\delta)}$$

o bien:

$$Ocaso = \left(\frac{\omega_2}{15} \right) + 12$$

Donde:

Latitud (λ)	Altura solar (h)
Longitud (L)	Acimut (z)
Día del año (n)	Duración del día (ω)
Declinación (δ)	Orto (ω_1)
Ángulo horario (τ)	Ocaso (ω_2)

Una vez establecidas las coordenadas solares de altura y acimut, es factible calcular el ángulo de incidencia (**Figura 17**) del rayo solar sobre cualquier superficie inclinada un ángulo (S) respecto al plano horizontal y orientada un ángulo (o) con respecto al sur. Este ángulo de incidencia (θ) se define como el ángulo formado entre la dirección del rayo solar y la línea perpendicular a la superficie.

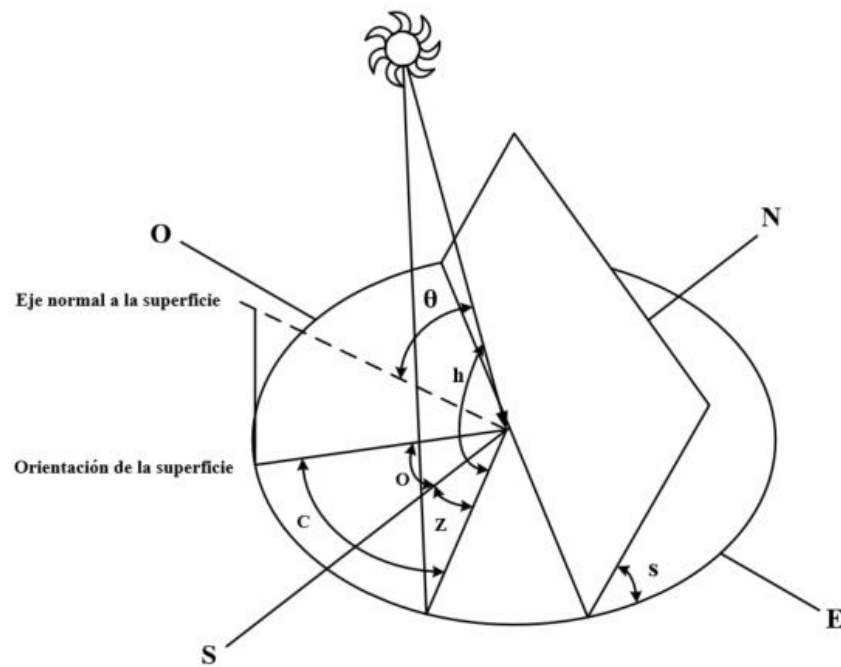


Figura 17. Ángulo de Incidencia (Fuentes, V., 2002)

$$\cos \theta = (\cos h * \cos C * \sin S) + (\sin h * \cos S)$$

Donde:

θ = ángulo de incidencia.

h = altura solar.

C = ángulo formado entre el acimut del rayo solar y la proyección horizontal de la normal de la superficie.

S = inclinación de la superficie con respecto al plano horizontal.

Si la superficie es vertical (fachada), entonces:

$$\cos \theta = (\cos h * \cos C)$$

Todas las expresiones anteriores están dadas en tiempo solar verdadero. La relación entre el tiempo solar verdadero y el tiempo oficial o civil está dada por la expresión:

$$\text{Tiempo solar} = \text{tiempo oficial} + ET + 4 (L_r - L_{loc})$$

Donde:

ET = Ecuación del tiempo

L_r = Longitud del meridiano de referencia horaria oficial (**Tabla 4**)

L_{loc} = Longitud del meridiano del lugar (local) Meridiano de referencia horaria oficiales en la república mexicana

Tabla 4. Meridiano de referencia horaria oficiales en la república mexicana.

Zona	Localidad	Meridiano de referencia Estacional	Meridiano de referencia Normal
1	Baja California Sur, Chihuahua Nayarit y Sinaloa	90°	105°
2	Sonora	105°	105°
3	Baja California Norte	105°	120°
4	Todas las demás entidades federativas	75°	90°

El horario de Verano (Estacional) inicia el primer domingo de abril y finaliza el último domingo de octubre

La ecuación del tiempo puede consultarse en el Anuario Astronómico Nacional o se puede calcular de manera aproximada mediante la fórmula de Spencer:

$$ET = 229.2 (0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B)$$

Donde:

ET = Ecuación del tiempo

B = Ángulo diario (en radianes)

Ángulo Diario

$$B = (n - 1) \left(\frac{360}{365} \right)$$

Donde:

n = número de día consecutivo del año

2.3 Tecnologías de captación solar térmica

La energía solar térmica (**Ferreiro, 1991**) utiliza la radiación del Sol para elevar la temperatura de un fluido, generalmente agua o aire. La capacidad de convertir los rayos solares en calor constituye el principio fundamental de esta fuente renovable. Cualquier material expuesto a la radiación solar aumenta su temperatura de forma natural; por ejemplo, una superficie oscura absorbe más energía y se calienta con mayor rapidez.

Calentador solar de aire

Los calentadores solares de aire (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) son una tecnología de captación solar que aprovecha la radiación solar para calentar aire, en lugar de utilizar fluidos como el agua u otros líquidos térmicos. Estos captadores se emplean en diversas aplicaciones, como la calefacción de espacios, la ventilación solar y el secado de alimentos, entre otros (**Hernández & Quiñonez, 2017**).

Generalmente, estos sistemas están compuestos por una caja o panel con una superficie transparente, la cual permite el paso de la radiación solar hacia el interior. Dentro de esta caja se encuentra un absorbedor, encargado de capturar la radiación solar incidente y transferir el calor al aire que circula dentro del captador.

Esta tecnología es una de las más comunes en colectores solares y presenta ventajas como la capacidad de absorber tanto radiación directa como radiación difusa. Además, el sistema se caracteriza por su baja tasa de fallas, mantenimiento sencillo y facilidad de integración arquitectónica. Sin embargo, uno de sus principales inconvenientes es su baja eficiencia, debido al reducido coeficiente de transferencia de calor por convección. Cabe destacar que la eficiencia tiende a disminuir a medida que aumenta la temperatura del absorbedor, especialmente en los colectores de flujo natural, dado que el absorbedor tendrá muchas más pérdidas con el ambiente, gracias a ese aumento en la temperatura (**Hu & Zhang, 2019**).

La tecnología cuenta con los siguientes componentes:

- Cubierta transparente: Permite el paso de la radiación solar hacia el interior del captador.

- Absorbedor: Superficie que absorbe la radiación solar y la convierte en calor.
- Caja o carcasa: Estructura que contiene la superficie transparente y el absorbedor, y que dirige el flujo de aire a través del captador
- Tubos o conductos: Por donde circula el fluido que se calienta al absorber el calor del absorbedor.
- Aislante: Material que rodea la caja del captador para minimizar las pérdidas de calor hacia el entorno, este material mantendrá el calor generado dentro del captador y a maximizar la eficiencia.

Captador solar de placa plana

Los captadores solares planos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) consisten en una caja plana con una cubierta transparente en la parte frontal, a menudo de vidrio, y un absorbedor en la parte posterior. El absorbedor este pintado de negro para maximizar la absorción de la radiación solar. Detrás del absorbedor, hay una serie de tubos o conductos a través de los cuales circula un fluido, generalmente estos siendo agua o una mezcla de agua y glicol. Cuando la radiación solar incide sobre el absorbedor, este se calienta y transfiere el fluido que circula a través de los tubos. Los captadores solares planos se utilizan principalmente para calentar agua en aplicaciones domésticas, como sistemas de agua caliente para uso residencial, piscinas y calefacción de espacios. También se pueden emplear en aplicaciones comerciales e industriales para procesos que requieran calor a temperatura moderadas (**Tian & Zhao, 2012**).

Los componentes de un colector solar plano son:

- Cubierta transparente: Suele ser de vidrio y permite que la radiación solar pase a través de ella mientras minimiza las pérdidas de calor
- Absorbedor: Superficie que absorbe la radiación solar y la convierte en calor. Por lo general, está pintado de negro aumentar su capacidad de absorción.
- Tubos o conductos: Por donde circula el fluido que se calienta al absorber el calor del absorbedor.

- Aislamiento: Material que rodea la caja del captador para minimizar las pérdidas de calor hacia el entorno.

Captador Parabólico Compuesto (CPC)

Los captadores parabólicos compuestos (CPC) (**Figura 20**) son una forma avanzada de tecnología de captación solar utilizada en sistemas de energía solar concentrada para generar calor o electricidad. Estos captadores se caracterizan por su diseño de espejos parabólicos dispuestos en una configuración plana, que permite concentrar la radiación solar en un punto focal común. Su diseño y funcionamiento se basan en el principio de concentración de la radiación solar utilizando espejos parabólicos para aumentar la intensidad de la radiación solar en un punto focal específico, lo que permite una variedad de aplicaciones en sistemas de energía solar concentrada (**Tian & Zhao, 2012**).

Los captadores cilindros parabólicos compuestos utilizan una serie de espejos parabólicos dispuestos a lo largo de una configuración cilíndrica para concentrar la luz solar en un receptor ubicado a lo largo del eje del cilindro. Cada espejo parabólico refleja la luz solar incidente hacia el receptor, donde se absorbe y se convierte en calor o electricidad, dependiendo de la aplicación.

- Espejos Parabólicos: Son los componentes principales del colector y están diseñados para reflejar la luz solar incidente hacia el punto focal. Los espejos parabólicos tienen una forma parabólica que concentra la luz solar en el receptor tubular.
- Receptor Tubular: Es el componente donde se concentra la radiación solar reflejada por los espejos parabólicos.
- Estructura de soporte: sostiene los espejos parabólicos en su lugar y asegura que estén correctamente alineados para dirigir la luz solar al receptor tubular.

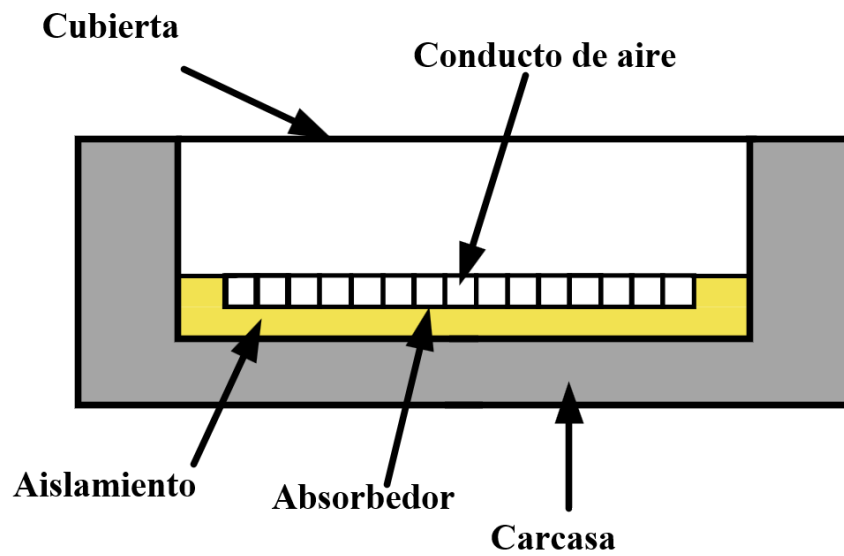


Figura 19. Diagrama de las partes que conforman calentador solar de aire.

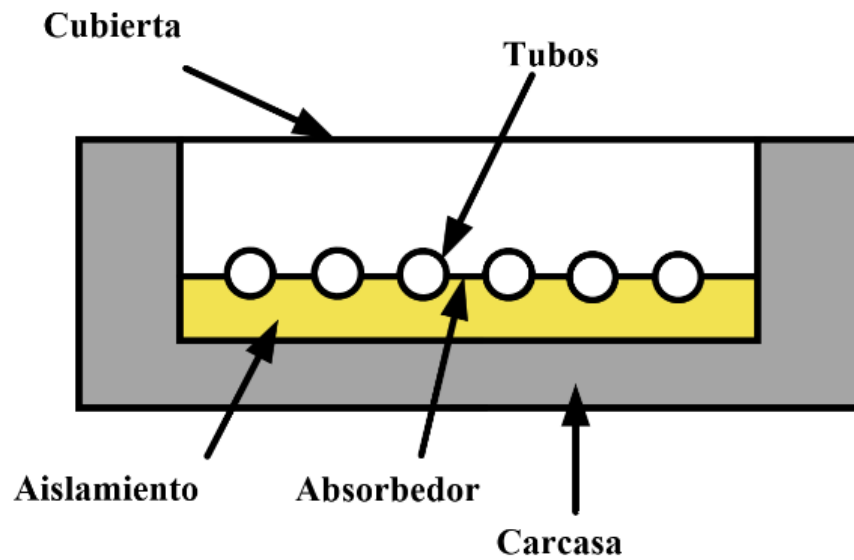


Figura 18. Diagrama de las partes que conforman captador solar plano.

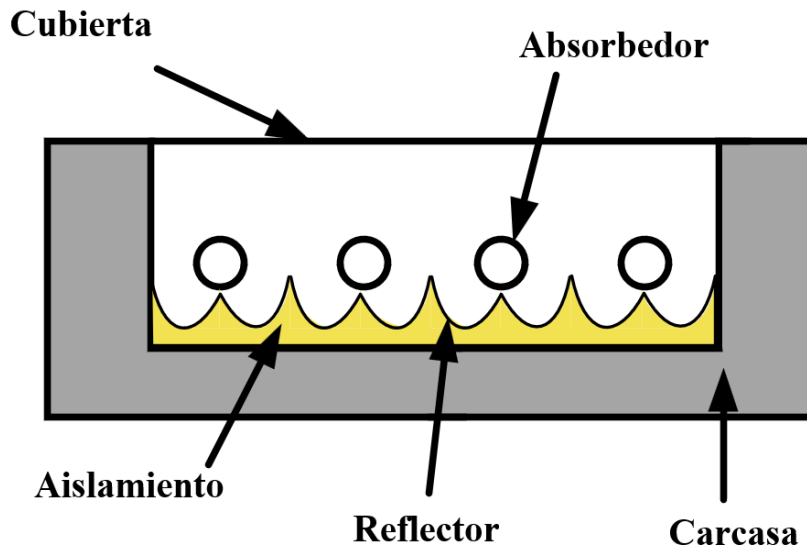


Figura 20. Diagrama de las partes que conforman captador parabólico compuesto (CPC).

Captador de tubo de vacío

Los captadores solares de tubos de vacío (**Figura 21**) son dispositivos diseñados para capturar la radiación solar y convertirla en calor utilizable, especialmente en aplicaciones de calentamiento de agua para uso doméstico, comercial e industrial. Estos captadores utilizan tubos de vacío para mejorar la eficiencia de la captación de energía solar al reducir las pérdidas de calor y proporcionar aislamiento térmico.

Los captadores solares de tubos de vacío consisten en una serie de tubos de vidrio al vacío dispuestos en una placa colectora metálica. Cada tubo de vacío contiene un absorbedor que absorbe la radiación solar y convierte la energía lumínica en calor. El vacío dentro de los tubos minimiza las pérdidas de calor por convección y conducción, aumentando así la eficiencia del captador. A continuación, se presentan los componentes de esta tecnología (**Sabiha et al., 2015**).

Tubos de vacío: Son los componentes principales del captador y están diseñado para capturar la radiación solar y minimizar las pérdidas de calor. Cada tubo contiene un absorbedor que absorbe la radiación solar y convierte la energía en calor.

Absorbedor: Situado dentro de cada tubo de vacío, el absorbedor está diseñado para absorber la radiación y convertirla en calor. Por lo general, está pintado de color oscuro para mejorar la absorción de la radiación solar.

Reflector: Está compuesto por un reflector cilíndrico, laminado al brillo y anodizado galvánicamente, de aluminio puro concentra los rayos solares incidentes sobre las bandas del absorbedor colocadas verticalmente.

Aislamiento: Para minimizar las pérdidas de calor, especialmente durante la noche o en condiciones climáticas frías, los colectores de tubos evacuados suelen estar equipados con aislamiento térmico alrededor de la carcasa y la placa de conexión.

Carcasa: Rodea los tubos evacuados y proporciona protección contra los elementos externos, como el viento, la lluvia y la suciedad. La carcasa también puede ayudar a mejorar la eficiencia térmica del colector al reducir las pérdidas de calor.

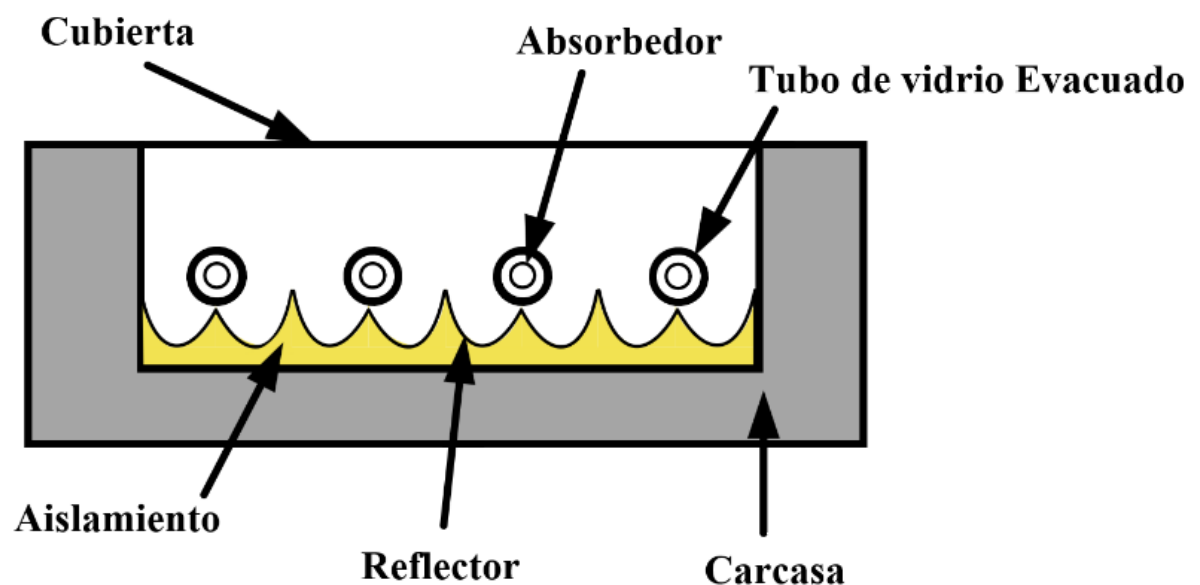


Figura 21. Diagrama de las partes que conforman captador solar de tubos evacuados.

2.4 Almacenamiento de Energía Térmica

La variabilidad natural de la radiación solar, junto con las distintas distribuciones entre la insolación y la demanda térmica, nos conduce a la necesidad de implementar un sistema de almacenamiento de energía térmica en aplicaciones solares, los cuales se emplean con frecuencia en dispositivos para el calentamiento de agua, y también pueden ser utilizados en sistemas de climatización activa o pasiva, así como en procesos de refrigeración. Por ello, un análisis minucioso de la disponibilidad de la radiación solar, del sistema de captación, del tipo de almacenamiento y de los requerimientos energéticos a satisfacer, nos permitirá cubrir las demandas térmicas de una aplicación específica (**Ferreiro, 1991**).

Clasificación

Los tipos de sistemas de almacenamiento para una aplicación determinada depende, entre otros aspectos, de la temperatura de funcionamiento. El almacenamiento de energía térmica a temperaturas bajas (inferiores a 100 °C) puede llevarse a cabo en forma de calor sensible en un medio sólido o líquido, o como calor latente de fusión en sistemas químicos. La elección del medio más adecuado para el almacenamiento de energía depende de la naturaleza del proceso. Para sistemas de calentamiento de agua, las opciones más simples de conservar calor sensible pueden ser mediante un lecho de piedras o utilizando agua, así como con materiales que experimentan un cambio de fase, aprovechando el calor latente de fusión, como es el caso de las sales hidratadas y mezclas eutécticas (**Gil et al., 2009**).

Características de un sistema de almacenamiento de energía térmica:

- Capacidad de almacenamiento por unidad de volumen y peso.
- Modos de adición y extracción de calor.
- Gama de temperaturas de operación.
- Estratificación de temperaturas dentro del sistema de almacenamiento.
- Requerimiento de equipos auxiliares para la adición y extracción de calor.
- Pérdidas caloríficas.

- Vida de servicio.
- Costos.

Almacenamiento por calor sensible

El agua es el medio de acumulación más utilizado, debido a sus propiedades térmicas, ya que tiene un costo reducido y su disponibilidad es bastante amplia. El rango de temperaturas de operación para el agua alcanza hasta los 100 °C en depósitos a presión atmosférica, y temperaturas mayores en tanques presurizados. La captación y almacenamiento de energía térmica del agua que funciona dentro de un determinado intervalo de temperatura está expresada mediante la siguiente ecuación:

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Q = Cantidad de calor

m = masa

C_p = Capacidad calorífica

ΔT = diferencia de temperatura

Características para acumular energía en un sistema de calentamiento de agua:

Es necesario que el depósito cumpla con las siguientes cualidades:

- Flujo con una alta estratificación térmica.
- Eficiente aislamiento contra pérdidas de calor.
- Buena resistencia a la corrosión.
- Volumen de almacenamiento apropiado (considerando la expansión del volumen, el agua contenida en las tuberías, entre otros).
- Adecuado diseño estructural.
- Costo reducido.

Almacenamiento por calor latente

Diversas sustancias químicas con un alto calor de fusión pueden ser empleadas como medios de almacenamiento de energía térmica. Las sales hidratadas son materiales frecuentemente utilizados en sistemas de almacenamiento de energía térmica (SAET) debido a su elevado calor latente de fusión. El rango de temperaturas operativas de estas sales oscila entre 20 °C y 80 °C. Algunas se funden a temperaturas tan bajas como 8 °C, como el $\text{LiClO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; por lo tanto, son adecuadas para aplicaciones de refrigeración. Las mezclas eutécticas también ofrecen buenas propiedades para su aplicación en almacenamiento térmico, como $\text{CaCl}_2\text{--MgCl}_2\text{--H}_2\text{O}$ y acetamida–ácido esteárico.

Las propiedades deseables para materiales de cambio de fase en aplicaciones solares incluyen:

- Alta capacidad de almacenamiento por calor latente de fusión.
- Punto de fusión acorde a las necesidades del proceso.
- Mínima degradación tras numerosos ciclos térmicos.
- No toxicidad ni riesgo de inflamabilidad.
- Bajo costo y amplia disponibilidad.

2.5 Desalinización solar térmica

Introducción a la desalinización térmica: La desalinización térmica es un proceso que utiliza calor para separar el agua salada y producir agua dulce. En un mundo donde el acceso al agua potable es cada vez más crítico, la desalinización térmica se ha convertido en una técnica importante para abordar la escasez de agua en muchas regiones del mundo. La desalinización térmica se basa en el principio de la destilación, donde el agua salada se calienta para evaporar el agua pura y luego se condensa para producir agua dulce. Algunos métodos comunes incluyen la destilación multietapa, donde el agua se calienta y se recoge en etapas sucesivas, y la destilación de película delgada, donde el agua se distribuye en una fina película para aumentar la eficiencia del proceso entre otros como se aprecia en la **Figura 22**.

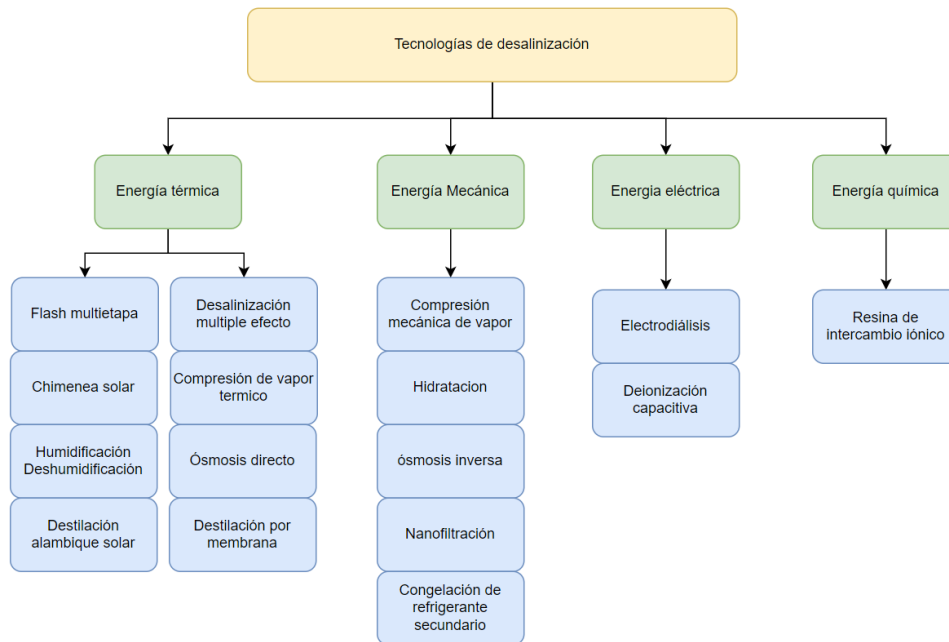


Figura 22. Tecnologías de desalinización.

Desalinización de múltipleefectos (MED)

El sistema MED consta de varios efectos tanto de evaporación como de condensación estos conectados en serie. Para este tipo de tecnología existen varias configuraciones que podríamos utilizar como lo serían la alimentación hacia adelante, hacia atrás o en paralelo (**Shabgard et al., 2019**). La mayoría del tiempo los sistemas de desalinización MED utilizan en su sistema un total de 14 efectos.

La tecnología en cuestión consiste en una serie de efectos consecutivos, en los cuales se mantiene un nivel de presión y temperatura decrecientes desde el primer efecto hasta el último. Cada efecto incluye un par de tubos ubicados en la parte superior, que rocían agua de mar. Esta agua entra en contacto con unos tubos que contienen un fluido caloportador. El fluido, mediante calor latente o sensible, transfiere calor provocando un cambio de fase en el agua de mar, que comparte una temperatura de saturación dentro del efecto, facilitando así la evaporación parcial del agua de mar rociada.

Por un lado, se genera vapor gracias a la evaporación, y por otro, en la parte inferior del efecto, se encuentra una masa de agua de mar denominada salmuera, que contiene una mayor concentración de minerales en comparación con su estado inicial.

El vapor de agua generado se encuentra a una temperatura inferior a la del fluido caloportador. Sin embargo, este vapor puede utilizarse como medio de calentamiento en el siguiente efecto, donde se repite el mismo proceso gracias a la disminución de la presión en el efecto. Esto permite que la salmuera y el vapor de agua cedan suficiente calor para generar más vapor de agua. Este proceso puede repetirse hasta en un máximo de 14 efectos para la generación de agua producto. En el último efecto, el vapor producido se condensará en un intercambiador de calor convencional, obteniendo así un total de agua producto al final del sistema.

Adicional a eso no solo existen sistemas de desalinización de múltipleefecto solamente, además, investigadores han logrado evaluar sistemas en los cuales a este tipo de tecnologías se les implementa un sistema de enfriamiento termosolar con ayuda del agua producto que se genera (**Madhuri et al., 2025**).

Desalinización de múltipleefecto con enfriamiento termosolar

La combinación de un sistema de desalinización y un sistema de enfriamiento ha sido objeto de estudio y aplicación durante un período considerable. Investigadores de diversas áreas han dedicado esfuerzos a comprender el potencial de estos sistemas integrados y su viabilidad para implementación en diversos contextos. Entre estos estudios, destaca el trabajo de **López-Zavala et al. (2019)**, cuyo innovador diseño de un sistema de enfriamiento con desalinización, utilizando un sistema de absorción de LiBr/H₂O y un sistema de desalinización de tres niveles de presión, fue desarrollado en 2019. Con el cual logro satisfacer la necesidad de aclimatación de un espacio y adicional logro producir 838 litros de agua al día. En el mismo año **López-Zavala et al. (2019)** presento un sistema de refrigeración por absorción junto con un sistema de desalinización donde el agua producto del sistema de desalinización será el refrigerante para el sistema de absorción, con esto en mente logro incrementar la potencia de enfriamiento llegando hasta las 572 toneladas de enfriamiento a su vez que lograba producir un total de 73,500 litros de agua producto al día.

Además, **López-Zavala et al. (2023)** presenta ahora un sistema en el cual están presentes un sistema de desalinización tipo FLASH/MED y un sistema de absorción LiBr/H₂O (**Figura 23**) con los cuales logra obtener la producción de 581 toneladas de enfriamiento y una producción diaria de casi 75,000 litros, además de superar los indicadores de rendimiento de un sistema común que existen en el mercado.

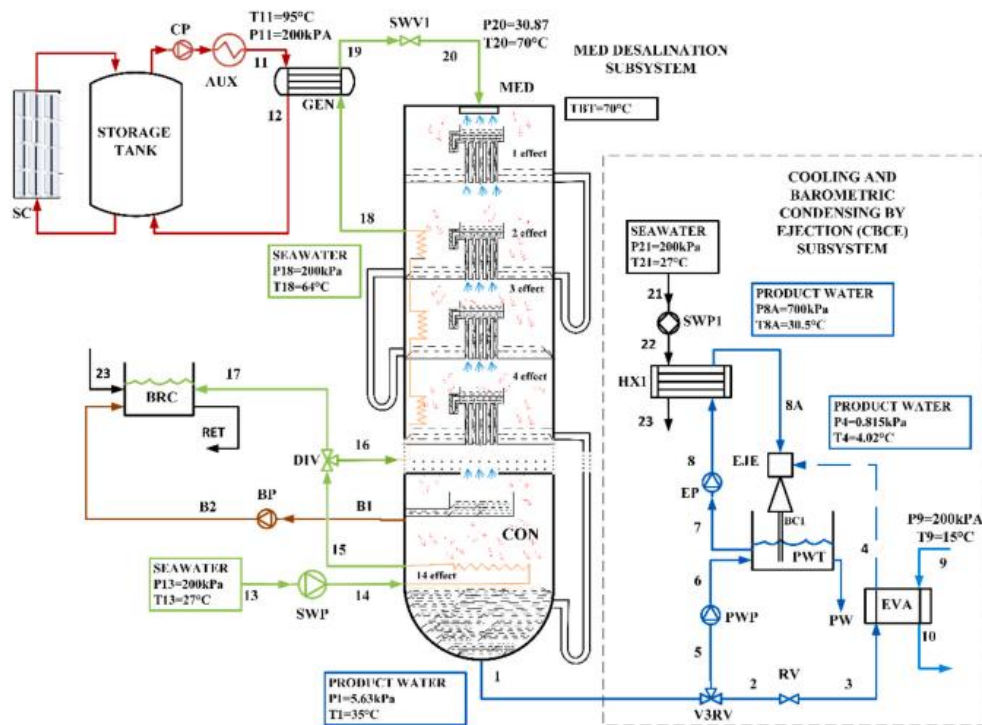


Figura 23. Diagrama del sistema de desalinización y refrigeración alimentado por energía solar.

2.6 Indicadores económicos

En la evaluación de la viabilidad de los sistemas de captación solar térmico y almacenamiento, los indicadores económicos juegan un papel crucial. Estos indicadores permiten analizar la rentabilidad, eficiencia y sostenibilidad financiera del proyecto, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones. Este marco teórico explora los principales indicadores económicos relevantes para este tipo de sistemas, destacando su importancia y aplicabilidad.

Costos de inversión inicial

La inversión inicial (**Communications, 2024**) representa el capital requerido para poner en marcha cualquier proyecto. Para estimar dicha cantidad, el emprendedor debe identificar los recursos disponibles y los desembolsos que implicará su actividad comercial. Estos elementos se establecerán en el plan de inversión inicial, un documento que resume los objetivos y requerimientos del negocio, detallando los ingresos estimados y los costos anticipados necesarios para iniciar la operación.

El costo de los colectores solares, incluyendo paneles y otros componentes esenciales, representa una parte significativa de la inversión inicial. Estos costos varían según la tecnología utilizada:

Colectores Planos: Suelen ser más económicos y adecuados para aplicaciones residenciales y comerciales pequeñas.

Colectores de Tubos de Vacío: Ofrecen mayor eficiencia, especialmente en climas fríos, pero tienen un costo inicial más alto.

Concentradores Solares: Utilizados en aplicaciones industriales, donde se requiere alta temperatura y eficiencia.

Los sistemas de almacenamiento térmico son cruciales para asegurar un suministro constante de energía. Los principales costos incluyen:

Tanques de Almacenamiento de Agua Caliente: Varían en capacidad y aislamiento, influyendo en el costo total.

Además de agregar los costos de instalación de todos los equipos lo cual sumaría a la inversión inicial por parte de la mano de obra y material extra que se vaya necesitando mientras el proyecto está en su etapa de construcción.

Costos de operación

Los costos de operación (**Ceupe, 2023**) son los desembolsos necesarios para mantener un proyecto, una línea de producción o un equipo en funcionamiento. En una empresa convencional, la diferencia entre los ingresos (por ventas y otras fuentes) y el costo de producción determina la ganancia bruta.

Costos variables: Son los gastos que fluctúan según la actividad productiva del proyecto. Dicho de manera simple, a mayor cantidad de producción, mayores costos; y viceversa. Por lo tanto, es un gasto que cambia en relación con lo que la empresa produce.

Costos fijos: Son aquellos que permanecen constantes, sin importar el volumen de producción del proyecto. Es decir, representan un gasto inmutable independientemente de la actividad productiva de una organización.

Indicadores de Rentabilidad

Retorno de la inversión: Este mide la ganancia esperada en comparación con la inversión inicial, proporcionando una visión clara de la rentabilidad del proyecto.

$$ROI = \frac{\textit{Beneficio neto}}{\textit{Inversión inicial}}$$

Período de recuperación: Este indicador calcula el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a través de los ahorros en costos de energía.

$$PR = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ahorros anuales}}$$

Valor presente neto: es un indicador financiero que calcula el valor actual de los flujos de dinero futuros que generará un proyecto, descontándolos a una tasa específica (en este caso, la tasa de inflación). Su objetivo principal es determinar si una inversión es rentable o no.

$$VPN = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

Donde:

I_0 = Inversión inicial

n = Vida útil

C_t = Costos Anuales

i = Tasa de inflación

Costo nivelado de energía: Es una medida del costo promedio por unidad de energía generada a lo largo de la vida útil del sistema. Es útil para comparar la rentabilidad de diferentes fuentes de energía.

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{w,t}}{(1+i)^t}}$$

Donde:

I_0 = Inversión inicial (Pesos)

n = Vida útil (años)

C_t = Costos Anuales (Pesos)

i = Tasa de inflación (%)

$M_{w,t}$ = Producción de agua anual (m^3)

Existen diversos métodos para llevar a cabo un análisis económico que permita evaluar la rentabilidad de un sistema de captación solar, ya sea eléctrico o térmico. El objetivo principal de este análisis es determinar la viabilidad económica de cada una de las propuestas evaluadas, permitiendo no solo una comparación técnica, sino también una evaluación desde el punto de vista financiero. Incluir el factor económico en el análisis brinda una perspectiva más completa, proporcionando un respaldo adicional a la información obtenida y facilitando la toma de decisiones con base en criterios tanto técnicos como económicos **(Qadourah, 2022)**.

Impacto Económico ambiental

Reducción de Emisiones de CO₂: La energía solar reduce las emisiones de gases de efecto invernadero **(Deepak et al., 2024)**, lo cual puede ser valorado económicamente mediante créditos de carbono o beneficios indirectos como la mejora de la salud pública y reducción de costos relacionados con la mitigación del cambio climático.

- Reducción de Emisiones de CO₂
- La disminución de emisiones se traduce en beneficios económicos indirectos:
- Créditos de Carbono: Venta de créditos en mercados de carbono.
- Mejora de la Salud Pública: Reducción de enfermedades relacionadas con la contaminación.

Capítulo 3

3 Diseño y Simulación de un Sistema de Energía Solar Térmica

Durante este capítulo se abordará la descripción de diversas propuestas relacionadas con la captación y almacenamiento de energía solar. Asimismo, se realizará una evaluación detallada con el objetivo realizar las configuraciones más prometedoras para su desarrollo posterior. Dicha evaluación será respaldada mediante simulaciones en un entorno que represente condiciones más cercanas a la realidad, utilizando el programa TRNSYS. El propósito fundamental de este análisis es lograr la activación de una unidad MED al alto vacío convencional y una unidad MED al alto vacío con BTBT, capaces de generar agua producto y, simultáneamente, producir enfriamiento para el área objetivo.

3.1 Descripción del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica

En esta propuesta (**Figura 24**) se busca establecer las bases de la configuración que será desarrollada posteriormente en el entorno de simulación TRNSYS. La propuesta se divide en tres componentes fundamentales: 1) el sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, 2) el suministro de energía térmica hacia la unidad MED y 3) el área final de producción, donde se lleva a cabo tanto el almacenamiento del agua producto como la producción de enfriamiento.

Se establecerán los componentes del sistema de captación y su respectiva descripción operativa, en la cual se detalla el funcionamiento de cada uno de los elementos utilizados, así como el momento en que estos entran en operación. La operación del sistema de captación y almacenamiento de energía térmica inicia cuando la temperatura del fluido a la salida de los colectores (**SAC3**) supera la temperatura de entrada de los mismos (**SAC1**). Este incremento térmico es detectado por el sistema de control, que procede a activar la bomba de los colectores (**BC**) para comenzar el proceso de calentamiento del fluido. El fluido es succionado desde la parte

inferior del termotanque (**TT**) por la bomba y es conducido hacia el arreglo de colectores solares (**ACS**). Durante su paso por este arreglo, el fluido incrementa su temperatura debido a la incidencia de la radiación solar. Posteriormente, el fluido caliente es inyectado nuevamente al termotanque, pero ahora por la parte superior, lo que permite generar un efecto de estratificación térmica dentro del tanque.

Este proceso puede detenerse bajo dos condiciones principales:

- Se alcanza la temperatura objetivo en el termotanque, lo que provoca la detención inmediata de la bomba de los colectores (**BC**).
- La temperatura de entrada al arreglo de colectores resulta ser mayor que la temperatura de salida, lo que indica que la radiación solar disponible es insuficiente, y, por tanto, no es factible continuar con el calentamiento del fluido.

Una vez elevada la temperatura del fluido, el sistema de control a través del transmisor de temperatura 3 (**TT3**) monitorea continuamente la temperatura en la parte superior del termotanque, ya que es desde esta zona donde se realiza el suministro de calor hacia el generador (**GEN**).

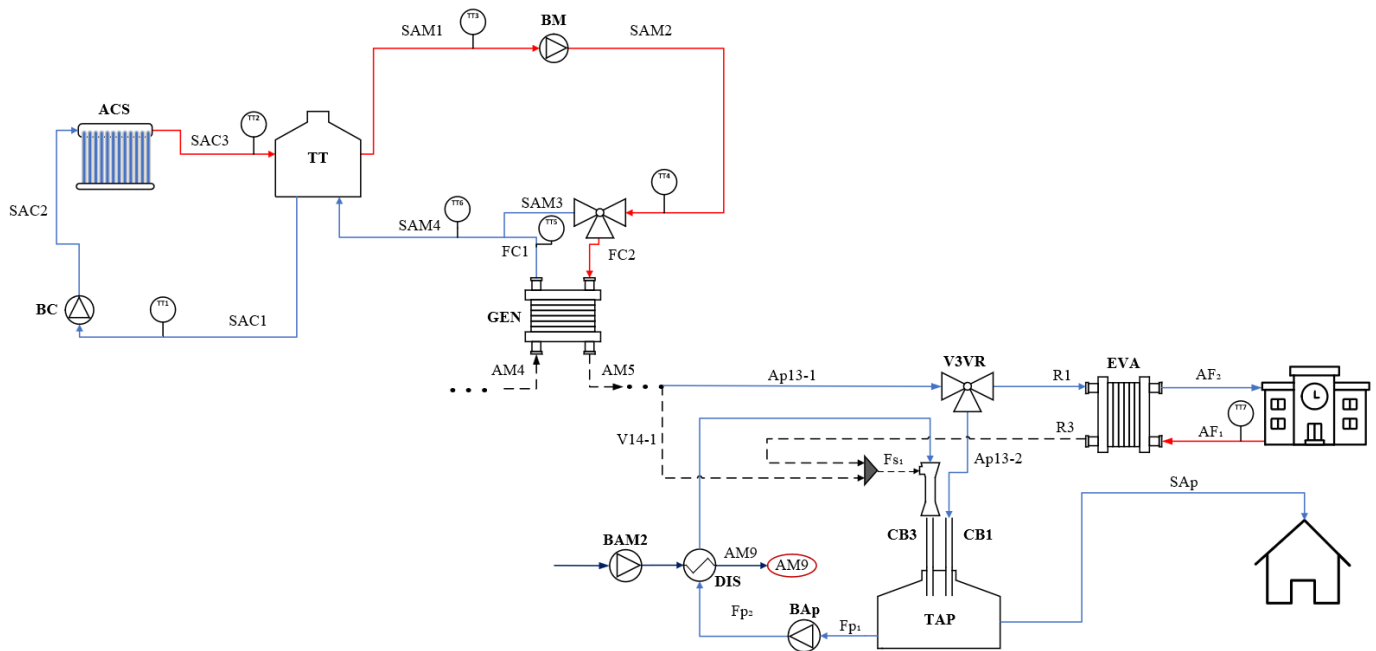


Figura 24. Propuesta tecnológica para su posterior desarrollo en el entorno de TRNSYS.

Para que este suministro pueda llevarse a cabo, la temperatura debe mantenerse dentro de un rango operativo comprendido entre los 78 °C y 95 °C. No obstante, para el primer arranque de la bomba de la unidad MED (BM), se establece como condición que la temperatura mínima en el termotanque sea de 95 °C. Este requisito garantiza que exista la cantidad de energía térmica suficiente para activar adecuadamente el sistema desde su estado inicial. Una vez realizado este primer encendido, se permite que la bomba vuelva a operar a partir de una temperatura mínima de 80 °C, considerando que, a partir de ese punto, el sistema de captación solar continuará elevando la temperatura del fluido dentro del termotanque. De esta forma, se evita que la bomba se detenga nuevamente por no alcanzar la temperatura mínima requerida para su funcionamiento.

La cantidad de calor que se introduce en el generador debe mantenerse constante con el objetivo de asegurar una producción uniforme de agua, lo cual permite un control más preciso sobre el volumen generado en todo momento. Dado que el fluido de trabajo opera dentro de un rango de temperatura establecido (78 °C a 95 °C), y se requiere un aporte térmico constante, se emplea una válvula de tres vías. Esta válvula regula el flujo de fluido que ingresa al generador en función de la temperatura medida justo antes del punto de entrada, permitiendo que solo una fracción del flujo total sea dirigida hacia el generador, garantizando así un suministro térmico constante.

La forma en la que se basa es en la ecuación de calor sensible:

$$Q = \dot{m} C_p (T_s - T_e)$$

En esta ecuación, se fija el valor de Q (cantidad de calor requerida por el generador), así como el calor específico del fluido a presión constante C_p , y la temperatura de salida deseada T_s . El rango operativo de la temperatura de entrada T_e se establece previamente. De esta forma, la única variable que se determina a partir de la ecuación es el flujo másico $\dot{m}$, permitiendo calcular el flujo que debe entrar al generador para mantener constante el aporte de calor, independientemente de las variaciones térmicas del fluido.

Ahora, se aborda la sección correspondiente al almacenamiento de agua producto y la producción de enfriamiento. En esta etapa se monitorea tanto el volumen de agua acumulada como el requerimiento de enfriamiento, con el objetivo de establecer un control que permita detener la producción de agua en caso de alcanzar el volumen diario permitido o si el almacenamiento ha llegado a su capacidad máxima.

El funcionamiento de este subsistema se basa en el monitoreo del tanque de agua producto (**TAP**), ya que el control supervisará la cantidad de agua introducida diariamente en el termotanque. La cantidad máxima permitida varía según la temporada: 4 m³ diarios en invierno y 8 m³ diarios en verano. Existen dos condiciones principales que detienen la operación de la bomba MED: la primera es alcanzar la cantidad de agua establecida para la temporada correspondiente, y la segunda es el llenado total del tanque de agua producto, ya que, en este caso, no se tendría forma de almacenar más agua, incluso si no se ha cumplido con la demanda diaria. En cualquiera de estas situaciones, la bomba MED se apagará automáticamente, deteniendo la producción de agua y el proceso de enfriamiento.

Asimismo, es fundamental controlar el caudal de agua que se introduce en el evaporador (**EVA**), ya que de ello depende directamente la capacidad de enfriamiento proporcionada. Este control se realiza mediante una válvula de tres vías ubicada antes del evaporador. Según la demanda de enfriamiento, dicha válvula permitirá el paso de un porcentaje del total de agua producto a través de la ruta R1 hacia el evaporador, mientras que el porcentaje restante será conducido mediante la línea Ap13-2 hacia el tanque de agua producto. En caso de que no se requiera enfriamiento, la totalidad del caudal de agua será redirigida al tanque de agua producto.

Es importante destacar que la producción de enfriamiento está directamente vinculada a la existencia de producción de agua. Es decir, el sistema de enfriamiento solo opera cuando hay una producción de agua. En el caso de que no se esté produciendo agua, y se requiera enfriamiento, este no estará disponible, dado que el proceso de enfriamiento depende de la producción de agua.

Controles adicionales

Control para los días viernes

Existen controles adicionales distribuidos a lo largo del sistema, entre los cuales destaca el control específico para los fines de semana. Este control tiene como objetivo principal evitar el funcionamiento de la bomba MED durante los días sábado y domingo, ya que estos días están destinados exclusivamente a la recuperación de temperatura dentro del termotanque.

Para garantizar la disponibilidad de agua durante estos días, a lo largo de la semana se programa la producción diaria de manera que también se acumule el volumen necesario para cubrir la demanda del fin de semana. No obstante, si al llegar el viernes el sistema no ha logrado almacenar el volumen requerido, se activa un control especial que permite a la bomba MED operar ese día hasta alcanzar el volumen total necesario, siempre que la temperatura del termotanque lo permita. En este escenario, la producción del viernes estará destinada tanto a cubrir la demanda de ese mismo día como a compensar el déficit de almacenamiento para el fin de semana, asegurando así la continuidad del suministro de agua.

Calendario de enfriamiento

Se deben tomar en cuenta tanto las horas necesarias de enfriamiento a lo largo del día como la época del año en la que este servicio es requerido. Por ello, se ha implementado un control basado en la hora del día, el cual establece el inicio y fin del periodo durante el cual el sistema debe mantenerse encendido, garantizando así el número mínimo de horas de operación necesarias para satisfacer la demanda de enfriamiento del espacio.

Además, dado que el sistema de enfriamiento no es requerido durante todo el año, se ha incorporado un control adicional basado en un calendario, específicamente el calendario escolar. Esto se debe a que el sistema tiene como objetivo proporcionar enfriamiento a las aulas de una escuela; por lo tanto, en los días en que no haya actividades escolares ni presencia de personas en las instalaciones, el sistema de enfriamiento no se activará.

3.2 Metodología de simulación

Para llevar a cabo el estudio dentro del simulador se generó un diagrama de la metodología que debemos de llevar a cabo para el desarrollo de nuestro sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica activando una unidad productora de agua y enfriamiento. En la **Figura 25** observamos la distribución de este.

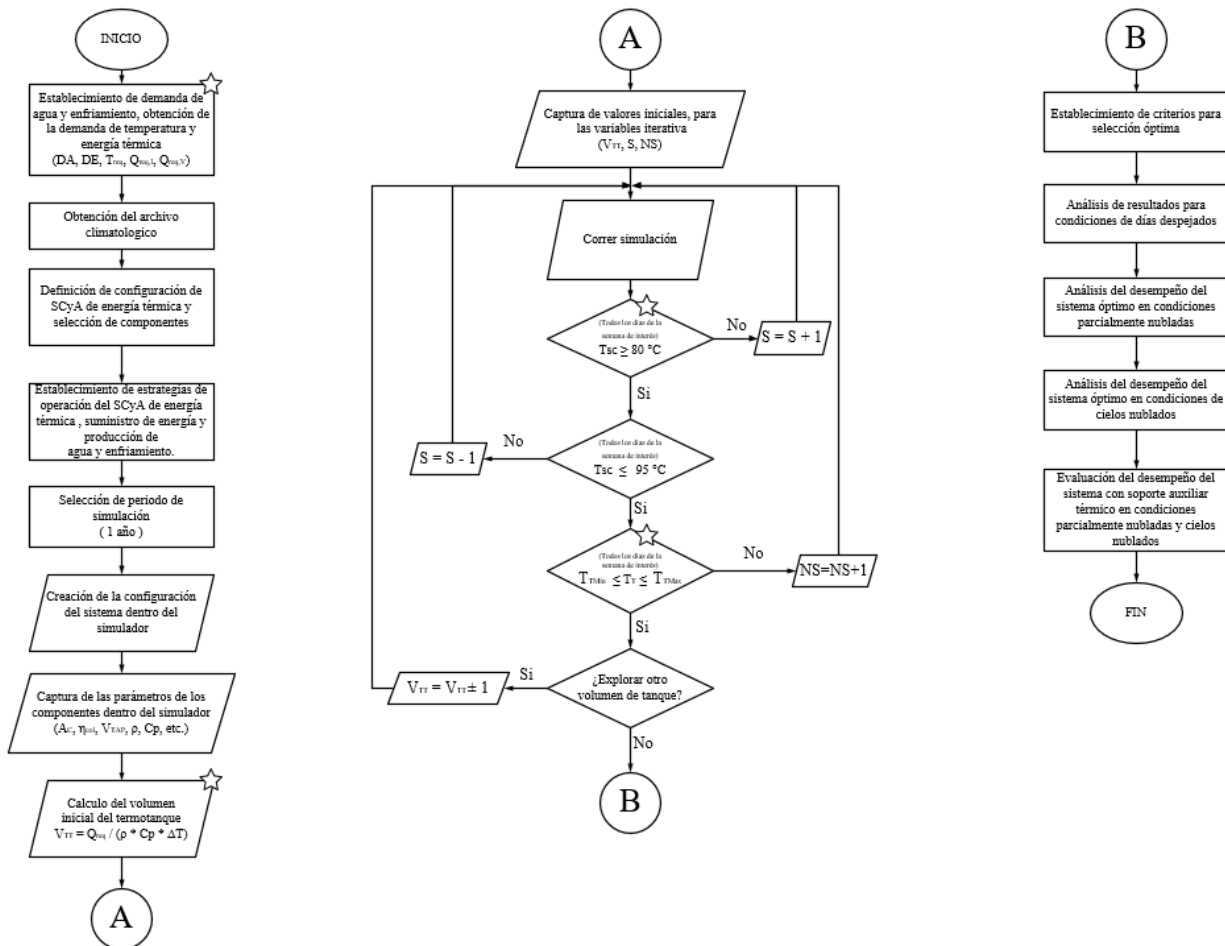


Figura 25. Diagrama de la metodología de simulación y selección del sistema con mejor desempeño.

Establecimiento de demanda

Para el establecimiento del sistema, es necesario ubicar primero el sitio en el cual se solventará la demanda de agua y enfriamiento. En este caso, se seleccionó el poblado de Puertecitos, ubicado en el poblado de Puertecitos, Baja California, México. En esta localidad se identificaron 20 hogares sin acceso a agua potable, a los cuales se les brindará el servicio de abastecimiento de agua. Asimismo, en la misma comunidad se encuentra una escuela primaria, la cual será beneficiada con el suministro de enfriamiento para sus aulas.

El primer punto es establecer la demanda de agua y enfriamiento que vamos a resolver, esto a partir, de encuestas realizadas en la zona en la que vamos a resolver el problema de agua y entender la cantidad de enfriamiento que se requiere para el espacio al cual se le proveerá el enfriamiento. Las encuestas (**Figura 26**) constaban de una ronda de preguntas en las cuales se calculaba la cantidad de agua que se requería por vivienda.

	
Encuesta para la cuantificación de la demanda de agua en la comunidad del poblado de Puertecitos, B.C. Nombre: _____ Fecha: _____	
1. ¿Cuánto tiempo lleva viviendo usted y su familia (si aplica) en esta comunidad?	
2. ¿Cuántas personas habitan en la vivienda? a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 o más ¿cuántas? _____	
2. ¿Se consideran una población fija o flotante durante el año? a) Población fija b) Población flotante	
3. De las personas que habitan la vivienda, ¿Cuántas viven de manera fija durante todo el año? a) Todas b) 1 c) 2 d) 3 e) 4 o más ¿cuántas? _____	
4. ¿De qué manera obtienen el agua potable para consumo humano? a) Tiendas b) Transporte en pipa c) Tomada de un pozo d) Comprada en una comunidad vecina e) Otro:	
6. ¿Cuánta cantidad de agua para consumo humano (litros/cubetas/ garrafones) suelen comprar? a) Diaria: b) Semanal: c) Quincenal: d) Mensual: e) Otro:	
7. ¿Cuánta cantidad de agua actividades humanas (litros/cubetas/ garrafones) suelen comprar? a) Diaria: b) Semanal: c) Quincenal: d) Mensual: e) Otro:	
8. ¿Cuál es el precio que pagan por el servicio de agua para consumo humano? a) Precio por litro: b) Precio por garrafón: c) Precio por cubeta: d) Precio por depósito:	
9. ¿Cuál es el precio que pagan por el servicio de agua para act. humanas? e) Precio por litro: f) Precio por garrafón: g) Precio por cubeta: h) Precio por depósito:	
10. ¿Considera que la calidad del servicio de agua (para consumo) es buena? a) Sí b) No	

Figura 26. Encuestas realizadas para estimar el consumo de agua en las viviendas de la zona de estudio.

A partir de la encuesta realizada en la localidad durante el mes de noviembre, se determinó que las necesidades de agua se estiman en aproximadamente 3000 litros diarios (3 m^3). Cabe destacar que estas encuestas reflejan las condiciones particulares de la temporada invernal. Al replicar el estudio en dicha estación, se observaron patrones consistentes con una menor demanda en comparación con el verano.

De acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2012), en la región donde se encuentra ubicada la localidad, la demanda de agua incrementa entre un 32% y un 44% durante la temporada de verano. Con base en este dato, se estimó que la demanda máxima podría alcanzar aproximadamente los 6000 litros diarios (6 m^3).

Por otro lado, la demanda de enfriamiento del espacio destinado a una escuela, alcanza un máximo de 10 toneladas de refrigeración, en un periodo comprendido entre las 7:00 a.m. y las 3:00 p.m., horario en el cual se desarrollan las actividades escolares.

A partir de esta información, y como se establece en la descripción operativa, se definió que el sistema productor de agua y enfriamiento debe ser capaz de satisfacer simultáneamente ambas necesidades: la demanda de agua y las horas de enfriamiento requeridas en temporada de verano. Por esta razón, se determinó que la unidad debe ser capaz de producir aproximadamente 1 m^3 por hora. Con este ritmo de producción, es posible cubrir los 6 m^3 diarios necesarios durante las 6 horas críticas del día. Este diseño, además, garantiza que la demanda de agua durante el invierno menor en comparación se cumpla de forma automática al operar el sistema bajo las mismas condiciones de verano, considerando que el tiempo mínimo de operación está definido por la necesidad de enfriamiento.

A continuación, en la **Tabla 5** se presenta la demanda que se busca cubrir en el sitio donde se pretende implementar la unidad, así como las características de las unidades productoras de agua y enfriamiento que se emplearán para cumplir con dicha demanda. Esto permitirá realizar una comparación al finalizar el estudio. Para ello, se llevó a cabo una investigación sobre las especificaciones técnicas de ambas máquinas, cuyos resultados se integran en la tabla mencionada. Con base en esta información, se procede al siguiente punto dentro de la metodología de simulación.

Tabla 5. Comparación de parámetros operativos: ATBT vs. BTBT.

Establecimiento de operación		
Demanda de agua máxima	6000 L/día	
Demanda de enfriamiento máxima	10 toneladas de enfriamiento	
	ATBT	BTBT
Calor de activación	40 kW	25 kW
Producción de agua	936 l/hr	982.8 l/hr
Producción de enfriamiento máximo	183 toneladas de enfriamiento	193 toneladas de enfriamiento
Rango de temperatura	(78 °C - 95 °C)	(35 °C - 95 °C)
Calor requerido en invierno	170 kWh	100 kWh
Calor requerido en verano	342 kWh	200 kWh

Obtención del archivo Climatológico

Para la obtención del archivo climatológico es posible recurrir a diversas fuentes, como programas especializados o sitios web dedicados a la recopilación y distribución de datos climáticos. A partir de esta información, se puede ubicar con precisión la zona de estudio.

En este proyecto, se optó por utilizar el programa Meteonorm, mediante el cual se generó el archivo climatológico correspondiente a la localidad de estudio, utilizando como referencia su latitud y longitud. El resultado fue un archivo tipo TMY (Typical Meteorological Year), que posteriormente fue empleado en el programa de simulación. La elección de Meteonorm sobre otras alternativas se debe a que este software ha sido previamente validado y utilizado en diversos proyectos de investigación, lo cual lo convierte en una fuente confiable para la obtención de este tipo de datos.

Selección de periodo de simulación

En la **Tabla 6**, detalla los periodos de simulación, abarcando tanto la fase de arranque del sistema, en la que se eleva la temperatura del termotanque desde su valor inicial hasta la temperatura objetivo, para ambos periodos de análisis (invierno y verano), con ello establecemos la temperatura promedio de las semanas de estudio y observar cómo afectara a las pérdidas que se tengan en el termotanque con respecto a la temperatura ambiente y la radiación promedio diaria que tendremos alrededor del periodo de simulación.

Temporada de invierno

El periodo de análisis para invierno comprende del jueves 20 de noviembre al miércoles 26 de noviembre, abarcando una semana completa. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa que la temperatura ambiental varía entre un mínimo de 12°C y un máximo de 30°C. Durante estos días, la radiación solar máxima registrada alcanza 700 W/m². Este periodo fue seleccionado debido a que la radiación mantiene un comportamiento estable, sin interrupciones ni disminuciones abruptas causadas por nubosidad, lo que permite evaluar el desempeño del sistema en condiciones de radiación constante.

Temporada de verano

El periodo de análisis para el arranque en verano comprende del miércoles 23 de abril al martes 29 de abril, abarcando una semana completa. En **Figura 28** se observa el comportamiento de la temperatura ambiental y la radiación incidente a lo largo de estos días. Durante esta semana, la temperatura ambiental varía entre un mínimo de 14°C y un máximo de 27°C. En cuanto a la radiación solar, se registran picos máximos de aproximadamente 1000 W/m². La selección de este periodo sigue el mismo criterio que el del invierno, ya que se busca analizar días en los que la radiación no presente interrupciones. Esto permite evaluar el comportamiento del sistema en condiciones ideales, proporcionando una referencia clara sobre el proceso de arranque.

Tabla 6. Condiciones climáticas simuladas: invierno vs. verano.

INVIERNO	
Periodo simulación	Jueves 20 de noviembre al miércoles 26 de noviembre
Radiación promedio diaria	3.9 kWh/m ²
Temperatura promedio	20.20 °C
VERANO	
Inicio del periodo simulado	Miércoles 23 de abril al martes 29 de abril
Radiación promedio diaria	7 kWh/m ²
Temperatura promedio	19.84 °C

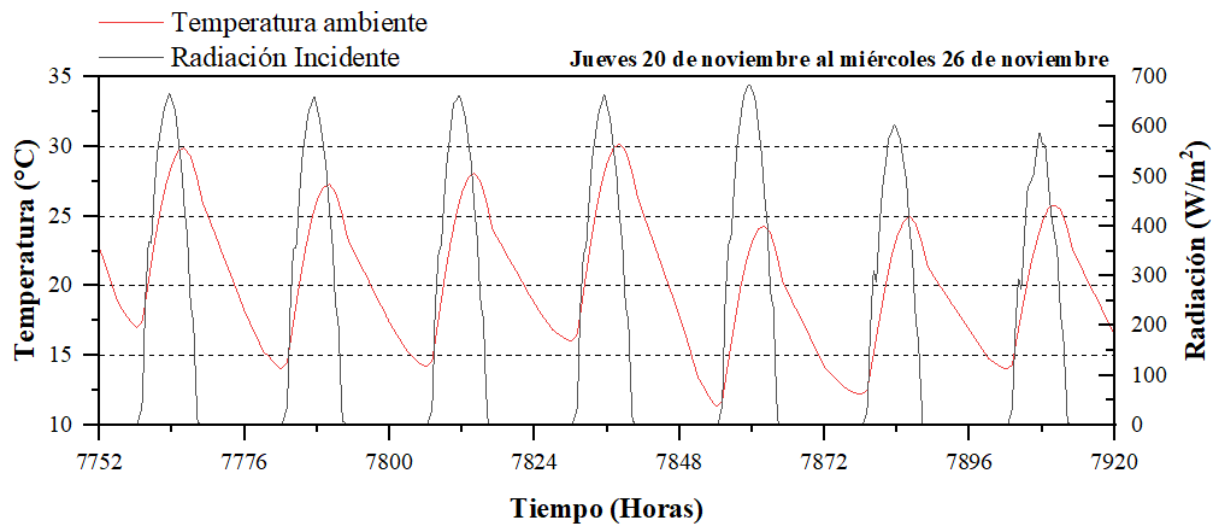


Figura 27. Variación horaria de temperatura ambiente y radiación incidente en invierno.

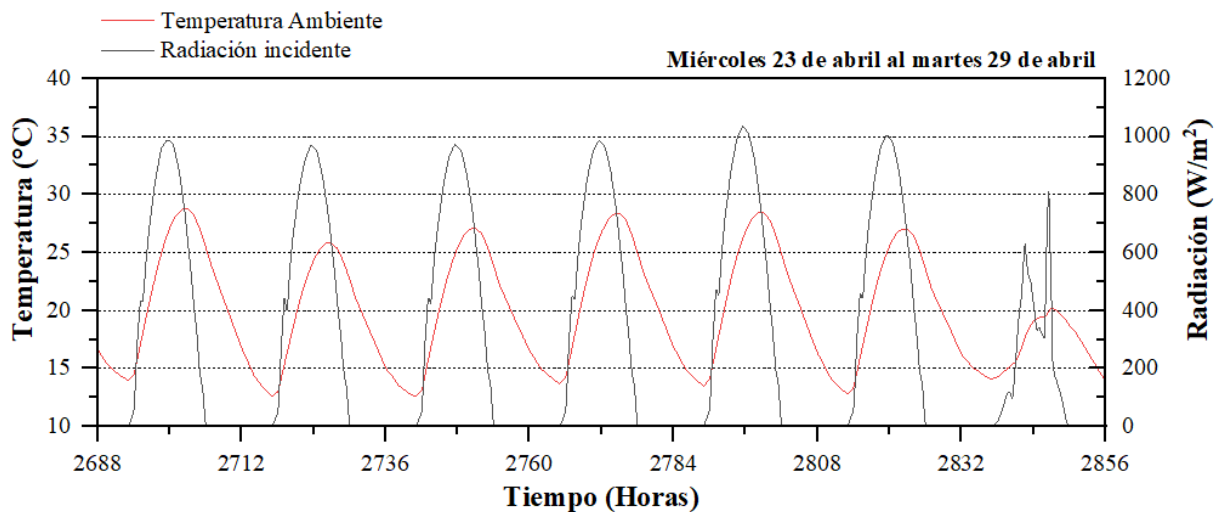


Figura 28. Variación horaria de temperatura ambiente y radiación incidente en verano.

Semanas de análisis de producción de agua y enfriamiento

La **Tabla 7** presenta los periodos de simulación utilizados para la fase de producción, indicando la radiación solar promedio diaria y la temperatura ambiental promedio a lo largo de la semana analizada en cada temporada.

Temporada de Invierno

Para la temporada de invierno, el periodo de simulación (**Figura 29**) seleccionado abarca del lunes 24 de febrero al domingo 2 de marzo, lo que permite evaluar el comportamiento del sistema durante una semana completa. Durante estos días, la radiación solar promedio diaria es de 5.2 kWh/m², con valores pico de radiación incidente de alrededor de 850 W/m², lo que representa un nivel de irradiación adecuado para la operación del sistema en esta estación del año. Asimismo, la temperatura ambiental promedio a lo largo de la semana es de 18.24°C, reflejando condiciones típicas de invierno en la zona de estudio. Durante este periodo, la temperatura mínima registrada es de aproximadamente 9°C, mientras que la temperatura máxima alcanza 28.5°C. Estos datos permiten observar con mayor detalle el comportamiento del termotanque y del arreglo de colectores solares a lo largo de la semana, proporcionando información clave sobre la eficiencia y estabilidad del sistema en condiciones invernales.

Tabla 7. Condiciones climáticas durante las semanas de análisis: producción de agua y enfriamiento.

INVIERNO	
Periodo de simulación	Lunes 24 de febrero a domingo 2 de marzo
Radiación promedio diaria	5.2 kWh/m ²
Temperatura promedio	18.24 °C
VERANO	
Periodo de simulación	Lunes 25 de agosto a domingo 31 de agosto
Radiación promedio diaria	7 kWh/m ²
Temperatura promedio	32.61 °C

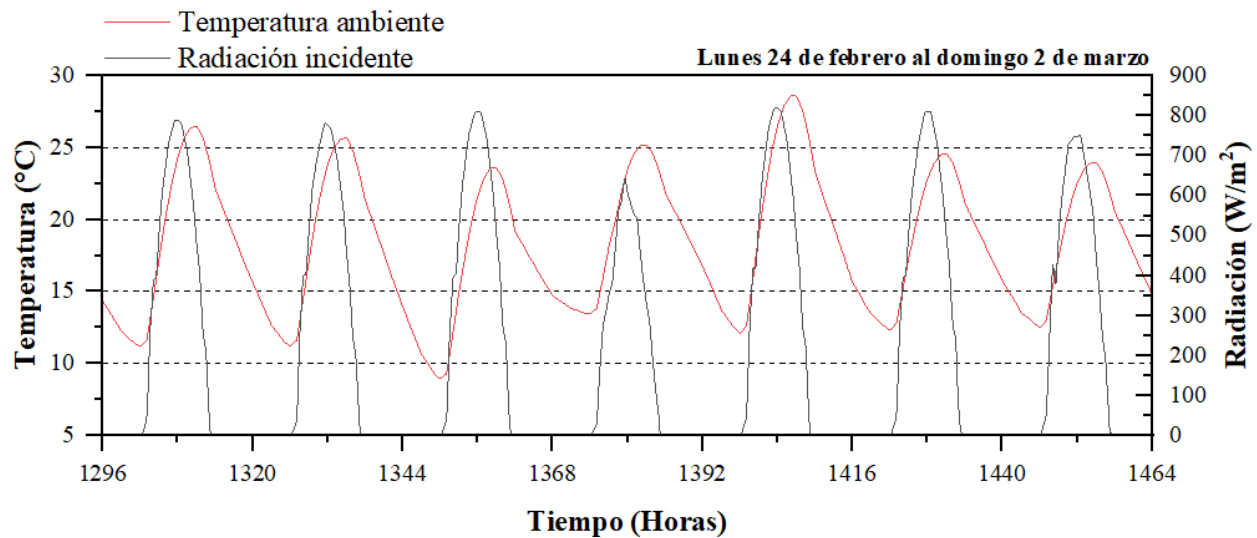


Figura 29. Perfil horario de temperatura ambiente y radiación incidente durante la semana de invierno (24 feb - 2 mar).

Temporada de verano

Por otro lado, para la temporada de verano, se seleccionó el periodo comprendido entre el lunes 25 de agosto y el domingo 31 de agosto, como se muestra en la **Tabla 7**, permitiendo observar el comportamiento del sistema bajo condiciones de mayor radiación y temperatura, lo cual se representa en la **Figura 30**. En este caso, la radiación solar promedio diaria asciende a 7 kWh/m², con una irradiancia máxima de 986 W/m², lo que indica una mayor disponibilidad de energía térmica en comparación con el invierno.

Además, la temperatura ambiental promedio registrada durante esta semana es de 32.61°C, evidenciando un ambiente significativamente más cálido. A lo largo del periodo analizado, la temperatura mínima registrada es de 25°C, mientras que la temperatura máxima alcanza los 40°C, proporcionando condiciones ideales para evaluar el rendimiento del sistema en escenarios de alta temperatura y radiación. La selección de estos periodos de simulación responde a la necesidad de analizar el desempeño del sistema en condiciones representativas de cada estación del año. En ambos casos, se buscó asegurar que la radiación incidente no presentara interrupciones significativas debido a nubosidad u otros factores climáticos, permitiendo evaluar de manera más precisa la respuesta térmica del sistema y su capacidad de producción de agua y enfriamiento.

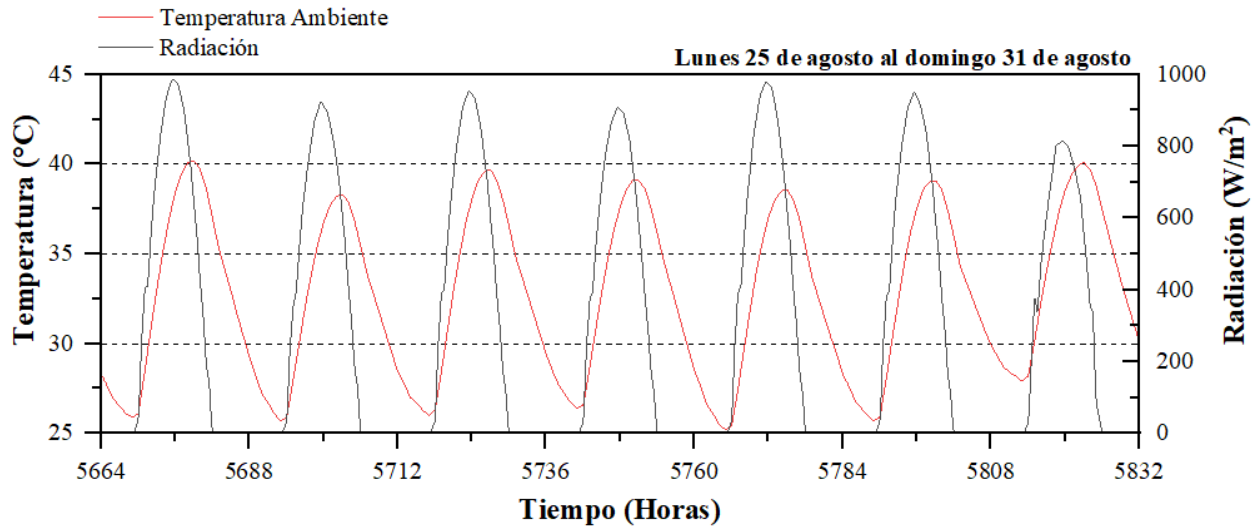


Figura 30. Comportamiento horario de temperatura ambiente y radiación incidente durante la semana de verano (25-31 ago).

3.3 Creación de simulador

Una vez identificados todos los puntos anteriores, se procede al desarrollo del simulador utilizando un programa especializado. Para este estudio, se optó por el software TRNSYS, el cual resulta altamente adecuado y amigable para la simulación de sistemas basados en energías renovables. En este caso particular, se emplearán colectores solares, los cuales ya se encuentran integrados como componentes dentro del entorno del programa.

En la **Tabla 8** se listan todos los Types utilizados en la simulación, junto con su función específica dentro del sistema modelado. Asimismo, se describen las principales características de cada uno de estos Types. Cabe aclarar que dichas descripciones no abarcan la totalidad de sus propiedades, sino que se enfocan en los atributos más relevantes para el presente estudio.

Dentro de la Tabla 9 se presentan las diferentes secciones que conforman el simulador, el cual se divide en tres partes esenciales: el subsistema de captación y almacenamiento de energía térmica, el subsistema de suministro de energía, y el subsistema de almacenamiento de agua producto y producción de enfriamiento. Cada uno de estos bloques incluye sus respectivos controles operativos, los cuales permiten su funcionamiento adecuado conforme a lo descrito previamente en la Sección 3.3.1.

Tabla 8. Configuración de componentes en TRNSYS: Types, simbología y características clave.

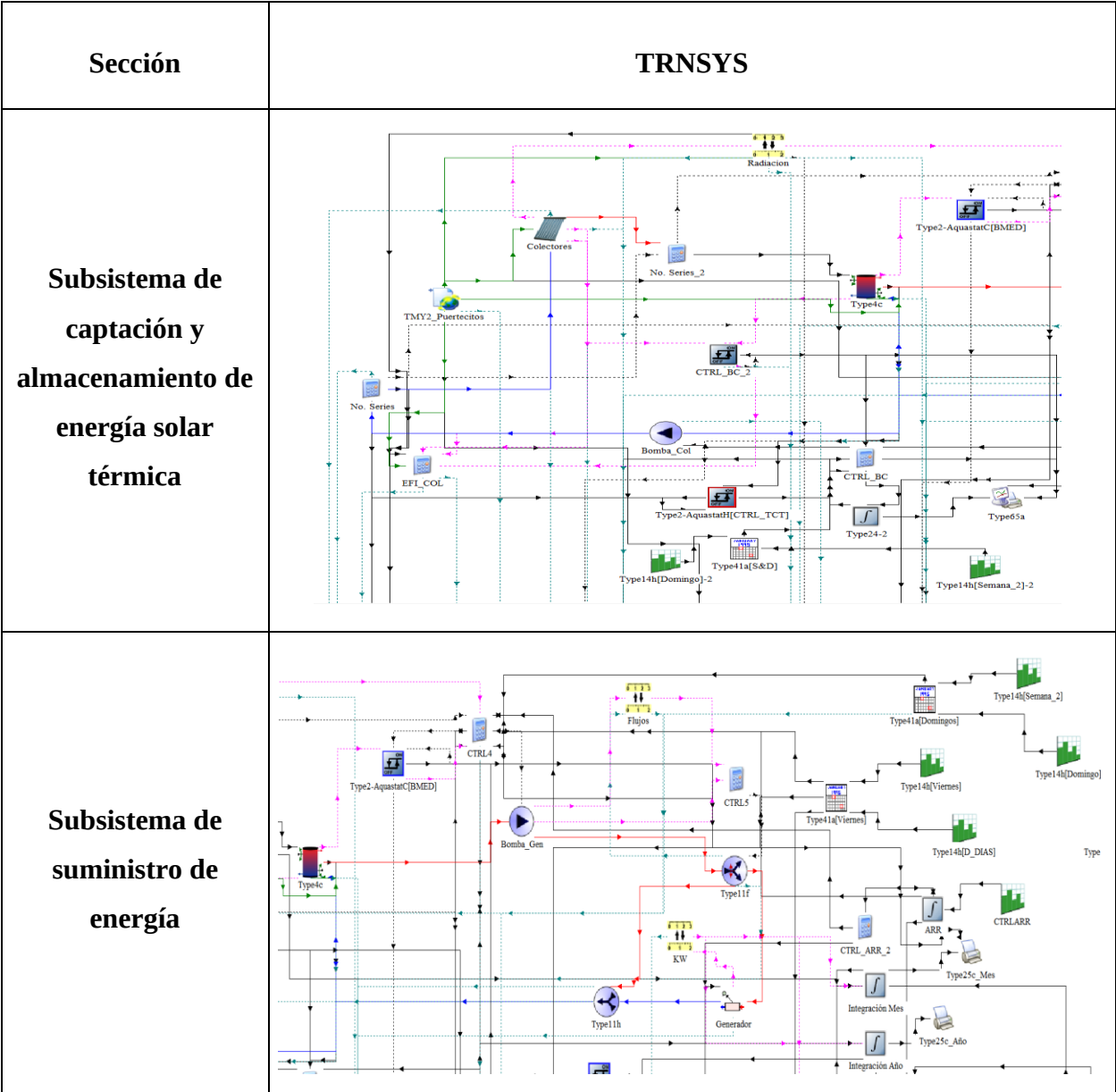
Componente	Type	Simbología	Características
TMY2_Puertecitos	15-2	 TMY2_Puertecitos	• Archivo Meteorológico
Colectores solares	71	 Colectores	• Número de colectores • Eficiencia (%) • Área unitaria (m²) • Modo de eficiencia
Termotanque	4C	 Type4c	• Volumen (m³) • Nodos (m) • Coeficiente de perdidas (W/m²K)
Generador	192	 Generador	• Calor removido (kW) • Calor específico (kJ/kgK)
Tanque de agua producto	39	 Type39	• Volumen (m³) • Densidad (kg/m³) • Coeficiente de perdidas (W/m²K)

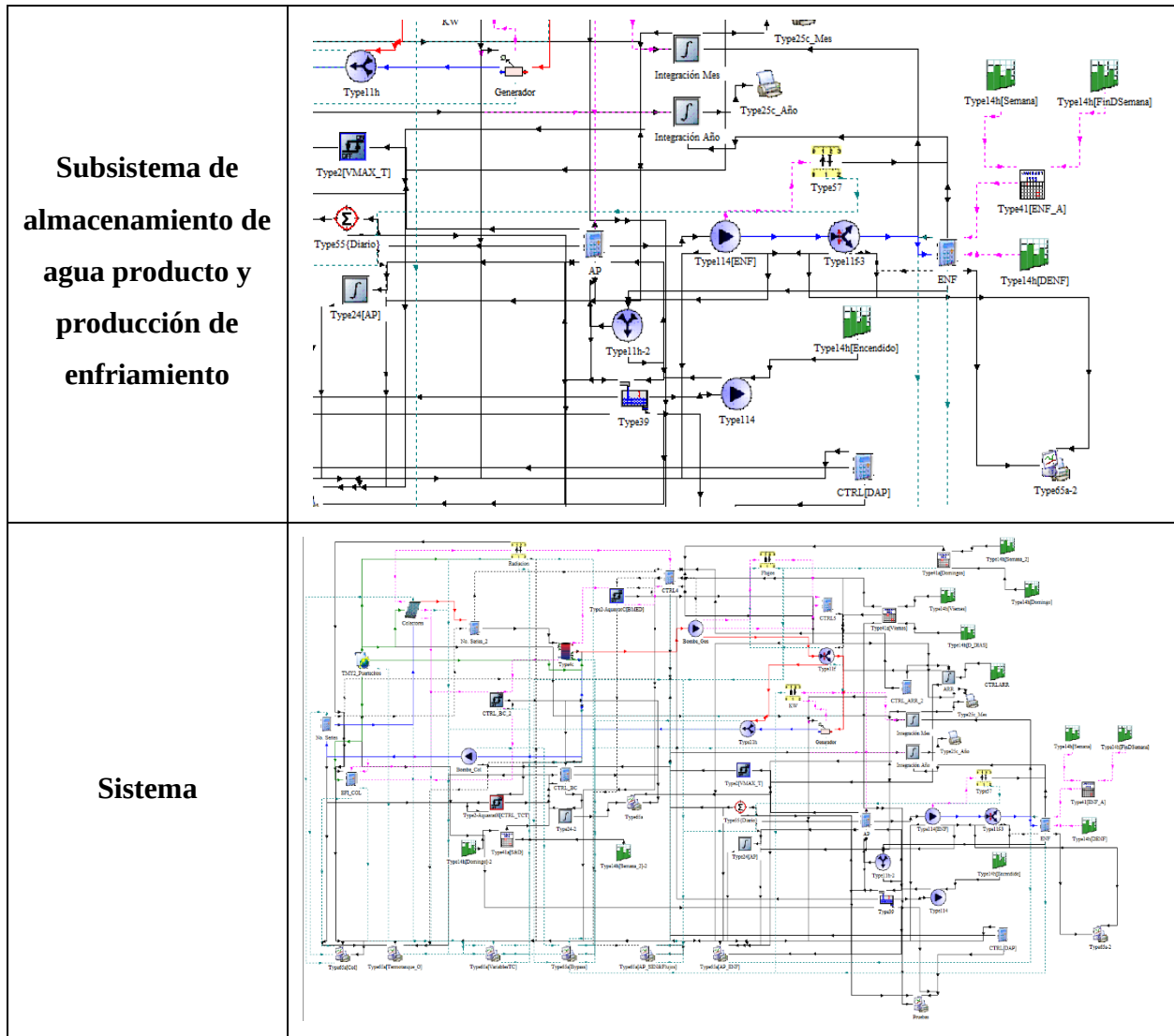
• Bomba_Col • Bomba_GEN • Bomba_ENF • Bomba_DAP	114	 Type114	• Flujos (kg/s) • Eficiencia (%) • Potencia (W)
• Mixer_GEN • Mixer_AP	11h	 Type11h	• Flujos (kg/s)
• DIV_GEN • DIV_AP	11f	 Type11f	• Flujos (kg/s)
• No. Series • No. Series_2 • EFI_COL • CTRL_BC • CTRL4 • CTRL5 • CTRL_ARR_2 • AP • ENF • CTRL_DAP	Equa	 Equa	• Controles varios
• Radiación • Flujos_MED • kW • Flujos_AP	57	 Type57	• Unidad convertidora de unidades
• Domingo y _2 • Semana 1,2,3 • Viernes • FinDSemana • Encendido • DENF	14h	 Type14h	• Control de horario

• D_Dias • CTRLARR			
• ENF_A • Viernes • Domingos • S&D	41b	 Type41b	• Calendario anual
• CTRL_BC_2	2b	 Type2b	• Temperatura (C) • Rango de temperatura
• VMAX_T	2	 Type2[VMAX_T]	• Volumen de agua (m³) • Rango de temperatura
• CTRL_TCT	2_AquastatH	 Type2-AquastatH-2	• Temperatura (C) • Rango de temperatura
• ARR • Integración_Mes • Integración_Año • AP • Type24-2	24	 Type24	• Integradores
• Diario	55	 Type55	• Integrador por día
• Col • Termotanque_G • VariablesTC • Bypass	65a	 Type65a	• Graficas de resultados de simulación

• AP_SEN&Flujos • AP_ENF • 65a y -2			
• Mes • Año	25c	 Type25c	• Generador de tablas de resultados

Tabla 9. Estructura modular del simulador TRNSYS: subsistemas y funciones principales.





Cálculo del volumen inicial del termotanque

Para obtener un valor inicial, se optó por utilizar la ecuación de calor sensible, la cual se adaptó para considerar el volumen en lugar de la masa directamente. Para ello, se empleó la relación entre volumen, densidad y masa, de modo que se pudiera expresar la masa en función del volumen. Al despejar el volumen de la ecuación de calor sensible, la expresión resultante queda de la siguiente manera:

$$V_{TT} = \frac{Q}{(\rho * C_p * \Delta T)}$$

Prosiguiendo con el cálculo, se cuenta ya con todas las variables necesarias, por lo que únicamente se debe seleccionar el valor de calor a utilizar. En este caso, se dispone de dos escenarios: uno correspondiente a la demanda de calor en temporada de invierno y otro para la temporada de verano. Considerando que el requerimiento de energía durante el verano es más elevado, se optó por utilizar el valor de calor correspondiente a esa temporada, con el fin de dimensionar el sistema bajo condiciones más exigentes. Una vez establecido este criterio, se procedió al cálculo del volumen utilizando la ecuación anteriormente descrita, quedando el desarrollo del cálculo de la siguiente manera:

Para ATBT:

$$Q_{Req,V} = 342 \text{ kWh} = 1,231,200 \text{ kJ}$$

$$V_{TT} = \frac{1,231,200 \text{ kJ}}{(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 25^{\circ}\text{C})} = 11.78 \text{ m}^3 \approx 12 \text{ m}^3$$

Para BTBT:

$$Q_{Req,V} = 200 \text{ kWh} = 720,000 \text{ kJ}$$

$$V_{TT} = \frac{720,000 \text{ kJ}}{(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 60^{\circ}\text{C})} = 2.87 \text{ m}^3 \approx 3 \text{ m}^3$$

A partir de este análisis, se determinó que los valores iniciales de volumen a utilizar en cada uno de los sistemas en estudio serán de 12 m³ y 3 m³, respectivamente. Cabe destacar que estos valores representan únicamente un punto de partida dentro del proceso de simulación, y no implican que se mantendrán constantes a lo largo de todas las simulaciones. Estos volúmenes podrán ser ajustados conforme se avance en el análisis, con el objetivo de evaluar si dichas modificaciones

generan una mejora en la producción tanto durante las semanas específicas de estudio como en el comportamiento anual del sistema.

Parámetros de inicialización

En la **Tabla 10** se presentan los valores iniciales considerados para el inicio de las simulaciones correspondientes a ambos sistemas productores de agua y enfriamiento. Estos parámetros incluyen los volúmenes de almacenamiento y áreas de captación solar seleccionados como punto de partida, basados en configuraciones reales o proporcionales al requerimiento térmico de cada propuesta (ATBT y BTBT).

Tabla 10. Configuración inicial de parámetros operativos: comparación ATBT vs. BTBT.

Parámetros	ATBT	BTBT
Cantidad de colectores en serie	5	3
Cantidad de colectores en paralelo	5	4
Volumen del termotanque	12 m ³	3 m ³

Pasos de simulación

1er paso:

Con base en los datos iniciales establecidos en los apartados anteriores, se da inicio a las simulaciones del sistema. El primer paso consiste en ejecutar la simulación utilizando los valores de partida. Una vez obtenidos los resultados, se analiza si la temperatura de salida de los colectores solares alcanza o supera los 80 °C, umbral necesario para el funcionamiento adecuado del subsistema térmico.

En caso de no alcanzarse dicha temperatura, se incrementa en uno el número de colectores conectados en serie, y se repite la simulación. Este proceso se itera hasta lograr que la temperatura de salida cumpla con el criterio establecido. Una vez que se obtiene una configuración válida, se procede al siguiente paso de la metodología.

2do paso:

En esta etapa, se verifica que la temperatura a la salida de los colectores solares no exceda los 95 °C, valor máximo establecido para el correcto funcionamiento del sistema. Si la temperatura simulada supera este límite, se reduce en uno el número de colectores en serie y se repite la simulación, regresando al paso anterior para validar nuevamente que la temperatura mínima de 80 °C se mantenga.

Este proceso se repite de forma iterativa hasta encontrar una configuración que cumpla simultáneamente con ambos criterios: una temperatura de salida igual o superior a 80 °C, pero sin exceder los 95 °C. Una vez alcanzado este equilibrio, se procede al siguiente paso dentro del proceso de simulación.

3er paso:

En esta etapa, el objetivo es asegurar que la temperatura dentro del termotanque se mantenga dentro del rango requerido por cada uno de los sistemas analizados. Dado que existen dos configuraciones distintas (ATBT y BTBT), cada una con diferentes exigencias térmicas, el criterio de temperatura se ajusta de manera específica a cada caso.

Si la simulación arroja una temperatura inferior al rango establecido para el sistema en evaluación, se incrementa en una unidad el número de series del arreglo de colectores, con el fin de aumentar la energía térmica suministrada al termotanque. Esta operación se repite de forma iterativa hasta lograr que la temperatura del termotanque se mantenga dentro del intervalo deseado. Una vez cumplido este criterio, se continúa con el siguiente paso de la metodología.

4to paso:

Una vez alcanzada esta etapa del análisis, se plantea la decisión de continuar o no con la exploración de diferentes volúmenes del termotanque. En caso de optar por evaluar otras capacidades de almacenamiento térmico, se procederá a incrementar o disminuir el volumen del tanque, según el criterio del investigador y con base en los resultados obtenidos hasta el momento.

Si, por el contrario, no se considera necesario estudiar nuevas configuraciones de volumen, se da por concluida esta fase y se continúa con la metodología correspondiente al proceso de selección de la mejor opción para ambas configuraciones analizadas (ATBT y BTBT).

3.4 Establecimiento de criterios para selección óptima

Una vez obtenidos resultados satisfactorios en las simulaciones, o bien al identificar múltiples configuraciones que cumplen con los criterios establecidos, se procede a seleccionar aquellas propuestas que satisfacen los siguientes requerimientos:

- Cumplimiento total con la producción de agua durante la semana representativa de invierno y verano.
- Cumplimiento total con la producción de enfriamiento durante la semana representativa de verano.
- Uso de la menor cantidad posible de colectores solares.
- Uso del menor volumen posible en el termotanque.
- Menor cantidad de días necesarios para alcanzar, por primera vez, la temperatura máxima en el termotanque, tanto en condiciones de invierno como de verano.

Capítulo 4

4 Evaluación y Comparación de Resultados Bajo Escenarios de Alta y Baja TBT

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las propuestas seleccionadas con base en los criterios establecidos previamente, ya que estas configuraciones cumplieron de manera integral con todos los requisitos técnicos definidos. En este apartado, se exponen los resultados obtenidos para cada uno de los arreglos de captación seleccionados: por un lado, el correspondiente al sistema MED al alto vacío con temperatura convencional (ATBT), y por otro, el sistema MED al alto vacío con baja temperatura (BTBT). Finalmente, se analizan las diferencias clave entre ambas configuraciones y se discute cuál de ellas representa una mayor ventaja operativa en función del desempeño observado.

4.1 Configuración de alto TBT

Durante la simulación se evaluó una amplia gama de posibles sistemas que pudieran satisfacer la demanda térmica correspondiente a las dos semanas analizadas en este estudio. El objetivo fue observar el desempeño de los distintos arreglos del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica. La elección de la configuración más adecuada se realizó con base en los criterios específicos mencionados previamente. En la **Tabla 11** se presentan las configuraciones que obtuvieron los mejores desempeños durante las simulaciones para este caso.

Al revisar la Tabla 11, se observa que todos los arreglos presentan características muy similares, siendo la única diferencia significativa el volumen del termotanque. Esto indica que las necesidades térmicas de la máquina pueden ser cubiertas con un conjunto de entre 21 y 22 colectores solares. Para seleccionar la configuración óptima, se priorizó aquella que utilizara el menor tamaño posible. Aunque existe la opción de emplear un tanque de 9 m³, se identificaron ciertos momentos durante la simulación en los que este volumen resultó insuficiente para satisfacer la demanda térmica del sistema. Por tal motivo, se optó por el siguiente tamaño disponible, un termotanque de 10 m³. Así, la configuración seleccionada como la más eficiente corresponde a un

arreglo de 3 colectores en serie con 7 ramas en paralelo, sumando un total de 21 colectores, junto con un termotanque de 10 m³. Esta disposición garantiza el cumplimiento del 100 % de los requerimientos de ambos servicios durante las dos semanas consideradas en el análisis.

Tabla 11. Opciones de diseño del sistema de captación y almacenamiento térmico para máquinas con alta TBT.

Cantidad de colectores en serie	Cantidad de series de colectores	Volumen de tanque	Producción de agua	Producción de enfriamiento
3	7	9	100 %	100 %
2	11	9	100 %	100 %
3	7	10	100 %	100 %
2	11	10	100 %	100 %
3	7	11	100 %	100 %
2	11	11	100 %	100 %
3	7	13	100 %	100 %
2	11	13	100 %	100 %

Parámetros de arranque y operación para sistema captación y almacenamiento de energía solar térmica aplicado en MED de ATBT

En la **Tabla 12** se presentan los parámetros de operación del sistema productor de agua y enfriamiento, los cuales incluyen el rango de temperatura de operación, así como las características del arreglo de captación y almacenamiento térmico. Esta información permite analizar el desempeño del sistema bajo distintas condiciones y evaluar su capacidad para satisfacer la demanda térmica y de enfriamiento a lo largo del periodo de estudio.

Tabla 12. Parámetros de operación y diseño del sistema productor de agua y enfriamiento.

Parámetro	Cantidad
OPERACIÓN	
Temperatura mínima de operación	78 °C
Temperatura máxima de operación	95 °C
Demanda de calor	40 kW
Flujo de agua hacia MED	1.2 kg/s
Producción de agua	936 kg/s
Producción de enfriamiento máxima	10 tons
Sistema de captación y almacenamiento	Cantidad
Colectores	21
Área de captación	92.61 m ²
Volumen de tanque	10 m ³
Flujo de bomba de colectores	1.85 kg/s
Temperatura de inicio del termotanque	25 °C
Temperatura objetivo en el termotanque	95 °C

4.1.1 Temporada de Invierno

Semana de arranque de ATBT en invierno

De acuerdo con la **Tabla 12**, el termotanque inicia con una temperatura de 25°C y debe alcanzar un objetivo de 95°C, lo que permite estimar el tiempo necesario para que el sistema de captación solar eleve la temperatura bajo condiciones óptimas de radiación. Con los parámetros establecidos en la tecnología MED de ATBT, el sistema tarda cuatro días y algunas horas del quinto día en alcanzar la temperatura deseada, como se observa en la **Figura 31**. Durante este periodo, la temperatura del termotanque aumenta progresivamente, pero el proceso de calentamiento no es lineal debido a las pérdidas térmicas nocturnas y la disminución gradual de la eficiencia de los colectores. En el primer día, la temperatura se eleva de 25°C a casi 50°C, pero al ser una temperatura mayor que la ambiental, el termotanque comienza a perder calor durante la noche, reduciendo la temperatura a 47.5°C al iniciar el segundo día. A lo largo de este día, el sistema de captación solar transfiere calor nuevamente, elevando la temperatura hasta 67°C. Sin embargo, al llegar la noche, las pérdidas térmicas llevan la temperatura a 65°C antes de comenzar el tercer día, donde la temperatura se incrementa hasta 82°C, mostrando un aumento de 17°C en comparación con el día anterior. Estas pérdidas nocturnas se hacen más evidentes conforme la temperatura del termotanque aumenta, ya que la diferencia con el ambiente se incrementa, provocando pérdidas de aproximadamente 2°C a 4°C por noche. En el cuarto día, la temperatura inicial del termotanque es de 79°C, y al final del día se alcanza un máximo de 94°C. Durante la noche, las pérdidas reducen la temperatura hasta 90°C, lo que permite que, al inicio del quinto día, el sistema solo requiera unas pocas horas para llevar el termotanque hasta los 95°C. Sin embargo, este proceso no solo depende de la acumulación de calor, sino también del desempeño de los colectores solares, cuya eficiencia disminuye a medida que aumenta la temperatura media del sistema. Durante los primeros días, los colectores transfieren calor de manera eficiente, pero conforme la temperatura del termotanque se eleva, el diferencial térmico entre los colectores y el agua disminuye, reduciendo la cantidad de calor entregado. Como resultado, el incremento diario de temperatura se vuelve progresivamente menor, requiriendo casi cinco días para alcanzar el objetivo. Esto demuestra que, aunque el sistema de captación logra mantener un suministro constante de energía térmica, las pérdidas nocturnas y la reducción de la eficiencia de los colectores limitan la rapidez con la que el termotanque alcanza la temperatura deseada.

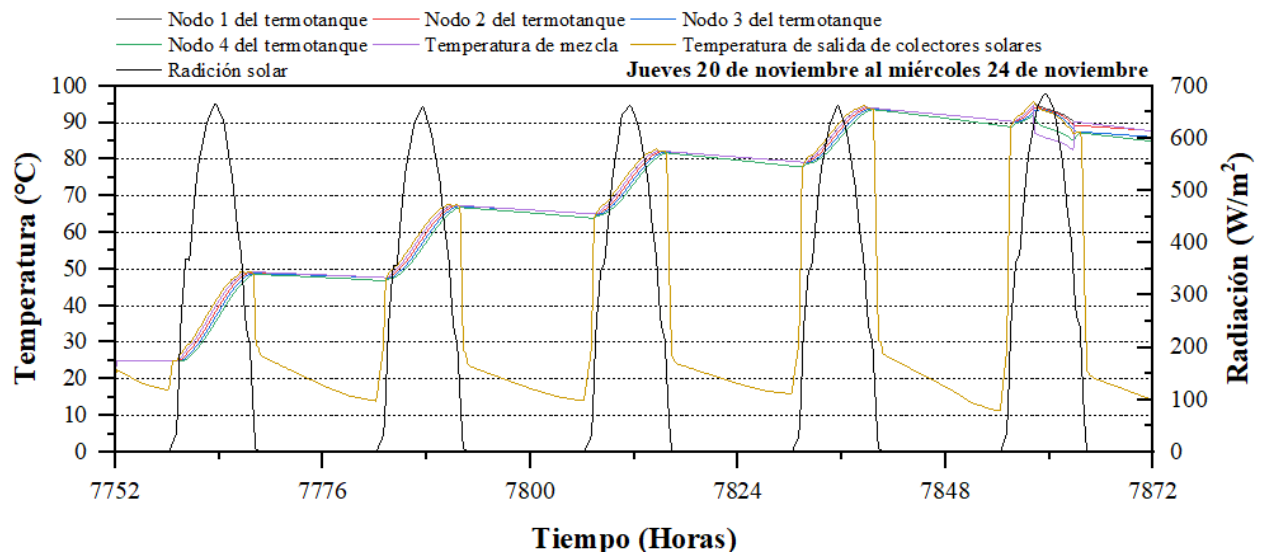


Figura 31. Evolución diaria de la temperatura en el termotanque: proceso de calentamiento solar, en sistema de ATBT (invierno).

Comportamiento de termotanque en semana de producción en semana de invierno para ATBT

La **Figura 32** muestra el comportamiento térmico del sistema durante la semana de análisis de producción de agua para la temporada de invierno. El día previo, la temperatura del termotanque alcanzó los 95°C, valor considerado como la temperatura máxima requerida para iniciar la producción de agua y el proceso de enfriamiento.

Al inicio del Día 1 (lunes), se observa una caída en la temperatura del termotanque durante las primeras horas de la mañana, acompañada de una disminución en la temperatura de salida de los colectores solares y en la temperatura de la mezcla. Esta reducción térmica indica el inicio de la producción de agua, donde se extrae fluido del nodo más caliente del termotanque (nodo 1). Tras aprovechar su energía térmica, la temperatura de la mezcla disminuye y se redirige al nodo del termotanque cuya temperatura es más cercana a la de la mezcla, favoreciendo la estratificación térmica y optimizando la eficiencia del sistema. Paralelamente, la temperatura de salida de los colectores disminuye debido a la menor temperatura registrada en el nodo 4, que es el punto en donde la bomba de los colectores toma el fluido caloportador para ser recirculado a través del campo de colectores solares. Este proceso permite mantener o incrementar la temperatura del termotanque dentro del rango operativo establecido.

Una vez que se ha producido el volumen de agua necesario, el sistema de captación solar restablece la temperatura del termotanque hasta alcanzar nuevamente su límite de operación. Esto se debe a que, en la temporada de invierno, el sistema requiere únicamente unas pocas horas de funcionamiento diario para satisfacer la demanda prevista.

Dentro de la semana de análisis, se presenta un día semi-nublado (jueves), lo que genera una reducción en la radiación solar incidente y afecta el incremento de temperatura en el termotanque. Debido a esto, al siguiente día (viernes) el sistema inicia la producción de agua con un margen térmico más reducido, acercándose al límite inferior de temperatura requerido para la producción de agua. A pesar de ello, el sistema logra completar la producción diaria, aunque con menor estabilidad térmica en comparación con los días previos.

Al finalizar la producción del día, la temperatura del termotanque vuelve a elevarse hasta el punto máximo permitido por la radiación disponible. Posteriormente, los dos días siguientes se utilizan para restablecer la temperatura del termotanque hasta los 95°C, permitiendo que el sistema inicie la siguiente semana con condiciones térmicas óptimas para su operación. El sistema MED, encargado de la producción de agua y enfriamiento cuando es necesario, requiere una demanda térmica de 40 kW, los cuales son extraídos del termotanque. Como resultado, una vez que el sistema MED se activa, la temperatura del termotanque comienza a disminuir.

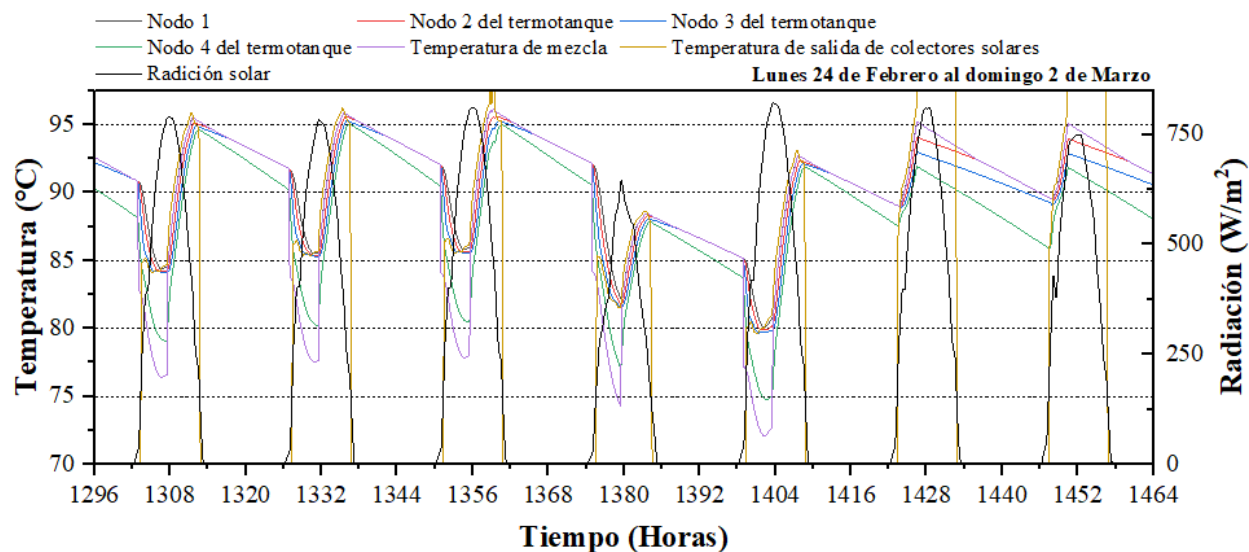


Figura 32. Comportamiento térmico diario del sistema durante producción de agua en invierno, en sistema de ATBT.

En la **Figura 33** se observa la relación entre la demanda de calor del sistema MED y el calor suministrado por el sistema de captación solar, el cual supera la demanda térmica requerida. Dado que el sistema MED no opera continuamente durante todo el día, el calor excedente entregado por los colectores solares se utiliza para incrementar la temperatura del termotanque hasta alcanzar su límite máximo permitido (95°C) o hasta el punto en el que ya no pueda seguir aumentando. El tercer día de la semana (miércoles) se observa una oscilación en el calor suministrado por los colectores solares. Esto ocurre porque el termotanque alcanza su temperatura máxima, lo que provoca que el sistema solo se encargue de mantenerla dentro del rango establecido.

El jueves, en cambio, se observa una reducción en la radiación solar incidente sobre el arreglo de colectores, lo que provoca una disminución en el calor suministrado al termotanque. De hecho, durante todo el período de producción, la cantidad de calor aportada es inferior a la de los días anteriores, lo que impacta en la eficiencia térmica del sistema. En términos generales, durante el resto de la semana, el termotanque conserva una temperatura adecuada para que el sistema MED opere sin inconvenientes. Además, se observa que el suministro de calor por parte de los colectores solares solo supera la demanda térmica del sistema MED durante un par de horas al día. Esto indica que, si el sistema MED necesitara más tiempo para producir el volumen de agua requerido, probablemente sería necesario modificar el arreglo de colectores para garantizar un suministro de calor suficiente.

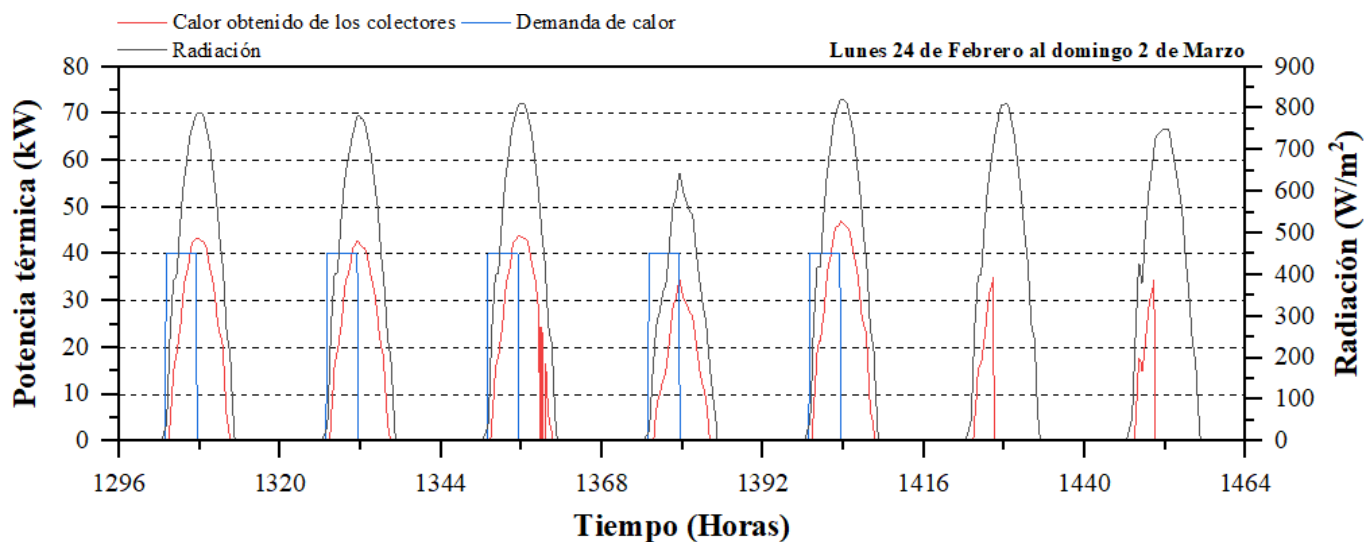


Figura 33. Balance energético diario: Demanda del sistema MED vs. calor suministrado por colectores solares en invierno, en sistema de ATBT.

Comportamiento del tanque de agua producto en semana de producción en semana de invierno para ATBT

Además, en la **Figura 34** se observa que, durante la semana de invierno, la producción de agua es suficiente para suplir la demanda establecida a lo largo de los cinco días de operación. La línea de color negro muestra el incremento progresivo del volumen de agua producto almacenada en el tanque.

Al final del primer día, el volumen almacenado es de un poco menos de 2 m^3 . El mismo patrón se repite en los siguientes días: cada jornada inicia con un volumen acumulado del día anterior, permitiendo que, al finalizar el viernes, se tenga almacenada la cantidad suficiente para cubrir la demanda del fin de semana.

En particular, el sábado inicia con 6 m^3 en el tanque, los cuales son necesarios para solventar la demanda de los días sábado y domingo. Como se observa en la figura, al finalizar el sábado, el volumen almacenado se reduce a poco menos de 4 m^3 , lo que resulta suficiente para abastecer la demanda del domingo sin contratiempos.

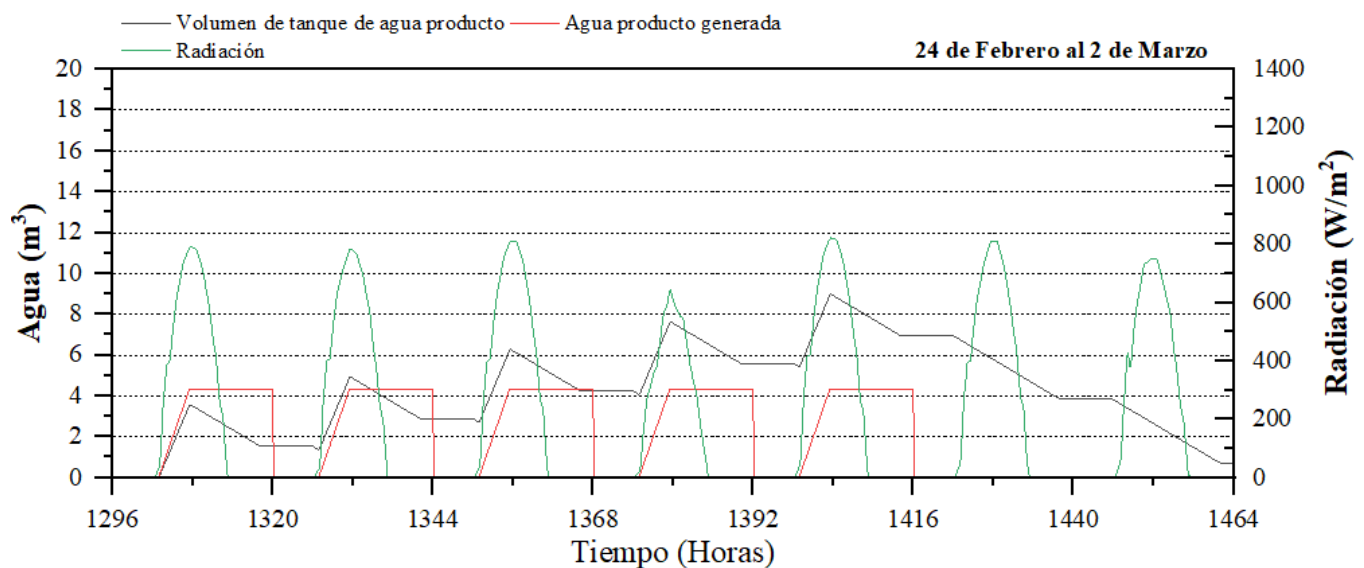


Figura 34. Producción y almacenamiento de agua durante semana de invierno: volumen acumulado vs. demanda diaria, en sistema de ATBT.

4.1.2 Temporada de Verano

Semana de arranque de ATBT en verano

De acuerdo con la **Tabla 12**, el sistema inicia con una temperatura de 25°C, con el objetivo de elevar la temperatura del termotanque hasta 95°C mediante el arreglo de colectores solares configurado para ATBT. Como se muestra en la **Figura 35**, este proceso requiere aproximadamente dos días bajo condiciones de alta radiación solar, alcanzando picos cercanos a 1000 W/m². El comportamiento térmico del termotanque estratificado permite analizar la evolución de la temperatura en diferentes nodos. Al finalizar el primer día, la temperatura dentro del termotanque llega a 70°C, lo que representa un aumento significativo de 45°C en comparación con la temperatura inicial. Sin embargo, durante la noche, la ausencia de radiación solar y las pérdidas térmicas hacia el ambiente provocan una disminución de 4°C, iniciando el segundo día con aproximadamente 66°C. Aunque esta reducción térmica nocturna es considerable, el sistema compensa rápidamente el descenso debido a la alta captación de energía solar, logrando que, transcurrido un poco más de medio día, se alcancen los 95°C en el termotanque. Este comportamiento indica que, a pesar de las pérdidas nocturnas, el rápido incremento de temperatura durante el día es suficiente para cumplir con los requerimientos del sistema en un tiempo relativamente corto.

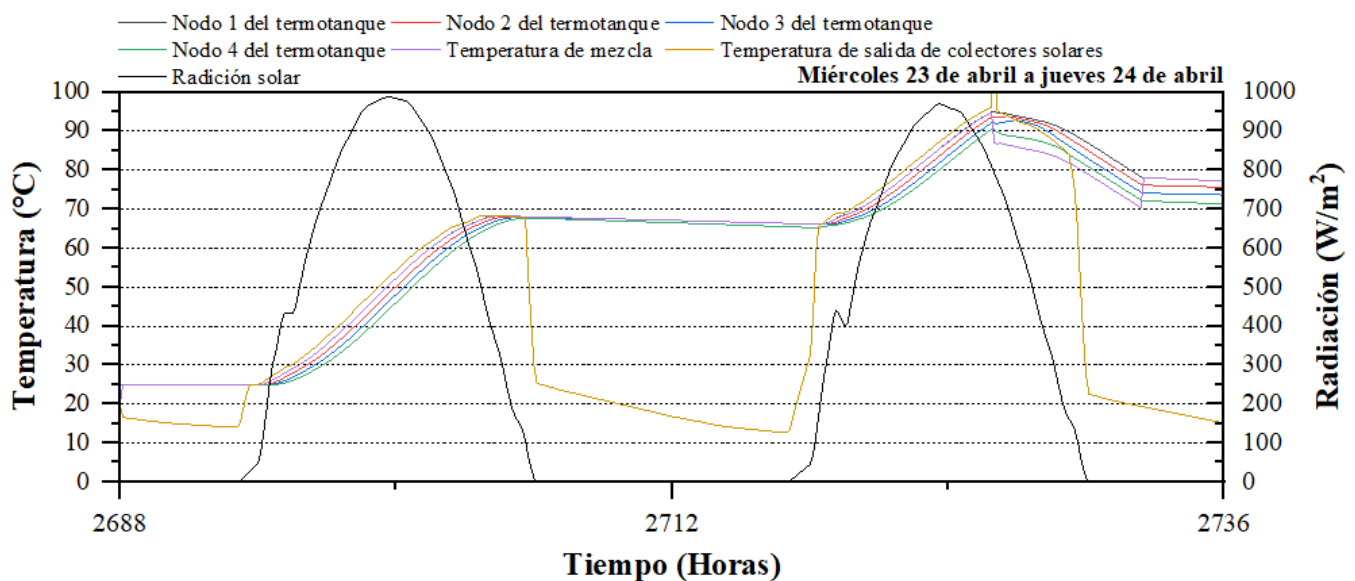


Figura 35. Evolución diaria de la temperatura en el termotanque: proceso de calentamiento solar, en sistema de ATBT (verano).

Una vez alcanzada la temperatura objetivo, el sistema entra en un estado de estancamiento momentáneo, donde la temperatura de salida de los colectores puede superar los 100°C sin afectar significativamente la temperatura interna del termotanque. Posteriormente, el sistema entra en fase de producción, la cual ocurre durante la tarde-noche, cuando la radiación solar es prácticamente nula. Durante esta fase, el sistema aprovecha el calor almacenado en el termotanque dentro del rango de 95°C a 78°C, permitiendo la producción de aproximadamente 6 m³ de agua producto sin necesidad de un nuevo aporte energético de los colectores solares. Este rango térmico es suficiente para garantizar la producción requerida antes de que la temperatura del termotanque descienda por debajo del umbral necesario para continuar con el proceso. La estrategia de producción en este periodo demuestra la importancia del almacenamiento térmico, ya que el sistema se mantiene operativo sin depender directamente de la radiación solar en ese momento, optimizando así la disponibilidad de energía térmica y asegurando un suministro constante de agua y enfriamiento.

Comportamiento de termotanque en semana de producción en semana de verano para ATBT

Para la semana de análisis presentada en la **Figura 36**, es importante destacar que el día anterior se alcanzó una temperatura de 95°C en el termotanque, valor correspondiente a la temperatura máxima requerida para la operación del sistema. Al iniciar el lunes, comienza la producción de agua en las primeras horas de la mañana, junto con la producción de enfriamiento, dado que el análisis corresponde a la temporada de verano. Como se ha mencionado, la demanda de enfriamiento se extiende de 7:00 a 15:00 horas. Durante este período, la radiación solar alcanza valores máximos de entre 900 y 1000 W/m², lo que permite que el sistema MED convencional opere sin dificultades relacionadas con la disponibilidad de energía térmica.

El comportamiento térmico del sistema muestra que el primer día inicia con una temperatura aproximada de 90°C en el termotanque, lo que representa una condición óptima para la producción de agua. En las primeras horas del día, la temperatura del termotanque disminuye debido a la extracción de calor para el proceso de producción; sin embargo, conforme avanza el día, la energía captada por los colectores solares supera la demanda térmica del proceso MED, permitiendo un incremento progresivo en la temperatura del termotanque. Al finalizar la jornada, la temperatura alcanza aproximadamente 92°C, lo que indica un balance energético positivo.

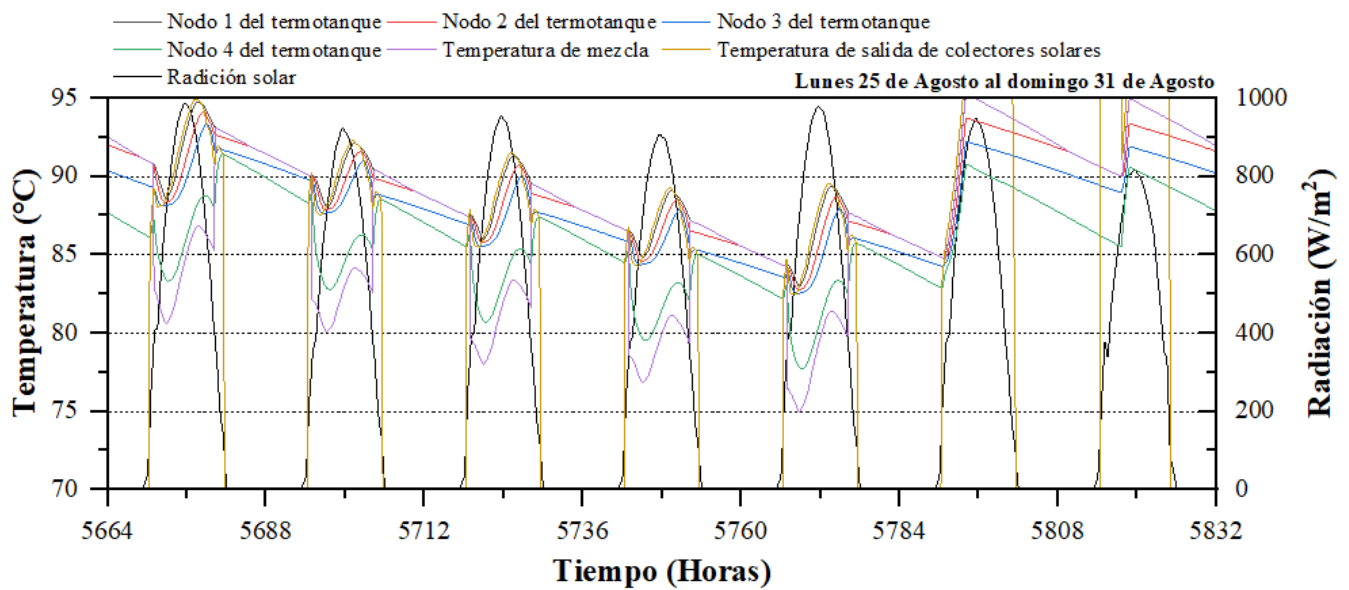


Figura 36. Comportamiento térmico diario del sistema durante producción de agua y enfriamiento en verano, en sistema de ATBT.

Durante la noche, la temperatura del termotanque disminuye debido a pérdidas térmicas hacia el ambiente, generando una reducción de aproximadamente 2°C. No obstante, al día siguiente el sistema inicia nuevamente la producción con una temperatura cercana a 90°C, asegurando condiciones adecuadas para la operación. Este patrón se repite a lo largo de la semana: cada día la temperatura del termotanque desciende en las primeras horas debido a la producción de agua y enfriamiento, pero posteriormente se recupera gracias a la energía térmica captada por los colectores solares.

Al llegar al viernes, se observa un comportamiento similar a los días previos. Sin embargo, debido al control diferenciado para este día, se prioriza la producción de agua no solo para satisfacer la demanda diaria, sino también para almacenar el volumen necesario para el fin de semana. Por ello, al final del viernes, el tanque de agua producto debe contar con al menos 12 m³ de agua almacenada.

En esta semana de análisis, no se observa una disminución abrupta en la temperatura del termotanque, lo que sugiere que la cantidad de agua almacenada es suficiente para cubrir la demanda del sábado y domingo. Esto evita la necesidad de continuar con la producción de agua

durante el fin de semana, permitiendo que el sistema se enfoque en la recuperación térmica del termotanque para garantizar un adecuado inicio de operaciones en la siguiente semana.

El incremento de la temperatura alrededor del mediodía durante los días de producción en la temporada de verano podría deberse a que el suministro de calor de los colectores solares es superior a la demanda térmica del sistema MED. En la **Figura 37** se observa que este comportamiento es el esperado a lo largo de los cinco días de producción, ya que el sistema de captación proporciona más energía térmica de la requerida.

En promedio, los picos de entrega de calor oscilan entre 50 kW y 60 kW, mientras que la demanda establecida es de 40 kW. Esta diferencia provoca un aumento progresivo de la temperatura del termotanque durante el día. Sin embargo, en esta semana de análisis, la temperatura máxima establecida en el termotanque no fue superada, ni la temperatura de los colectores excedió los 100°C. De haber ocurrido esto, se indicaría que el sistema está sobredimensionado. A pesar de que el sistema suministra más calor del requerido, opera sin problemas de sobrecalentamiento en los colectores. Además, en los últimos dos días de producción, el suministro de calor desde los colectores hacia el termotanque se da en períodos más cortos en comparación con los días anteriores. Esto indica que el calor aportado fue suficiente para llevar la temperatura del termotanque hasta 95°C, garantizando un funcionamiento estable del sistema.

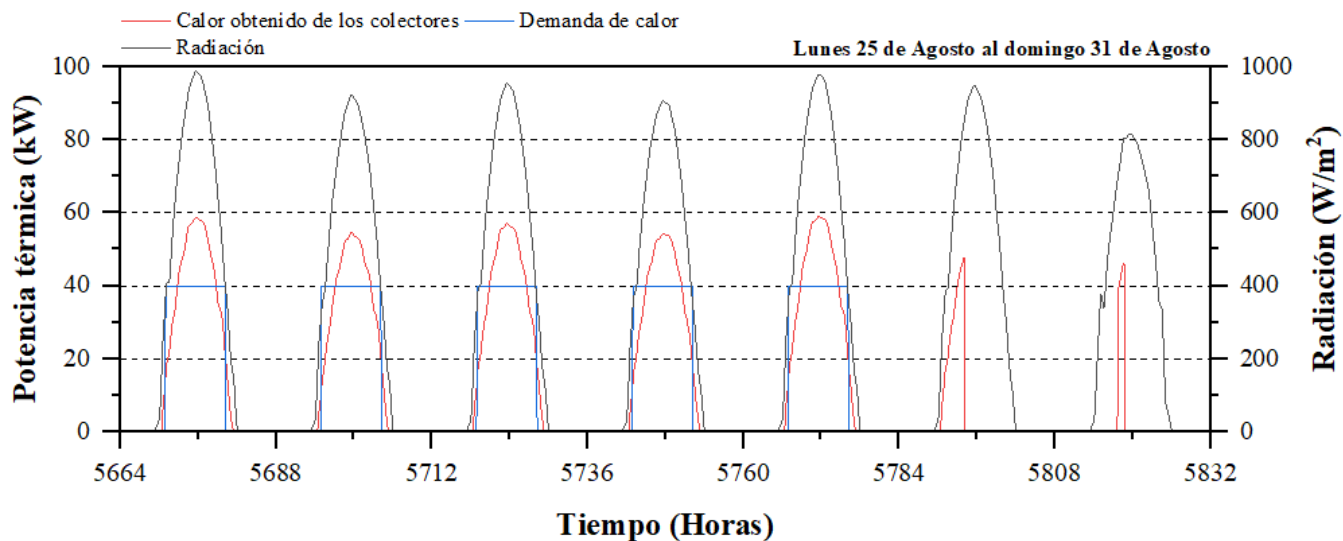


Figura 37. Balance energético diario: Demanda del sistema MED vs. calor suministrado por colectores solares en verano, en sistema de ATBT.

Comportamiento del tanque de agua producto en semana de producción en semana de verano para ATBT

En la **Figura 38** se observa cómo el comportamiento de la producción de agua y enfriamiento coincide con la disminución de la temperatura mostrada en la figura anterior. A partir de las 7:00 a. m., inicia la producción de agua junto con la de enfriamiento, ya que este último solo puede operar cuando se está generando agua. Por lo tanto, es necesario mantener la producción de agua al menos hasta las 3:00 p.m. cómo se observa, el tiempo disponible es suficiente para satisfacer las necesidades de enfriamiento y, además, permite extender la producción para alcanzar el volumen de agua requerido. Durante los cinco días de producción en esta temporada, el comportamiento de la producción de agua y enfriamiento es prácticamente idéntico en los primeros cuatro días. Sin embargo, el día viernes se implementa un control que prioriza la producción de agua, con el objetivo de alcanzar al menos 12 m³ al finalizar el día, volumen mínimo necesario para cubrir la demanda de los siguientes dos días.

En la **Figura 36** anterior se mencionó la posibilidad de que la razón por la cual no se observaba una reducción de temperatura significativa el día viernes se debe a que el sistema ya contaba con la cantidad de agua suficiente para cubrir la demanda del fin de semana. Esto se confirma en la FIGURA XX, donde se muestra que, al finalizar la producción del día, en el tanque de agua producto se tienen alrededor de 14 m³, cantidad suficiente para solventar la demanda de los días sábado y domingo, evitando así una extracción adicional de energía térmica del termotanque.

Como se mencionó anteriormente, el sistema MED no produce agua durante los fines de semana, permitiendo así maximizar el incremento de temperatura en el termotanque. Esto resulta fundamental en caso de que las condiciones climáticas no sean favorables, garantizando que el sistema pueda operar de manera continua al inicio de la siguiente semana.

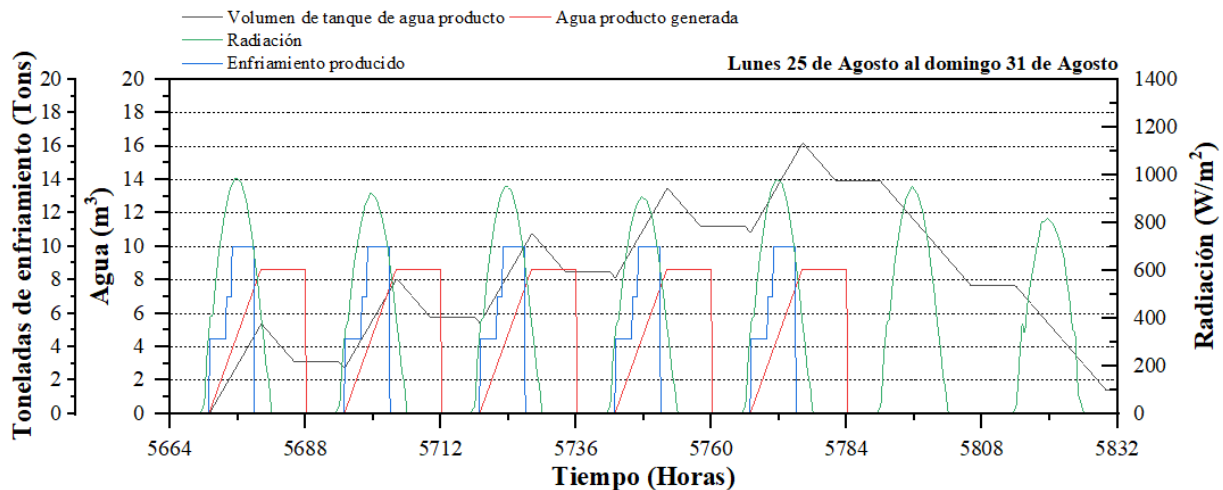


Figura 38. Producción y almacenamiento de agua durante semana de verano: volumen acumulado vs. demanda diaria, en sistema de ATBT.

4.2 Configuración de bajo TBT

El estudio se llevó a cabo de manera similar a la máquina convencional, dicho esto se encontraron varios arreglos de sistemas de captación y almacenamiento de energía solar térmica los cuales activen a la máquina de bajo TBT, los cuales cumplen con la demanda de calor de ambas semanas de estudio, por ende, tanto la producción de agua como de enfriamiento se cumplen durante estas semanas, en la **Tabla 13**. Opciones de diseño del sistema de captación y almacenamiento térmico para máquinas con bajo TBT., podemos observar cuales fueron estos arreglos que cumplen en un 100% para la demanda de calor requerida.

De igual manera, para la elección de la configuración del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, se aplican los mismos criterios utilizados para la máquina de alta temperatura (ATBT). En este contexto, se observa que, para satisfacer la demanda térmica del sistema, se requieren entre 8 y 9 colectores, evidenciando una reducción notable en comparación con su contraparte. Por lo tanto, el único parámetro que varía en las distintas simulaciones es el volumen del termotanque, lo cual indica que, a mayor capacidad, mayor será la cantidad de energía acumulada, lo cual resulta ventajoso ante posibles días nublados o fallas en el sistema de captación solar.

Tabla 13. Opciones de diseño del sistema de captación y almacenamiento térmico para máquinas con bajo TBT.

Cantidad de colectores en serie	Cantidad de series de colectores	Volumen de tanque	Producción de agua	Producción de enfriamiento
3	3	2	100%	100%
3	3	7	100%	100%
2	5	7	100 %	100%
2	5	8	100%	100%
3	3	8	100%	100%
3	3	9	100%	100%
3	3	10	100%	100%
2	5	10	100%	100%

En consecuencia, la configuración que mejor se ajusta a los criterios previamente establecidos corresponde a un sistema compuesto por 3 colectores en serie y 3 series en paralelo, sumando un total de 9 colectores, junto con un termotanque de 2 m³. Este arreglo permite una optimización significativa del sistema de captación y almacenamiento, evidenciando que la máquina de bajo TBT presenta una mejora considerable en comparación con la de alta TBT.

Parámetros de arranque y operación para sistema captación y almacenamiento de energía solar térmica aplicado en MED de BTBT

La **Tabla 14** muestra los diferentes parámetros considerados en la simulación del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, aplicado en el sistema MED de BTBT. Los periodos de simulación son los mismos que en el caso de ATBT; sin embargo, existen diferencias clave en la cantidad de colectores solares, el volumen del termotanque, el flujo de la bomba en los colectores, las temperaturas de operación de la MED y la demanda de calor en la MED.

Incluso antes de realizar una comparación detallada entre ambas propuestas, se observa una reducción en el número de colectores solares, el volumen del termotanque y el flujo de la bomba de calor, lo que sugiere que la propuesta con BTBT podría presentar ventajas tanto técnicas como económicas.

4.2.1 Temporada de Invierno

Semana de arranque de BTBT en invierno

En la **Figura 39** se presenta el comportamiento térmico del termotanque durante los primeros dos días de operación del sistema de captación y almacenamiento de energía solar. Durante el primer día, la temperatura inicial del termotanque se sitúa en 25°C. A partir de las siete de la mañana, el incremento térmico comienza a ser evidente, alcanzando aproximadamente 60°C al mediodía. Hacia el final de las horas de radiación, la temperatura del termotanque se eleva hasta 72°C, con un pico de radiación solar de aproximadamente 650 W/m². Sin embargo, durante la noche se registra una pérdida térmica de alrededor de 4°C, debido al diferencial de temperatura entre el termotanque y el ambiente, lo cual es particularmente notable en invierno, cuando la temperatura ambiental es más baja. A pesar de que el termotanque cuenta con un aislamiento de 1.4 W/m²K, su reducido volumen (2 m³) favorece una mayor disipación de calor, intensificando las pérdidas térmicas hacia el entorno. Al inicio del segundo día, la temperatura del termotanque se encuentra en 67°C. Con el aumento progresivo de la radiación solar, el sistema comienza a ganar temperatura y, aproximadamente a la 1 de la tarde, alcanza los 95°C requeridos para la operación. Durante este día, la radiación pico se mantiene en valores similares al día anterior, con aproximadamente 650

W/m². El análisis de este comportamiento térmico sugiere que el sistema requiere únicamente dos días para alcanzar la temperatura de operación, siempre que se mantengan ciertas condiciones, tales como la disponibilidad de radiación solar, el volumen del termotanque, las pérdidas térmicas al ambiente y la configuración del campo de colectores. A su vez, se observa una disminución en la temperatura del termotanque durante el segundo día. Esto se debe a que, una vez alcanzada la temperatura requerida, el sistema inicia su fase de operación, en la cual extrae calor del termotanque para utilizarlo en el proceso de producción de agua. En este caso, el objetivo principal del día fue maximizar la producción de agua, dado que los días siguientes correspondían al fin de semana. El sistema, mediante su control, interpreta la necesidad de generar la mayor cantidad de agua posible para cubrir la demanda de sábado y domingo. Al finalizar el día, la producción total de agua alcanzó los 5 m³, dejando un almacenamiento de 4 m³ en el tanque.

Tabla 14. Parámetros de simulación para sistema MED-BTBT: configuración optimizada de captación y almacenamiento solar.

Parámetro	Cantidad
Operación	
Temperatura mínima de operación	35 °C
Temperatura máxima de operación	95 °C
Demanda de calor	25 kW
Flujo de agua hacia MED	1.2 kg/s
Producción de agua	982.8 kg/s
Producción de enfriamiento máxima	10 tons
Sistema de captación y almacenamiento	Cantidad
Colectores	9
Área de captación	39.69 m ²
Volumen de tanque	2 m ³
Flujo de bomba de colectores	0.7938 kg/s
Temperatura de inicio del termotanque	25 °C
Temperatura objetivo en el termotanque	95 °C

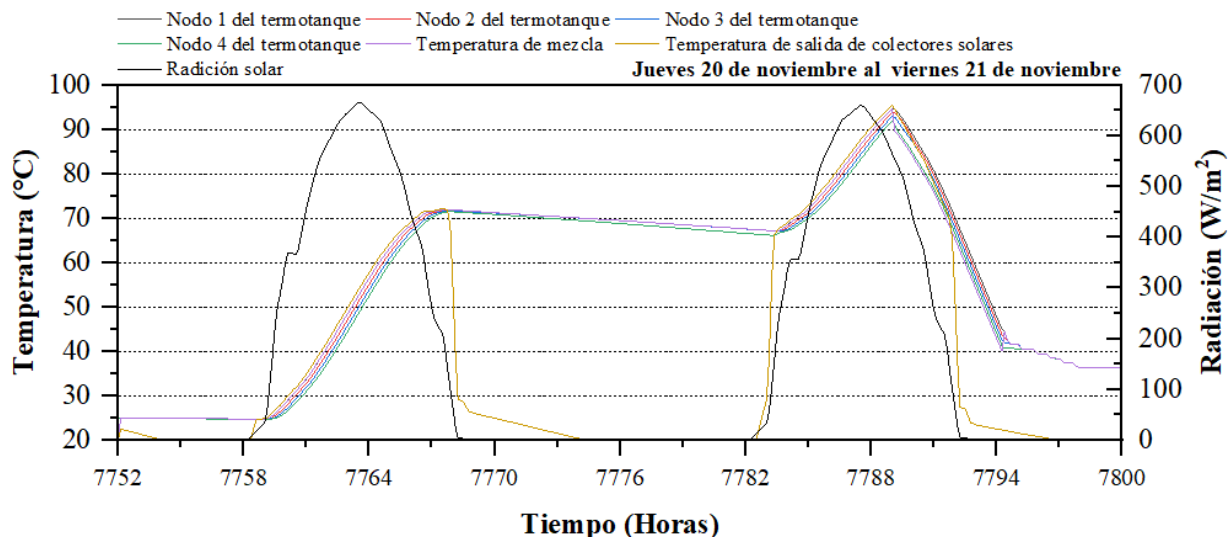


Figura 39. Evolución diaria de la temperatura en el termotanque: proceso de calentamiento solar, en sistema de BTBT (invierno).

Comportamiento de termotanque en semana de producción en semana de invierno para BTBT

En lo que respecta a la semana de producción de agua en el periodo de invierno (**Figura 40**), el sistema alcanzó una temperatura de 95°C en el termotanque un día antes del inicio de la producción, asegurando así la mejor condición inicial posible para el primer día.

El primer día de producción comenzó con una temperatura de aproximadamente 87°C, y debido a la extracción de calor para la producción de agua, la temperatura descendió hasta 60°C. No obstante, dado que en invierno se requiere menos tiempo para generar la cantidad de agua necesaria, el sistema completó la producción alrededor del mediodía. A partir de ese momento, el sistema de captación solar aprovechó el resto del día para elevar nuevamente la temperatura del termotanque, alcanzando los 88.5°C, asegurando así la producción del día siguiente. En el segundo día, la temperatura inicial fue de 82°C, indicando una pérdida nocturna de 6.5°C, lo cual es atribuible a las bajas temperaturas ambientales y al reducido volumen de almacenamiento (2 m³). Durante la producción del día, la temperatura descendió hasta poco menos de 60°C, tras lo cual el sistema de captación volvió a suministrar calor, elevando la temperatura del termotanque a 85°C. No obstante, debido a las pérdidas nocturnas, el tercer día inició con una temperatura de 79°C.

Ese día, tras la producción de agua, la temperatura del termotanque disminuyó hasta 55°C, momento en el cual los colectores solares comenzaron nuevamente a suministrar calor, logrando elevar la temperatura hasta 84°C. Durante la noche, las pérdidas térmicas redujeron la temperatura a 78°C, con lo que se inició la producción del día siguiente. Tras completar la producción de agua, la temperatura del termotanque bajó hasta 47°C, pero posteriormente se recuperó hasta 67°C gracias a la captación solar. A lo largo de la semana, se observó que la disminución de temperatura durante la fase de producción fue de aproximadamente 24°C por día, aunque en el cuarto día la pérdida fue mayor (30°C), debido a una menor radiación solar. En ese día, el pico máximo de radiación fue de 650 W/m², lo que afectó la cantidad de calor suministrado al termotanque. Como resultado, tras la producción, la temperatura solo logró aumentar hasta 67°C.

El último día de producción comenzó con una temperatura inicial de 63°C, suficiente para completar la producción de agua requerida, finalizando con una temperatura de 44°C. A partir de ese momento, el sistema se enfocó exclusivamente en la recuperación térmica, alcanzando 75°C al final del día. Durante los siguientes dos días, el sistema de captación operó con el objetivo de elevar la temperatura del termotanque hasta 95°C y mantenerla en ese nivel, asegurando así óptimas condiciones de arranque para la siguiente semana de producción.

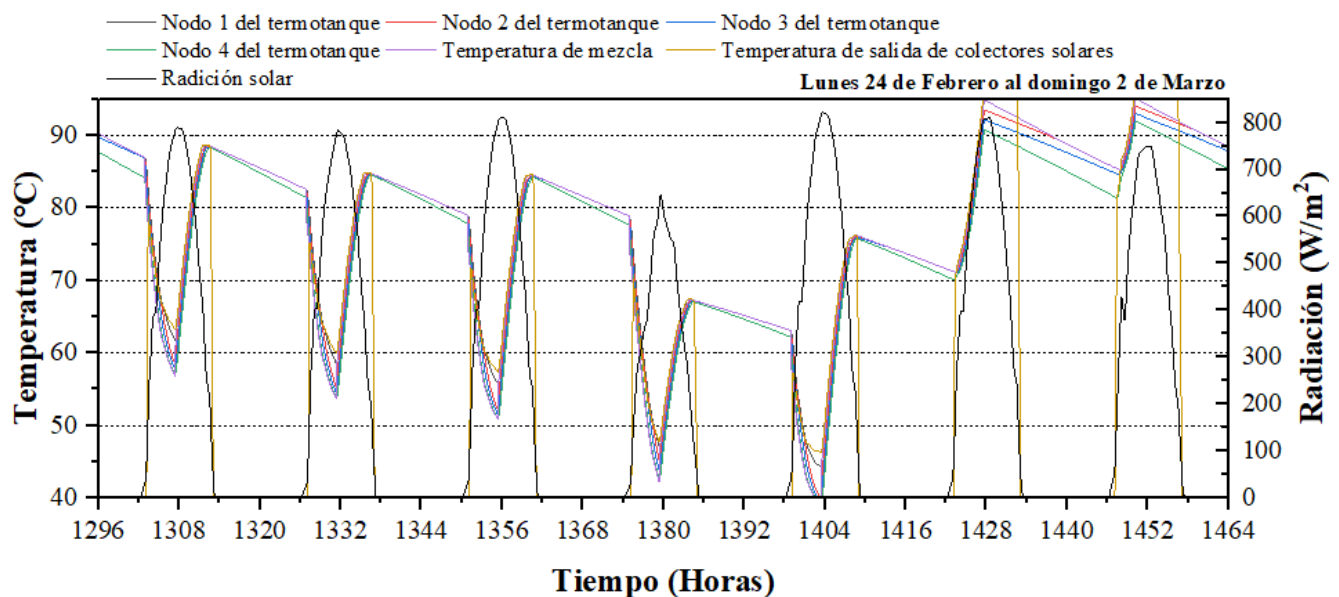


Figura 40. Comportamiento térmico diario del sistema durante producción de agua en invierno, en sistema de BTBT.

En consecuencia, analizaremos el comportamiento del suministro de calor frente a la demanda o remoción de calor en el tanque durante la fase de producción.

El primer día de producción inicia a las siete de la mañana. Como se observa en la **Figura 41**, durante todo el período de operación, la demanda de calor del sistema MED de BTBT es mayor al suministro de calor proveniente del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica. A primera vista, esto podría parecer una desventaja, ya que la demanda supera al suministro, lo que podría sugerir que no se produciría toda el agua requerida. Sin embargo, considerando que el sistema productor de agua solo necesita alrededor de cinco horas para cumplir con la demanda diaria, el resto del día se emplea para recuperar la temperatura del termotanque.

Este comportamiento se evidencia en la **Figura 40**, donde alrededor del mediodía la temperatura del termotanque comienza a incrementarse. Esta misma tendencia se mantiene durante los siguientes dos días, hasta que en el cuarto día la radiación solar disminuye considerablemente en comparación con los días previos.

Al haber menor disponibilidad de radiación, el suministro de calor se reduce, lo que afecta el balance térmico del sistema. Si bien en los días anteriores el termotanque ya experimentaba una disminución de temperatura debido a la demanda de la MED, la reducción en el suministro de calor en este cuarto día provoca una menor recuperación térmica tras la producción. La demanda de calor se sigue cumpliendo, lo cual es positivo, pero la menor radiación impide que el termotanque recupere su temperatura al mismo ritmo que en los días anteriores.

En el último día de producción, la radiación vuelve a niveles similares a los primeros tres días, lo que permite que el comportamiento térmico del sistema regrese a la normalidad. La demanda de calor se mantiene constante, asegurando el cumplimiento del objetivo de producción del día. Finalmente, durante los dos días siguientes, el sistema solo se enfoca en la recuperación térmica, permitiendo que la temperatura del termotanque se eleve nuevamente hasta la temperatura máxima requerida, asegurando así óptimas condiciones para el inicio de la siguiente semana de producción.

Comportamiento del tanque de agua producto en semana de producción en semana de invierno para BTBT

Al haber analizado el comportamiento del termotanque tanto en términos de la calidad de la energía como del calor suministrado y retirado, ahora observaremos en la **Figura 42** el comportamiento del tanque de agua producto a lo largo de la semana de producción.

El primer día, como se mencionó anteriormente, la producción inicia a las 7:00 a.m., y para mediodía el sistema ya ha generado toda el agua requerida para la jornada. A lo largo de los cinco días de producción, el comportamiento es similar, con la diferencia principal en la cantidad de agua almacenada al final de cada día.

El primer día, tras cubrir la demanda de agua, quedan almacenados 1.6 m^3 . En los siguientes días, excepto el viernes, el almacenamiento se incrementa en aproximadamente 1.3 m^3 diarios. Como se observa en la figura, esta tendencia se cumple durante los primeros cuatro días.

Sin embargo, el día viernes presenta una modificación clave: aunque a simple vista el comportamiento parece idéntico a los días anteriores, aquí entra en acción un control especial que evalúa si es necesario producir más agua al finalizar el día. Su objetivo es asegurar que el tanque cuente con 6 m^3 almacenados para abastecer la demanda del sábado y domingo, días en los que no se genera más agua y el sistema se enfoca en recuperar temperatura para iniciar la siguiente semana con la mayor calidad posible.

Gracias a este control, al cierre del viernes el tanque alcanza alrededor de 7 m^3 , lo que garantiza el suministro del fin de semana. Como se muestra en la figura, al finalizar el domingo aún queda casi 1 m^3 disponible, confirmando que la producción semanal ha sido exitosa.

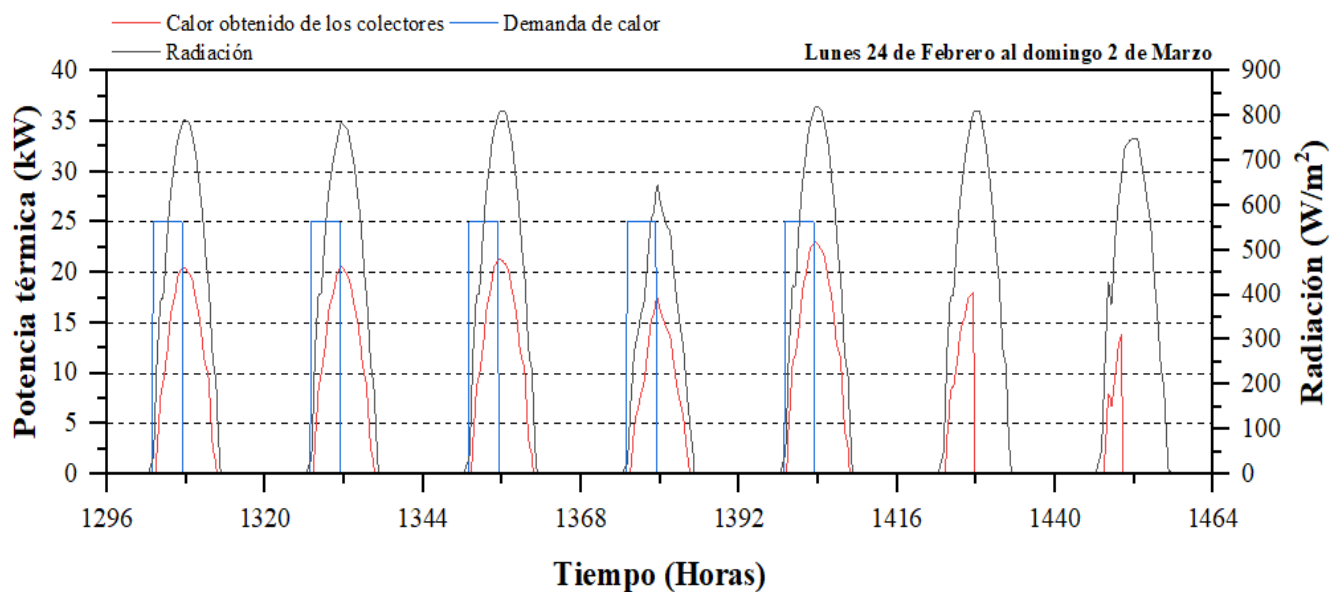


Figura 41. Balance energético diario: Demanda del sistema MED vs. calor suministrado por colectores solares en invierno, en sistema de BTBT.

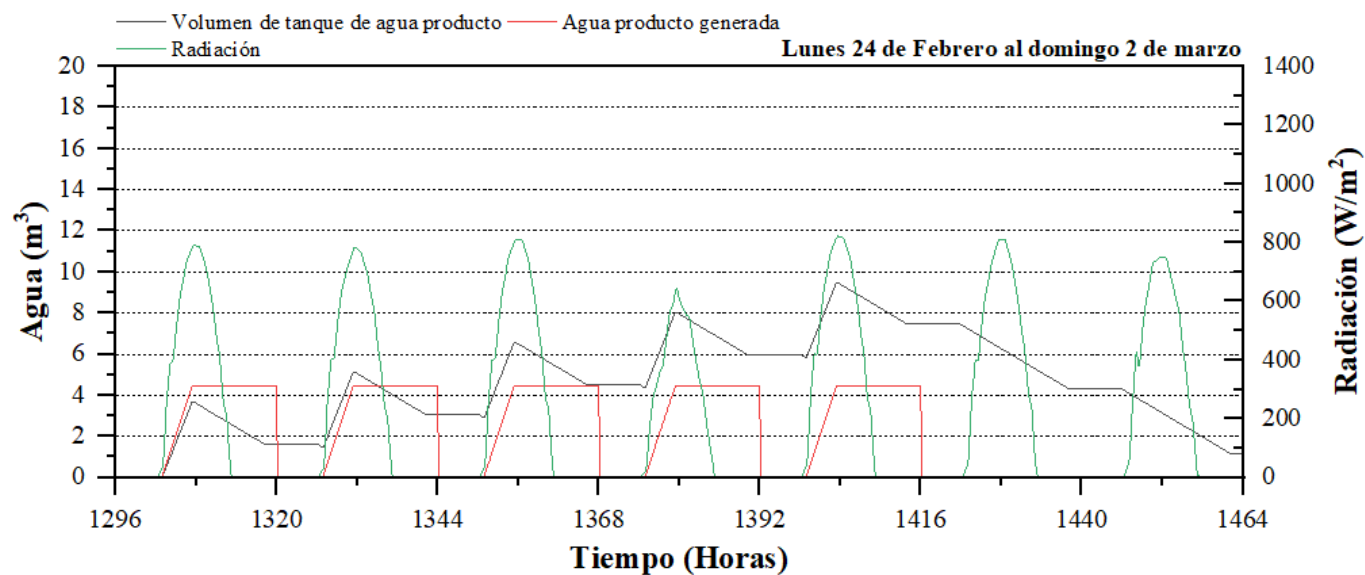


Figura 42. Producción y almacenamiento de agua durante semana de invierno: volumen acumulado vs. demanda diaria, en sistema de BTBT.

4.2.2 Temporada de Verano

Semana de arranque de BTBT en verano

Durante la semana de arranque del sistema de captación y almacenamiento térmico aplicado en BTBT, se han asignado los mismos días que en el sistema integrado en ATBT, ya que en ambos casos es necesario alcanzar una temperatura de 95°C para iniciar por primera vez la producción de agua y enfriamiento, independientemente de la temporada. En este escenario de verano, la semana de arranque comprende del miércoles 23 de abril al miércoles 30 de abril, pero en la **Figura 43** solo se muestra el 23 de abril, dado que el arreglo de colectores logró elevar la temperatura del termotanque hasta los 95°C en un solo día. Este rápido incremento de temperatura se debe, por un lado, al tamaño reducido del termotanque, de tan solo 2 m³, lo que implica que los colectores no necesitan calentar una gran cantidad de agua, y por otro, a la alta radiación solar registrada en estos días, con valores entre 900 W/m² y 1000 W/m², permitiendo que la temperatura del termotanque alcanzara el umbral requerido en un solo día.

Adicionalmente, se observa un decremento en la temperatura, lo que indica que el mismo día que arrancó el sistema, también inició la producción de agua y, en caso de ser necesario, de enfriamiento. A partir de 95°C, la temperatura disminuyó hasta los 35°C, lo que sugiere que se utilizó todo el calor almacenado, ya que esta es su temperatura límite inferior. En este proceso, se habrían producido aproximadamente 6.5 m³ de agua, aprovechando todo el calor suministrado por el arreglo de colectores y almacenado en el termotanque.

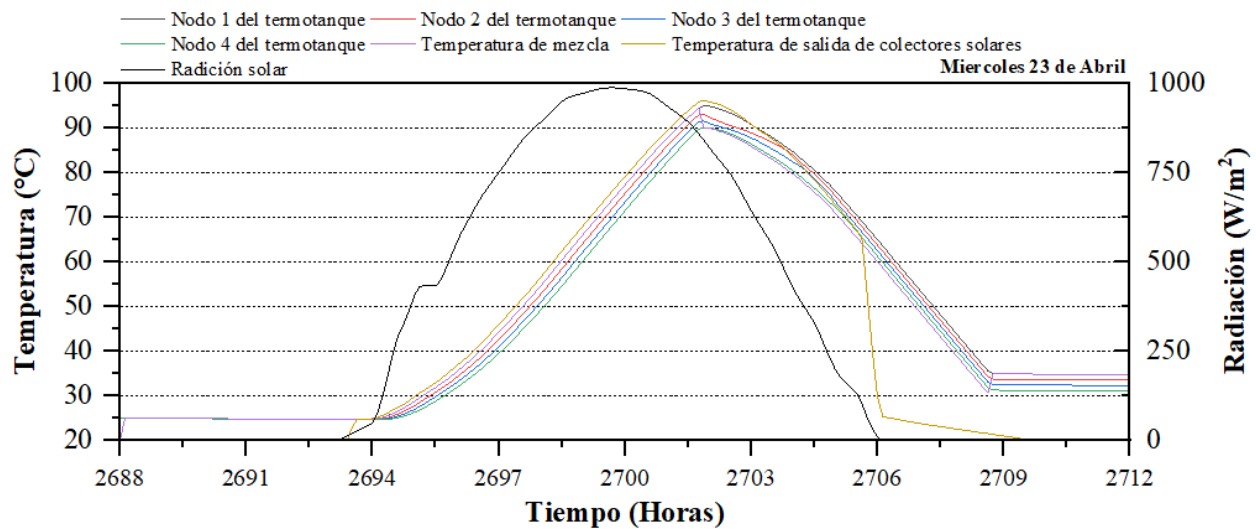


Figura 43. Evolución diaria de la temperatura en el termotanque: proceso de calentamiento solar, en sistema de BTBT (verano).

Comportamiento de termotanque en semana de producción en semana de verano para BTBT

En la **Figura 44** se observa el comportamiento térmico del sistema de captación y almacenamiento de energía solar durante la semana de análisis correspondiente a la temporada de verano, aplicado en el sistema de desalinización MED de BTBT. El día previo al inicio del análisis, la temperatura del termotanque alcanzó los 95°C. Sin embargo, debido a las pérdidas térmicas inherentes al sistema, la temperatura inicial de operación descendió a aproximadamente 87°C. Con el inicio de la producción de agua, se registró una disminución progresiva en la temperatura del termotanque hasta alcanzar 77°C, manteniéndose en ese intervalo durante aproximadamente medio día gracias a la compensación térmica proporcionada por el sistema de captación. No obstante, al extenderse las horas de producción, la temperatura continuó descendiendo hasta alcanzar un valor cercano a los 70°C al final de la jornada. Durante el día siguiente, se evidenció un comportamiento similar, con una temperatura inicial ligeramente inferior a 70°C, que, tras una fase de relativa estabilidad a lo largo del día, disminuyó progresivamente hasta aproximadamente 55°C al término del período de producción.

En el tercer día de operación, la temperatura inicial del termotanque fue de 53°C, experimentando una reducción hasta estabilizarse en torno a los 50°C durante una parte del día. Posteriormente, hacia la tarde, se observó una nueva caída en la temperatura, finalizando la jornada con un valor

de 47°C. Durante el cuarto día, el sistema inició la producción con aproximadamente 45°C; sin embargo, a diferencia de los días previos, se registró un ligero incremento en la temperatura durante el mediodía, atribuible a una mayor disponibilidad de radiación solar, seguido por un descenso progresivo debido a la reducción de la irradiancia hacia el final del día, alcanzando valores inferiores a 40°C. Finalmente, el último día de análisis comenzó con una temperatura de 40°C, mostrando una tendencia similar de reducción en las primeras horas del día, seguida por un aumento moderado al mediodía que permitió conservar la operación del sistema. Al concluir la jornada, la temperatura del termotanque se situó en poco más de 35°C, alcanzando así el umbral mínimo requerido para garantizar la producción de agua.

Los dos días posteriores al período de producción se destinan a la recuperación térmica del termotanque, permitiendo que su temperatura aumente progresivamente desde un valor ligeramente inferior a 40°C hasta alcanzar nuevamente los 95°C. Este rápido incremento se debe, en gran medida, a la alta disponibilidad de radiación solar durante estos días, en combinación con el reducido volumen del termotanque (2 m³), lo que facilita una elevación eficiente de la temperatura.

Además, la dinámica observada resalta la influencia de las pérdidas térmicas en el sistema, particularmente debido a la demanda de calor. Estas pérdidas contribuyen significativamente a la reducción de la temperatura del termotanque durante la fase de producción, evidenciando la necesidad de optimizar el aislamiento térmico y la gestión de la energía almacenada para maximizar la eficiencia operativa del sistema.

Una vez analizado el comportamiento térmico del sistema de captación y almacenamiento durante la semana de estudio, en la **Figura 45** se examina el mismo período de análisis en la temporada de verano, pero desde la perspectiva del suministro y la demanda de calor en la MED de BTBT. En términos generales, durante los primeros dos días, el sistema de captación únicamente logró igualar la demanda de calor establecida, lo que se refleja en una estabilidad térmica dentro del termotanque, donde la temperatura se mantiene constante durante un periodo de la fase de producción.

En contraste, durante los tres días siguientes, el sistema comenzó a suministrar más calor del requerido por la MED de BTBT, lo que resultó en un incremento progresivo de la temperatura del termotanque. Este comportamiento sugiere que, cuando la captación de energía supera la demanda térmica, se genera una acumulación de calor que favorece el aumento de temperatura del sistema de almacenamiento, lo que puede impactar la eficiencia operativa y la regulación térmica del proceso.

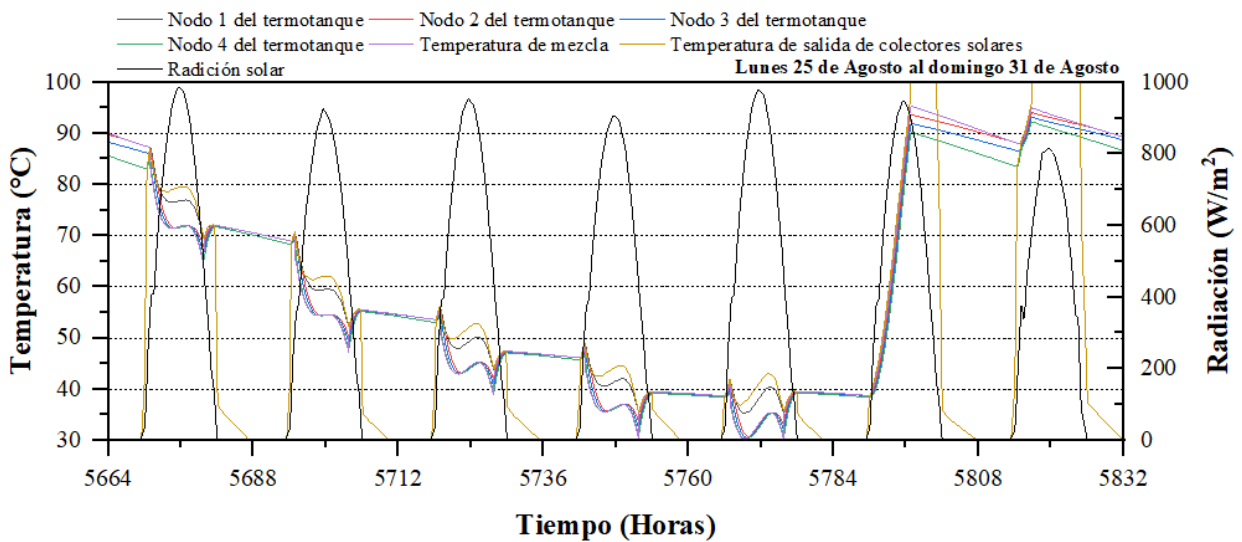


Figura 44. Figura 32. Comportamiento térmico diario del sistema durante producción de agua y enfriamiento en verano, en sistema de BTBT.

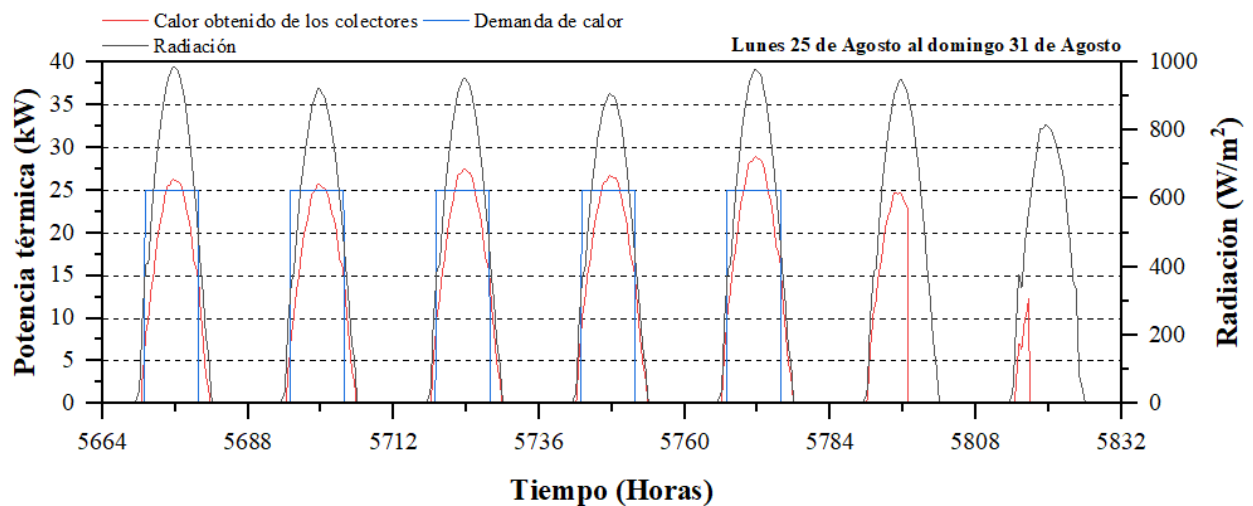


Figura 45. Balance energético diario: Demanda del sistema MED vs. calor suministrado por colectores solares en verano, en sistema de BTBT.

Comportamiento del tanque de agua producto en semana de producción en semana de verano para BTBT

Desde la perspectiva de la producción de agua y enfriamiento, como se muestra en la **Figura 46** el comportamiento observado durante los cinco días de análisis es relativamente constante. Esto se debe a la estabilidad en las temperaturas del sistema de captación y almacenamiento, así como al balance entre el suministro y la demanda de calor en el termotanque, aspectos previamente analizados.

Se destaca que tanto la producción de agua como la de enfriamiento se llevaron a cabo en su totalidad durante los cinco días evaluados. Sin embargo, para el quinto día, es fundamental verificar la cantidad de agua disponible una vez finalizada la producción diaria. En este sentido, el control implementado, que establece que al finalizar la jornada del día viernes deben quedar 12 m³ en el tanque de almacenamiento, permite asegurar la disponibilidad de agua para futuras necesidades. En la semana de producción analizada para la temporada de verano, se confirma que esta condición se cumple, garantizando así la continuidad del suministro.

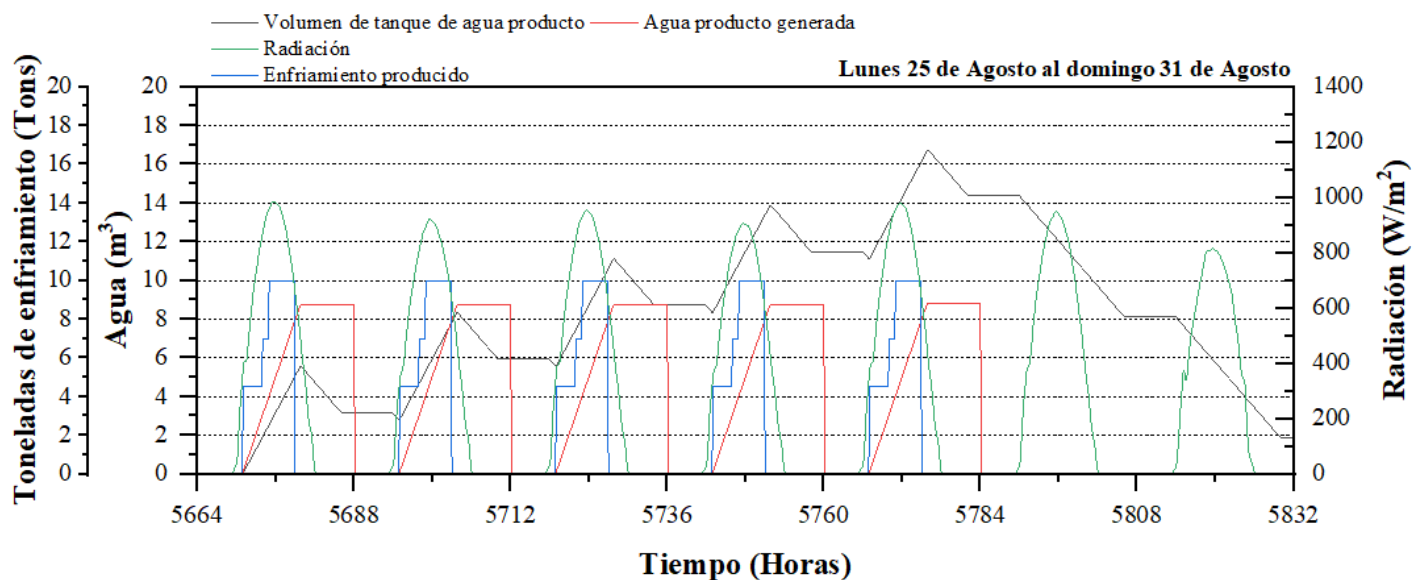


Figura 46. Producción y almacenamiento de agua durante semana de verano: volumen acumulado vs. demanda diaria, en sistema de BTBT.

4.3 Comparación

4.3.1 Invierno

Arranque de Invierno

Anteriormente, analizamos cada figura de manera individual. Ahora, compararemos sus diferencias y ventajas en términos de desempeño. En la **Figura 47**, se observa el arranque del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica durante el periodo de invierno. La **Figura 47 (a)**, correspondiente a la aplicación en la MED de ATBT, muestra que el sistema requiere cinco días para elevar la temperatura del termotanque hasta 95°C. En contraste, en la **Figura 47 (b)**, correspondiente a la aplicación en la MED de BTBT, el sistema alcanza la misma temperatura en solo dos días, lo que representa una reducción de aproximadamente 70% en el tiempo necesario para alcanzar la temperatura objetivo.

Este comportamiento puede explicarse por varias razones. Según la **Tabla 14**, la opción de BTBT utiliza un volumen de tanque más pequeño, lo que naturalmente permite alcanzar la temperatura deseada en menos tiempo. Además, el sistema de BTBT emplea únicamente nueve colectores solares, en comparación con la configuración de ATBT, lo que representa una ventaja tanto en términos de eficiencia térmica como de reducción de costos. Dado que ambos sistemas utilizan el mismo periodo de simulación, la diferencia en el tiempo de calentamiento no está influenciada por este factor, sino principalmente por la configuración del termotanque y la cantidad de colectores solares. Estos resultados refuerzan la viabilidad de la propuesta de BTBT, al demostrar un rendimiento más eficiente con menores requerimientos de recursos.

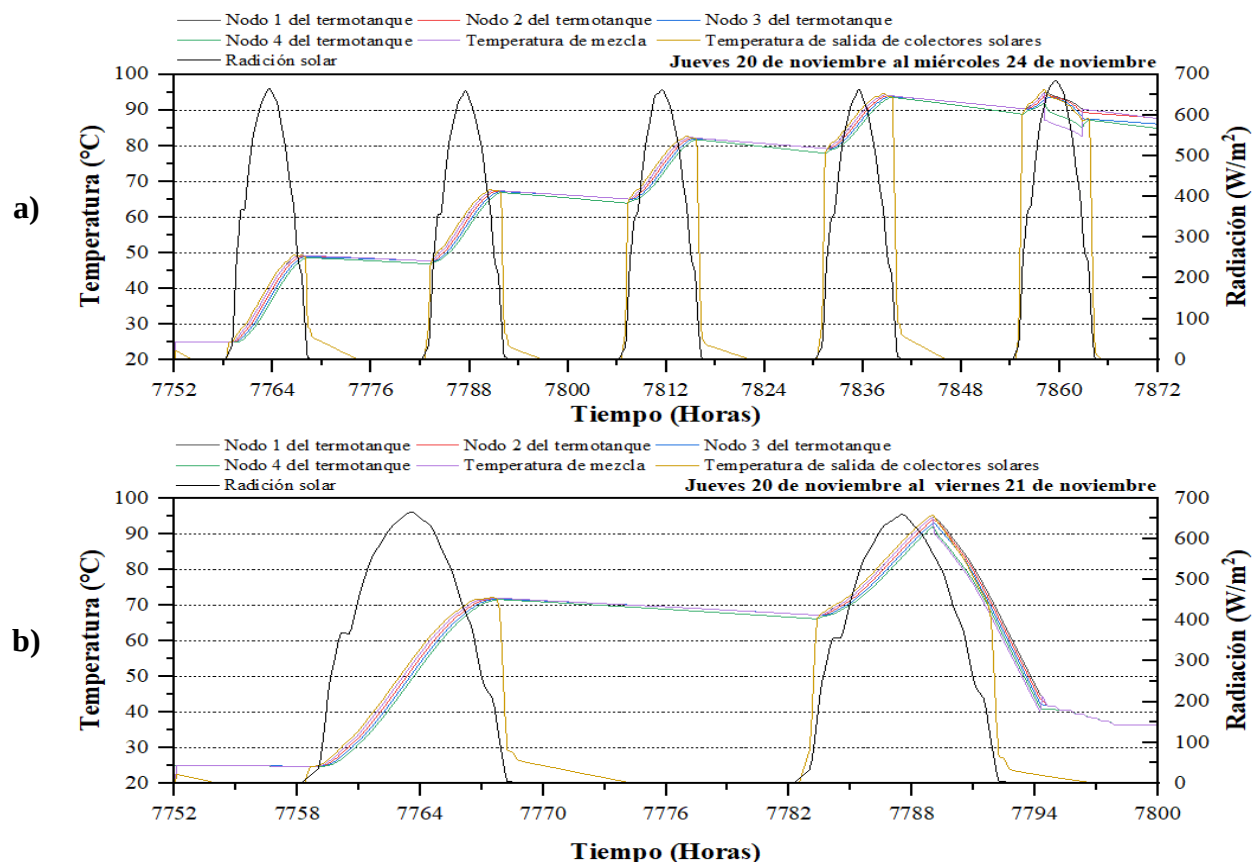


Figura 47. Tiempo de arranque comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en invierno.

Comparación del comportamiento en el termotanque en la semana de producción para la semana de invierno

Después de analizar el arranque en ambas aplicaciones, ahora nos enfocamos en el comportamiento del sistema a lo largo de la semana de operación, centrándonos en la temperatura del arreglo de colectores y la temperatura del termotanque durante la producción (**Figura 48**). Ambas aplicaciones comienzan con condiciones similares, ya que un día antes del inicio de la producción, el termotanque alcanza los 95°C, asegurando una temperatura inicial óptima para el primer día de operación. Una de las primeras diferencias que se observan es cómo el sistema de captación de energía solar aplicado en ATBT logra mantener una menor disminución de temperatura en el termotanque a lo largo de la semana. Esto se debe a que el suministro de calor del arreglo de colectores en esta configuración permite que la pérdida de temperatura sea menos

abrupta en comparación con la opción BTBT, donde la demanda de calor del sistema MED provoca una caída más pronunciada. En ambos casos, después del mediodía, la temperatura del termotanque comienza a incrementarse nuevamente, ya que el sistema MED deja de extraer calor, permitiendo que la captación solar recupere parte de la energía almacenada.

El cuarto día de la semana es clave para evidenciar una diferencia importante entre ambas configuraciones. En la opción ATBT, la mayor masa de agua en el termotanque ayuda a mitigar los efectos de la menor radiación solar, reduciendo el impacto de la pérdida térmica. En contraste, en la opción BTBT, al contar con un termotanque de menor volumen, la disminución de temperatura es más significativa cuando la radiación es baja, lo que puede comprometer el suministro de calor. Esto demuestra que la mayor inercia térmica de un tanque más grande puede ser una ventaja en días con menor disponibilidad de energía solar. Otra diferencia relevante es que el sistema ATBT puede compensar las pérdidas térmicas de la mañana gracias a dos factores principales: el mayor volumen de agua en el termotanque y la mayor cantidad de colectores solares instalados. Esto permite una mejor captación y almacenamiento de energía durante el día, asegurando que la temperatura se mantenga dentro de un rango adecuado para la producción de agua. Aunque el rango de temperatura de operación en ATBT es más reducido, la mayor masa de agua permite que la producción se mantenga estable a lo largo de la semana, evitando fluctuaciones que puedan afectar el desempeño del sistema.

Por otro lado, la opción BTBT, al utilizar un termotanque de menor volumen, cuenta con una menor cantidad de energía almacenada, lo que podría parecer una desventaja en términos de estabilidad térmica. Sin embargo, una de las ventajas del sistema MED de BTBT es que opera con un rango de temperatura más amplio, lo que le permite seguir funcionando incluso cuando la temperatura del termotanque disminuye de forma más abrupta. Esto significa que, aunque el sistema experimenta una mayor variabilidad en la temperatura del agua almacenada, puede seguir operando de manera eficiente sin comprometer su rendimiento, ya que su límite inferior de temperatura es menor en comparación con ATBT.

En conclusión, ambos sistemas presentan ventajas dependiendo de las condiciones de operación. La opción ATBT ofrece una mayor estabilidad térmica y una mejor respuesta ante días con menor radiación, mientras que la opción BTBT permite un aprovechamiento más flexible del calor

almacenado, aunque con una disminución de temperatura más rápida. La elección entre ambas configuraciones dependerá de las prioridades del sistema, ya sea optimizar la estabilidad térmica o permitir un mayor rango de operación en temperaturas más bajas.

Abordaremos la aplicación de ambas opciones considerando el suministro de calor y la demanda de calor por parte del termotanque, donde se observan diferencias notables. De entrada, la demanda de calor para la configuración de BTBT es un 37.5% menor en comparación con la configuración de ATBT, lo que la hace más atractiva desde el punto de vista energético, ya que requiere menos energía para su funcionamiento. Como se mencionó anteriormente, esto permite utilizar una menor área de captación solar y un termotanque de menor volumen, reduciendo el tamaño general del sistema. Al comparar ambas opciones en la **Figura 49**, se observa que, durante el mismo periodo de análisis, la configuración ATBT logra un suministro de calor ligeramente superior a la demanda en ciertos momentos de la fase de producción.

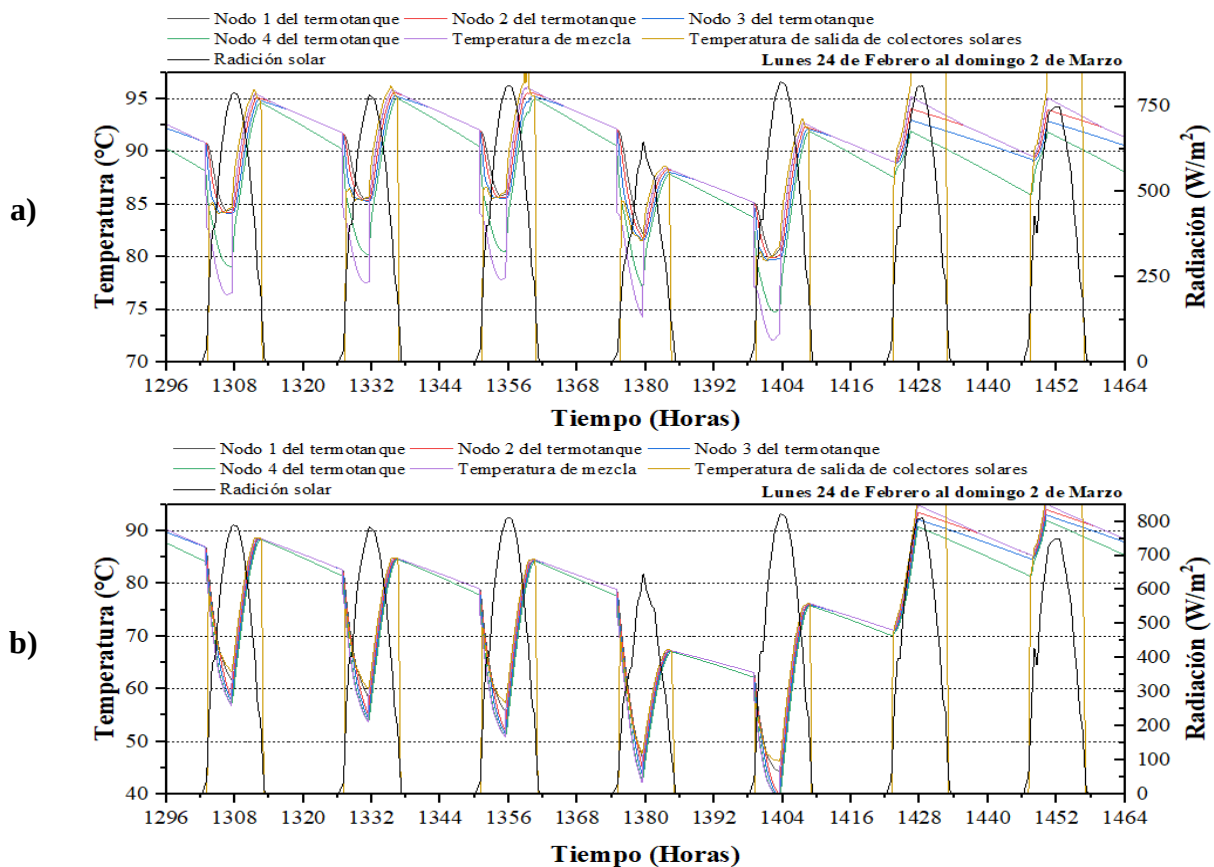


Figura 48. Comportamiento térmico comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en invierno.

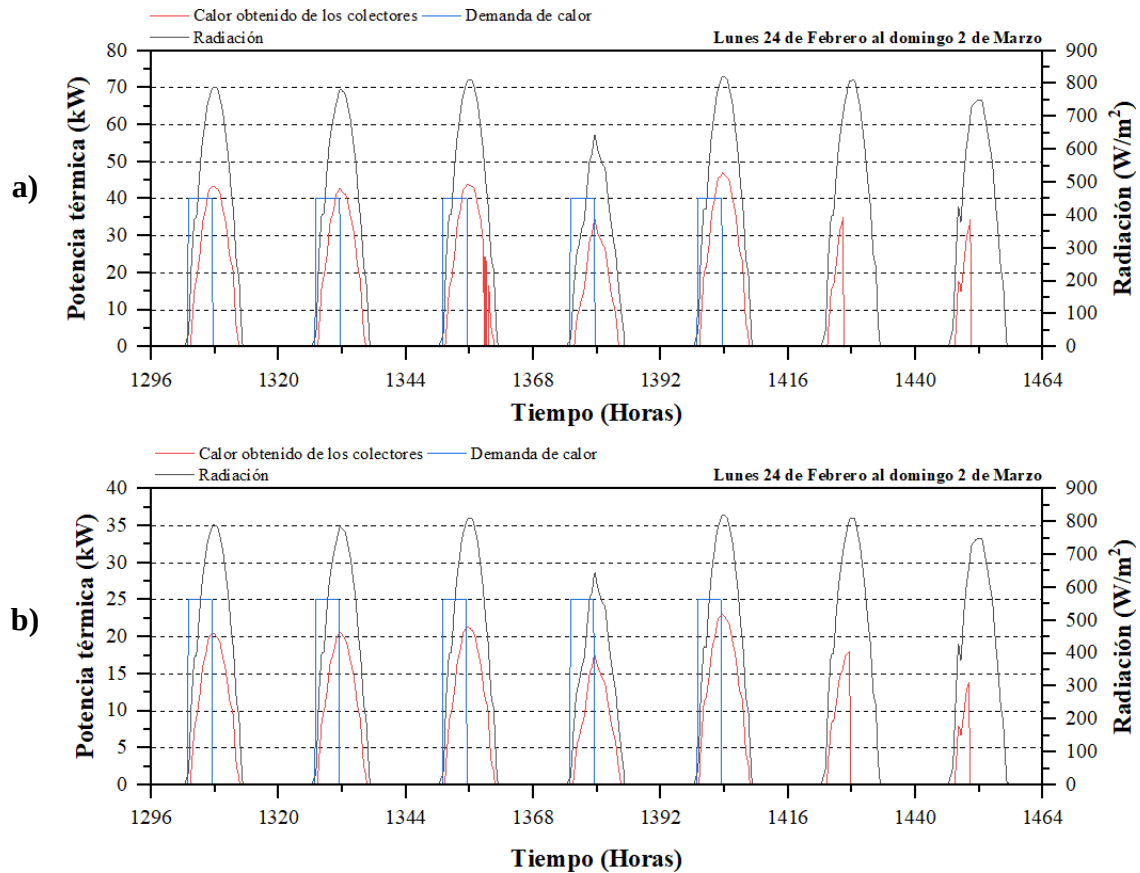


Figura 49. Balance energético comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en invierno.

Este comportamiento ayuda a amortiguar parcialmente el impacto de la extracción de calor por parte del sistema MED, permitiendo mantener temperaturas más estables. En contraste, en la configuración de BTBT, el suministro de calor de los colectores solares nunca supera la demanda de calor del sistema MED, que es de 25 kW. Sin embargo, la diferencia clave radica en el rango de temperatura utilizado en el termostato. Mientras que la configuración de ATBT opera en un rango de temperaturas de 95°C a 78°C, la configuración de BTBT, utiliza un rango más amplio, de 95°C a 35°C. Esta mayor diferencia de temperatura otorga una mayor capacidad operativa al sistema, ya que permite aprovechar un mayor margen térmico para producir agua, optimizando el suministro de calor y manteniendo la temperatura del termostato dentro de los límites requeridos. Por lo tanto, a pesar de que el suministro de calor nunca excede la demanda de la MED, la configuración de BTBT puede funcionar de manera eficiente gracias a su mayor rango operativo.

Comparación del tanque de agua producto en la semana de producción en la semana de invierno

En la **Figura 50** se presenta el comportamiento del sistema productor de agua y enfriamiento para ambos casos. Los resultados deben ser lo más semejantes posible, ya que ambas opciones fueron seleccionadas precisamente porque cumplen en su totalidad con la demanda de agua diaria. Dado que no es posible comparar directamente cuál de las dos opciones produce más agua, ya que ambas cumplen con la misma demanda, podemos destacar una ventaja clara de la configuración de BTBT. Esta alternativa requiere solo 9 colectores solares y un volumen de tanque de 2 m³, lo que la convierte en una opción más atractiva. Esto atribuido a lo que se mencionaba de anteriormente de utilizar una menor cantidad de calor para la producción de agua, además, del rango de temperatura que manejamos para la configuración de BTBT.

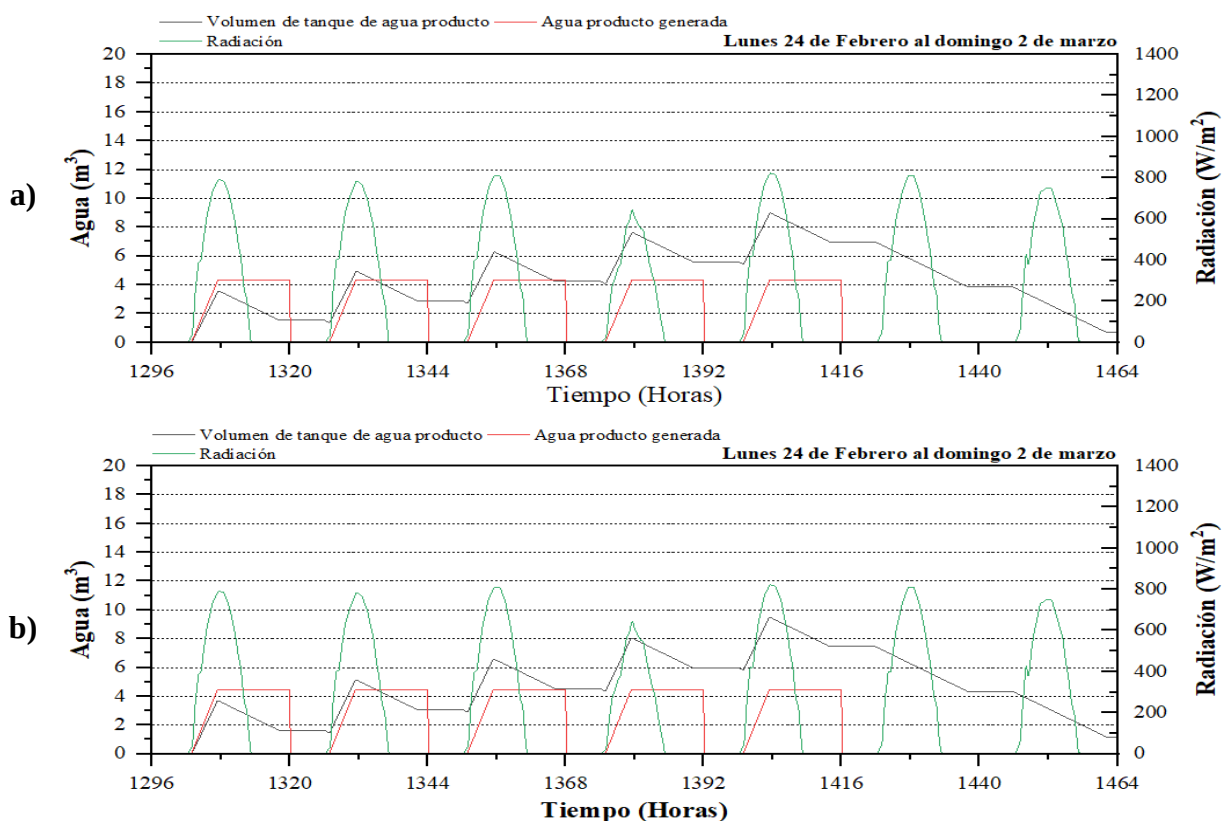


Figura 50. Comportamiento de producción y almacenamiento de agua comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en invierno.

4.3.2 Verano

Comparación Semana da arranque de verano

El periodo de verano resulta más favorable para ambos casos, ya que la mayor disponibilidad de radiación solar por día permite que los termotanques alcancen la temperatura deseada en menos tiempo. En la **Figura 51**, se observan los periodos de arranque para ambas opciones. Como ya se ha analizado cada opción por separado, ahora se puede comparar el tiempo que toma cada una en alcanzar la misma temperatura. La diferencia clave radica en el volumen del termotanque, ya que la opción configuración de BTBT se utiliza 2 m³, lo que facilita un aumento más rápido de temperatura. Dado que ambas fueron evaluadas en el mismo periodo de tiempo, se evidencia una superioridad de la configuración de BTBT, logrando reducir el tiempo de calentamiento en un 50% en comparación con la configuración de ATBT.

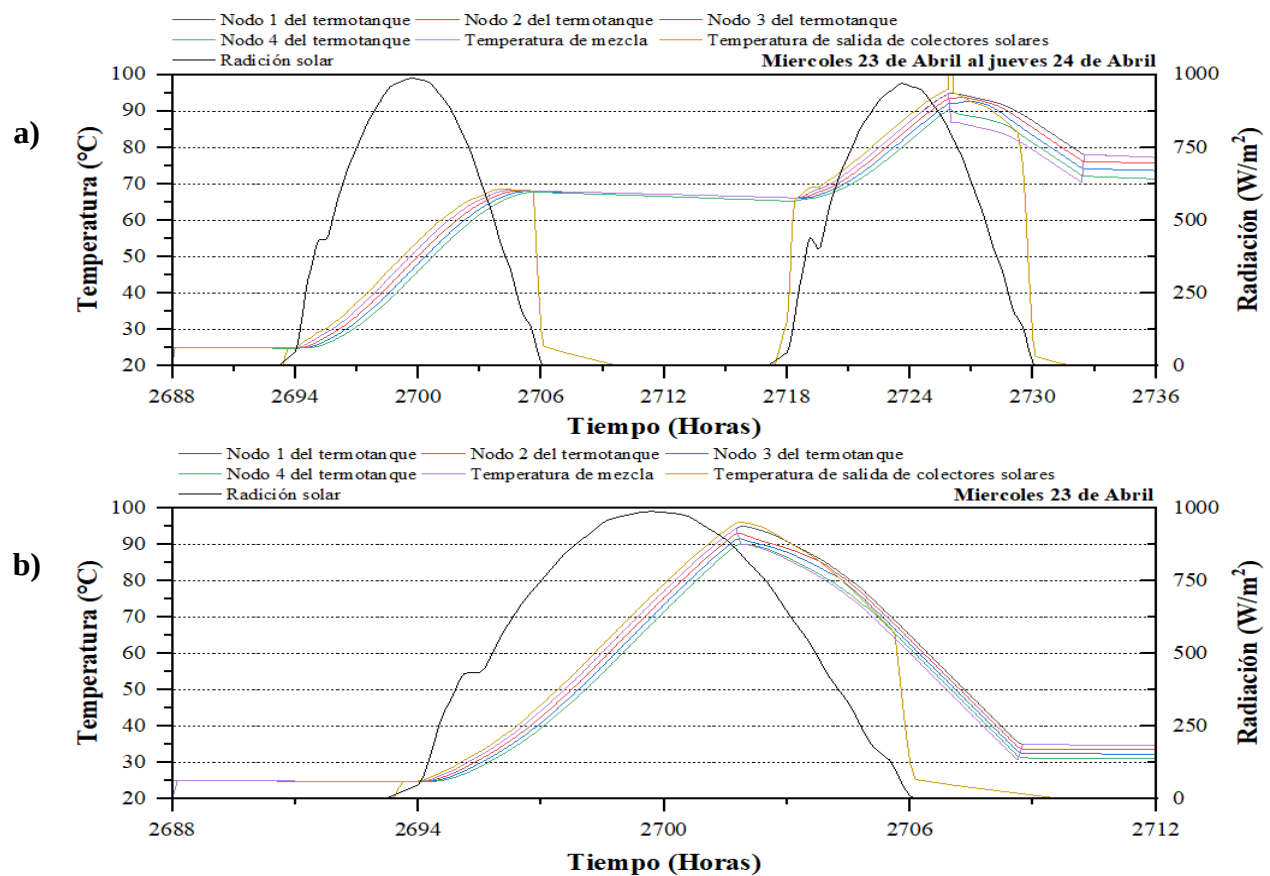


Figura 51. Tiempo de arranque comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en verano.

Comparación del comportamiento en el termotanque en la semana de producción de agua para la semana de verano

En la **Figura 52** se muestra el comportamiento de las temperaturas del termotanque y la salida de los colectores solares. Sin profundizar en los detalles de cada figura, ya explicados previamente, ahora se compararán ambas opciones para identificar sus diferencias, considerando que ambas cumplen el mismo objetivo de producción de agua y enfriamiento.

Cada opción presenta un comportamiento térmico distinto. En la configuración de ATBT, la temperatura del termotanque disminuye durante las primeras horas de la fase de producción en los cinco días de operación semanal. Sin embargo, a lo largo de esta fase, la temperatura del termotanque aumenta de manera notable gracias al suministro de calor del arreglo de colectores solares, permitiendo una recuperación térmica constante.

En la configuración de BTBT, también se observa una disminución inicial en la temperatura del termotanque durante las primeras horas de la fase de producción. A diferencia de la configuración de ATBT, el incremento de temperatura en el termotanque es más sutil y menos pronunciado a lo largo del día, lo que indica que el sistema opera con una menor acumulación de calor. Aunque este comportamiento podría parecer una desventaja en términos de estabilidad térmica, se compensa con el mayor rango de temperatura operativa de la configuración de BTBT, lo que permite que la producción de agua y enfriamiento continúe sin necesidad de alcanzar temperaturas tan elevadas en el termotanque.

Además, este enfoque posibilita reducir la cantidad de colectores solares, ya que el diseño de la configuración de BTBT prioriza un rango térmico más amplio en lugar de depender de un aumento significativo en la temperatura del tanque. De esta forma, la configuración de BTBT optimiza el suministro de calor y mantiene la eficiencia del sistema con una menor cantidad de captadores solares.

El comportamiento del termotanque también puede analizarse considerando el suministro de calor y la demanda térmica del sistema como se observa en la **Figura 53**. Como se ha mencionado anteriormente, cada opción presenta características particulares que influyen en su desempeño.

Una de las diferencias más notables es la cantidad de energía suministrada en relación con la demanda establecida. En la configuración de ATBT, el suministro de calor alcanza un pico cercano a 60 kW, mientras que la demanda establecida es de 40 kW. Esta diferencia explica el aumento en la temperatura del termotanque durante la fase de producción, ya que el exceso de calor contribuye a una acumulación térmica más significativa.

Por otro lado, en la configuración de BTBT, el suministro de calor también supera la demanda, aunque en menor medida. En su punto más alto, el sistema suministra 30 kW, comparados con los 25 kW que requiere el sistema. Esta diferencia más ajustada resalta cómo la configuración de ATBT tiene una mayor capacidad para enfrentar periodos de radiación solar reducida, asegurando una mejor estabilidad térmica en el termotanque durante la fase de producción.

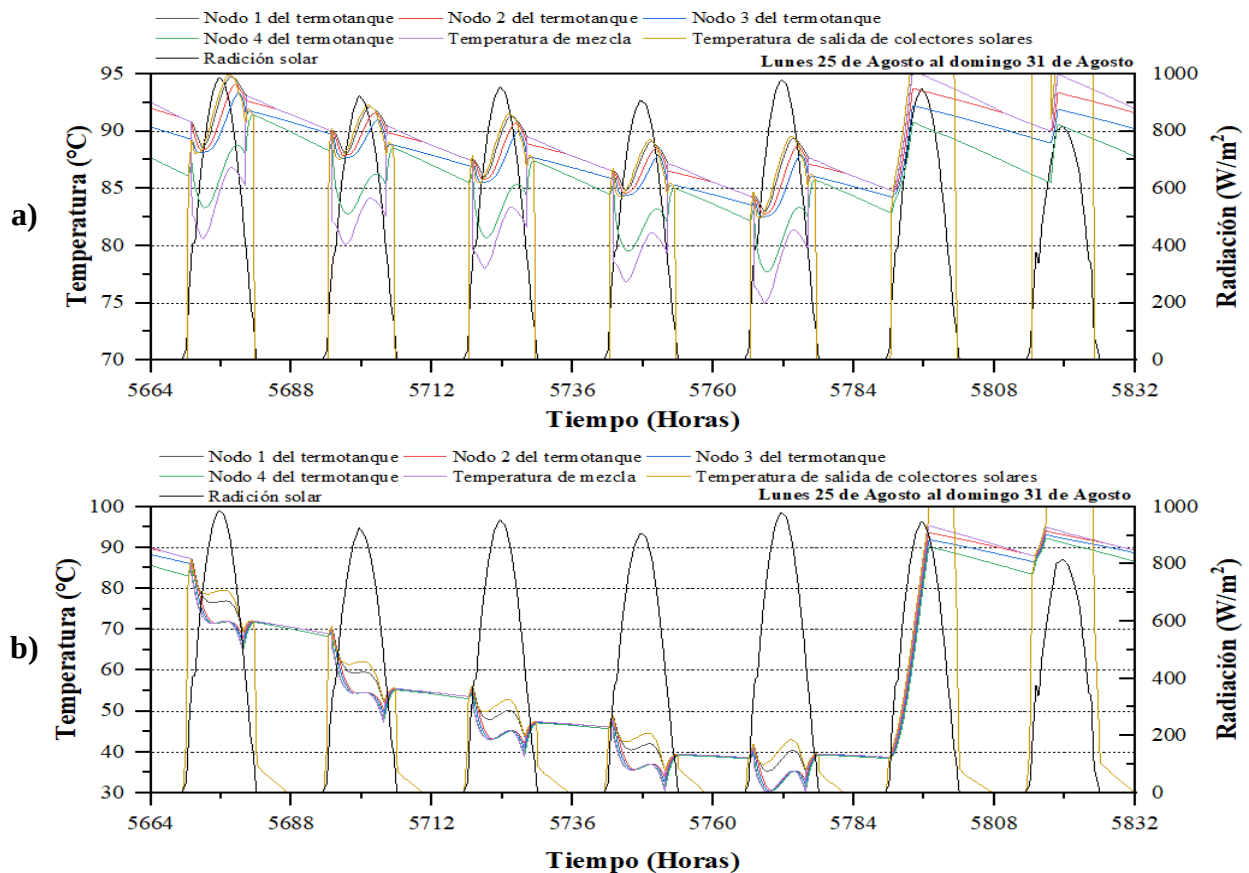


Figura 52. Comportamiento térmico comparativo:
a) ATBT y b) BTBT, en verano.

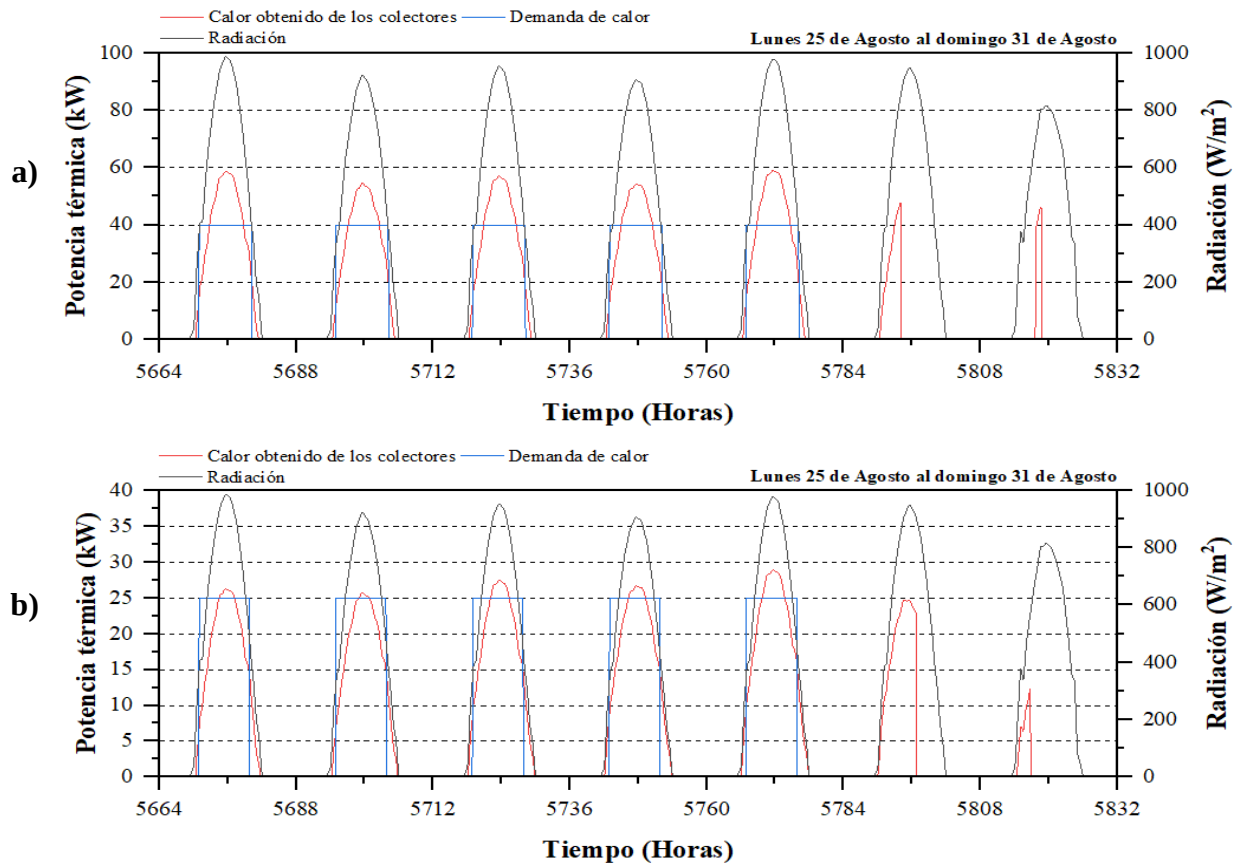


Figura 53. Balance energético comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en verano.

Comparación del tanque de agua producto en la semana de producción en la semana de verano

Al comparar las configuraciones (**Figura 54**), se observa un comportamiento muy similar en términos de desempeño, ya que ambas cumplen con la demanda de agua y enfriamiento requerida durante toda la semana. Sin embargo, la diferencia clave se hace más evidente en condiciones de invierno, donde la configuración de BTBT presenta ventajas significativas.

En particular, la configuración de BTBT requiere una menor cantidad de colectores solares y un termotanque de menor volumen, lo que indica un mejor aprovechamiento de la energía térmica. Esto se debe a que utiliza menos calor para activar el sistema productor de agua y enfriamiento, además de operar con un rango de temperatura más amplio, lo que permite una producción eficiente sin necesidad de grandes acumulaciones de energía térmica.

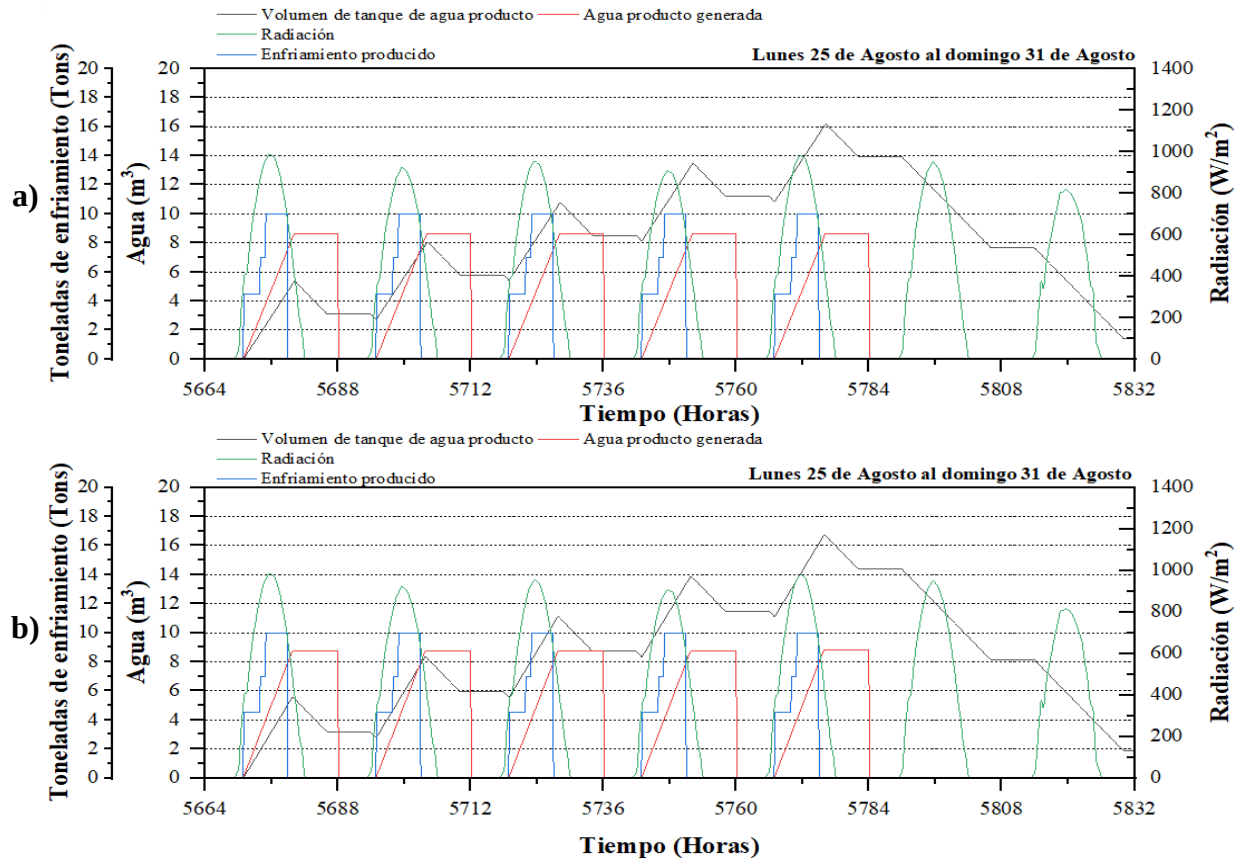


Figura 54. Comportamiento de producción y almacenamiento de agua comparativo: a) ATBT y b) BTBT, en verano.

4.4 Comparación de resultados

En la **Tabla 13** se muestra una comparación entre ambas propuestas, colocadas lado a lado. Desde el punto de vista térmico, el sistema de bajo TBT presenta una eficiencia superior respecto a su contraparte, evidenciada por una reducción del 37.5 % en el requerimiento térmico, lo cual resulta ya considerable. Además, pese a disminuir su temperatura de activación, este sistema logra una producción de agua un 4.7 % mayor, lo que, en términos anuales, representa una diferencia de poco más de 400 m³. Esta ventaja sustancial repercute directamente en el dimensionamiento del sistema de captación y almacenamiento, permitiendo una reducción del 57 % y 80 % en sus respectivos tamaños. Si bien ambos sistemas satisfacen adecuadamente la demanda de agua y enfriamiento, se observa una clara mejora al emplear la máquina de bajo TBT. Cabe destacar que esta alternativa también ofrece un tiempo de arranque más corto, alcanzando los 95 °C en el termotanque en tan solo un día y medio, lo que representa un desempeño inicial notable. En cuanto

al flujo requerido para el suministro de energía térmica desde el termotanque hacia el generador, se mantiene constante en ambos casos (1.2 kg/s). No obstante, sí se evidenció una mejora considerable en el flujo necesario para el sistema de captación solar, con una reducción del 57 %, lo que implica una disminución equivalente en los costos operativos asociados al funcionamiento de la bomba de los colectores.

Tabla 15. Comparación ATBT vs. BTBT: Eficiencia, infraestructura y desempeño.

Comparación			
	ATBT	BTBT	Δ%
Potencia de demanda	40 kW	25 kW	37.50
Temperatura máxima de activación	95 °C	95 °C	0.00
Temperatura mínima de activación	78 °C	35 °C	55.13
Producción de agua por hora	936 l/hr	982.8 l/hr	4.76
Área de captación	92.61 m ²	39.69 m ²	57.14
Volumen de tanque	10 m ³	2 m ³	80.00
Flujo de colectores	1.85 kg/s	0.79 kg/s	57.14
Flujo máximo del fluido caloportador hacia la MED	1.2 kg/s	1.2 kg/s	0.00
Días de arranque Inv.	5 días	1.5 días	70.00
Días de arranque Ver.	1.5 días	0.5 días	66.67
Temperatura de arranque	95 °C	95 °C	0.00
Temperatura de operación	80.00	40.00	50.00

Capítulo 5

5 Estudio Económico del Sistema de Captación y Almacenamiento de Energía Solar Térmica

Durante este capítulo se presentarán los resultados obtenidos a partir de un estudio económico, basado en los resultados técnicos previamente analizados. A partir de estos, se evaluarán los costos asociados a la implementación del sistema de captación y almacenamiento de energía térmica para ambas configuraciones de máquina: la convencional (ATBT) y la de baja temperatura (BTBT). Además, se incluirá un análisis económico de otras configuraciones del sistema solar térmico que, si bien no cumplen con todos los criterios técnicos de selección establecidos, serán evaluadas con el propósito de conocer el grado de diferencia económica con respecto a las configuraciones óptimas.

5.1 Costos generales de sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica

En la **Tabla 16** se presentan los costos unitarios de los principales equipos y componentes necesarios para la construcción del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica. Cabe destacar que cada configuración requiere una cantidad distinta de equipos, dependiendo de su diseño específico. Por ello, para cada configuración se incluye una tabla adicional en la que se detalla la inversión inicial total correspondiente.

La estimación de los costos se realizó a partir de una búsqueda exhaustiva de información en internet, procurando seleccionar componentes adecuados a las condiciones operativas del sistema, particularmente en lo referente a las altas temperaturas que este puede alcanzar. Para el equipo de calor auxiliar se optó por uno que funcione con combustible diésel, al considerarse una alternativa más práctica frente a opciones como el gas LP o el gas natural, las cuales requerirían una infraestructura adicional significativa, encareciendo considerablemente el sistema. En la misma **Tabla 16** se presentan los parámetros técnicos del diésel que serán utilizados posteriormente para el cálculo de los costos de operación de las distintas configuraciones evaluadas.

La búsqueda de precios se centró en proveedores y sitios especializados en equipos térmicos que cumplieran con las especificaciones técnicas requeridas para el sistema propuesto. En el caso de los accesorios menores, como tuberías y conexiones, la selección fue más directa, dado que únicamente se exigía que cumplieran con las dimensiones necesarias para su correcta integración al sistema. Las distintas fuentes consultadas para la obtención de los precios se detallan en el Anexo A. Finalmente, el costo asociado a la mano de obra fue estimado mediante consulta directa con un técnico con experiencia en la instalación de sistemas similares; si bien se trata de un valor aproximado, se considera representativo del contexto real de implementación.

Tabla 16. Costo Unitario de los Equipos del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico

Equipo	Precio Unitario
Colector Solar	\$ 12,000
Termotanque	\$13,186.80
Bomba	\$13,250.71
Tubería	\$ 710.00
Aislamiento térmico	\$591.72
Aislamiento termotanque	\$3,168.48
Equipo auxiliar	\$75,000.00
Válvula de 3 vías	\$27,425.88
Válvula	\$540.40
Costos de instalación	30% del total
Diésel	
Parámetro	Valor
Poder calorífico	9.8 kWh/l
Costo de combustible	\$25 el litro

5.2 Estudio económico del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica implementado en la máquina de ATBT

Costos de Inversión

Para el estudio económico basado en la máquina con alta temperatura (ATBT), se empleará el arreglo seleccionado conforme a los criterios técnicos previamente establecidos. En primera instancia, se determinará la inversión inicial requerida para la implementación de dicha configuración. En la **Tabla 17** se presentan los costos asociados a cada uno de los equipos principales, así como su contribución individual al total de la inversión, lo cual permite visualizar de forma detallada el impacto económico de cada componente dentro del sistema.

Cabe señalar que la mayoría de las cantidades necesarias ya habían sido determinadas durante el proceso de selección de la configuración. No obstante, fue necesario estimar adicionalmente la cantidad de tuberías requeridas, así como el material de aislamiento necesario tanto para las tuberías como para el termotanque. Para estos componentes, las cantidades se expresaron en metros lineales, lo cual facilitó el cálculo de sus respectivos costos unitarios.

Asimismo, en la **Figura 55** se presenta la distribución porcentual de los costos asociados a cada uno de los elementos que integran la inversión inicial del sistema. Se observa que los colectores solares representan el 26 % del total, seguidos por los costos de instalación con 23.1 %, el termotanque con un 13.6 % y el sistema auxiliar con un 7.7 %. En conjunto, estos cuatro componentes concentran el 70.4 % de la inversión inicial. El 29.6% restante corresponde al conjunto de equipos y accesorios menores. Esta representación gráfica permite identificar con claridad los elementos de mayor peso económico dentro del sistema, constituyendo una herramienta útil para el análisis y la identificación de posibles estrategias de optimización de costos.

Tabla 17. Inversión Inicial del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de ATBT.

Cantidad	Equipo y Accesorios	Precio Unitario	Total
21	Colector Solar	\$ 12,000	\$252,000.00
10	Termotanque	\$13,186.80	\$131,868.00
2	Bomba	\$13,250.71	\$26,501.42
150	Tubería	\$ 710.00	\$106,500.00
150	Aislamiento térmico	\$591.72	\$88,758.00
6	Aislamiento termotanque	\$3,168.48	\$19,010.88
1	Equipo auxiliar	\$75,000.00	\$75,000.00
1	Válvula de 3 vías	\$27,425.88	\$27,425.88
36	Válvula	\$540.40	\$18,158.40
1	Costos de instalación	30% del total	\$223,566.77
Total			\$968,789.35

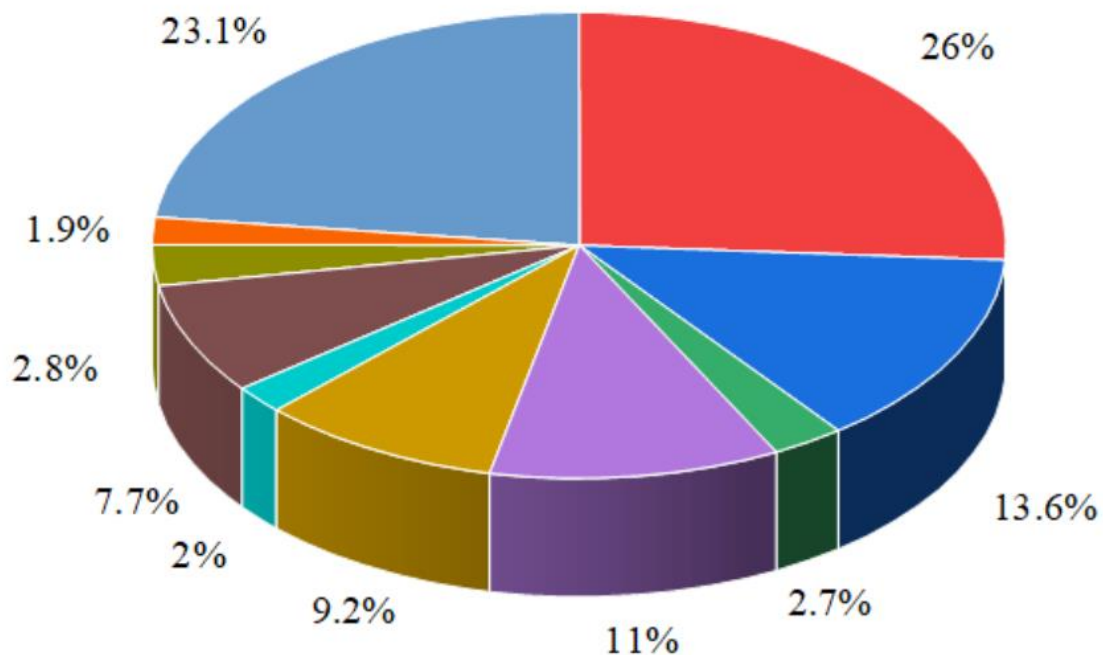
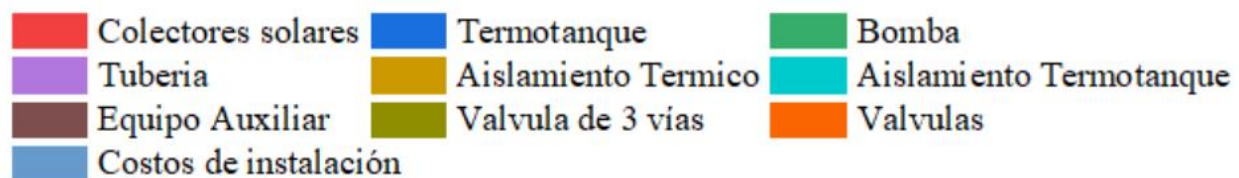


Figura 55. Distribución Porcentual del Costo de los Equipos del Sistema Solar Térmico para máquina de ATBT.

Costos de Operación y Mantenimiento

Los costos de operación del sistema se estiman a partir de la cantidad de calor adicional necesaria para cubrir el 100 % de la demanda térmica anual del equipo. En el caso de la máquina de alta temperatura (ATBT), el sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica logra satisfacer aproximadamente el 82 % de dicha demanda. Por lo tanto, el 18 % restante debe ser suministrado mediante un sistema de respaldo basado en combustible fósil (diésel). En la

Variable	Cantidad
Porcentaje de diésel usado de manera anual	18 %
Requerimiento energético anual	77519.2 kWh
Calor aportado por equipo auxiliar de calor	13953.45 kWh
Litros necesarios de diésel anualmente	1423.82 litros
Costos de operación anual	\$ 35,595.55
Costos de mantenimiento	\$37,500.00
Costos anuales	\$73,095.55

se presenta el cálculo correspondiente, así como el valor estimado de los costos de operación asociados a la configuración seleccionada para la máquina ATBT.

Adicionalmente, en la misma tabla se incluyen los costos de mantenimiento estimados para el sistema en general. Para obtener este valor, se consultó a un técnico con experiencia en la instalación de este tipo de sistemas. El costo proporcionado es aproximado, ya que puede variar en función del tipo y la frecuencia de las labores de mantenimiento requeridas a lo largo del tiempo.

Indicadores económicos

En esta sección se presentan los indicadores económicos que permiten evaluar la rentabilidad del proyecto a lo largo de un horizonte temporal determinado. Para ello, se emplean dos métricas fundamentales: el Valor Presente Neto (VPN) y el Costo Nivelado del Agua (Levelized Cost of Water, LCOH, por sus siglas en inglés). Estos indicadores permiten analizar tanto la viabilidad

financiera del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, como el costo unitario asociado a la producción de cada metro cúbico de agua durante la vida útil del sistema.

El cálculo del Valor Presente Neto (VPN) se realiza a partir de la inversión inicial y los costos anuales del sistema, considerando una vida útil de 20 años y una tasa de inflación del 8 %. Estos parámetros permiten proyectar los costos futuros y traerlos a valor presente mediante un análisis de flujos de efectivo descontados. En la **Tabla 19** se presentan los resultados del análisis económico, donde se estima que el VPN de los costos del sistema asciende aproximadamente a \$1,686,425.25 pesos.

Por otro lado, se calcula el Costo Nivelado del Agua (Levelized Cost of Water, LCOH) con el objetivo de estimar el costo unitario de producción por metro cúbico de agua. Este indicador se determina a partir de la inversión inicial y de los costos anuales de operación y mantenimiento, considerando la vida útil del sistema, la tasa de inflación y el volumen anual de agua producida. El costo nivelado del agua constituye una métrica económica útil para comparar distintas tecnologías de producción de agua en términos de competitividad y viabilidad financiera. En este estudio, se obtuvo un costo nivelado del agua de \$96.88 pesos por metro cúbico, un valor elevado en comparación con tecnologías comerciales disponibles en el mercado y con los valores reportados en la literatura científica.

Variable	Cantidad
Porcentaje de diésel usado de manera anual	18 %
Requerimiento energético anual	77519.2 kWh
Calor aportado por equipo auxiliar de calor	13953.45 kWh
Litros necesarios de diésel anualmente	1423.82 litros
Costos de operación anual	\$ 35,595.55
Costos de mantenimiento	\$37,500.00

Costos anuales	\$73,095.55
-----------------------	--------------------

Tabla 18. Costos Anuales de Operación del Sistema de Energía Solar Térmica para la máquina de ATBT.

Tabla 19. Indicadores Económicos del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de ATBT.

Variable	Cantidad
Inversión inicial	\$968,789.35
Costos anuales	\$73,095.55
Vida útil	20 años
Tasa de inflación	8 %
VPN	\$1,686,452.25 pesos
Costo nivelado del agua	\$96.88 pesos/m³ = 4.99 USD/m³

5.3 Estudio económico del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica implementado en la máquina de BTBT

Para el estudio económico basado en la configuración de la máquina con baja temperatura de operación (BTBT), se emplea el arreglo seleccionado conforme a los criterios técnicos previamente establecidos. En esta etapa, se reconoce una reducción tanto en la cantidad de colectores solares como en la capacidad de almacenamiento térmico requerida, lo cual implica, al menos en principio, una disminución en la inversión inicial del sistema.

En primera instancia, se determina el monto de inversión necesario para la implementación de dicha configuración. La **Tabla 20** presenta el desglose de costos de inversión inicial asociados a cada uno de los equipos y componentes, lo que permite identificar con claridad el peso económico relativo de cada elemento dentro del sistema. Se observa que el sistema auxiliar representa la mayor proporción de la inversión inicial, seguido por los costos de instalación. Sorprendentemente, el costo de los colectores solares se ubica por debajo de ambos, lo cual resulta atípico, dado que en la mayoría de los casos este componente suele representar uno de los mayores costos en sistemas de captación solar térmica.

En cuanto al resto de los equipos y accesorios, los precios siguen una tendencia proporcional respecto a los observados en sistemas de mayor temperatura de operación. La única excepción corresponde a las bombas, cuyo costo permanece constante, ya que su presencia y especificaciones técnicas son necesarias en ambos escenarios y, por tanto, no experimentan reducción.

Adicionalmente, en la **Figura 56** se presenta la distribución porcentual de los principales componentes que conforman la inversión inicial. En ella se destaca que los tres elementos con mayor participación son los colectores solares (22.7 %), los costos de instalación (23.1 %) y el sistema auxiliar (15.8 %). Por su parte, la disminución en el volumen del termotanque, se traduce en que su costo represente únicamente el 5.5 % del total. El resto de los componentes, agrupados, contribuyen con el 32.9 % de la inversión inicial total.

Tabla 20. Inversión Inicial del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de BTBT.

Cantidad	Equipo y Accesorios	Precio Unitario	Total
9	Colector Solar	\$ 12,000	\$108,000.00
2	Termotanque	\$13,186.80	\$26,373.60
2	Bomba	\$13,250.71	\$26,501.42
65	Tubería	\$ 710.00	\$46,150.00
65	Aislamiento térmico	\$591.72	\$38,461.80
2	Aislamiento termotanque	\$3,168.48	\$6,336.96
1	Equipo auxiliar	\$75,000.00	\$75,000.00
1	Válvula de 3 vías	\$27,425.88	\$27,425.88
23	Válvula	\$540.40	\$11,601.20
1	Costos de instalación	30% del total	\$109,755.26
Total			\$475,606.12

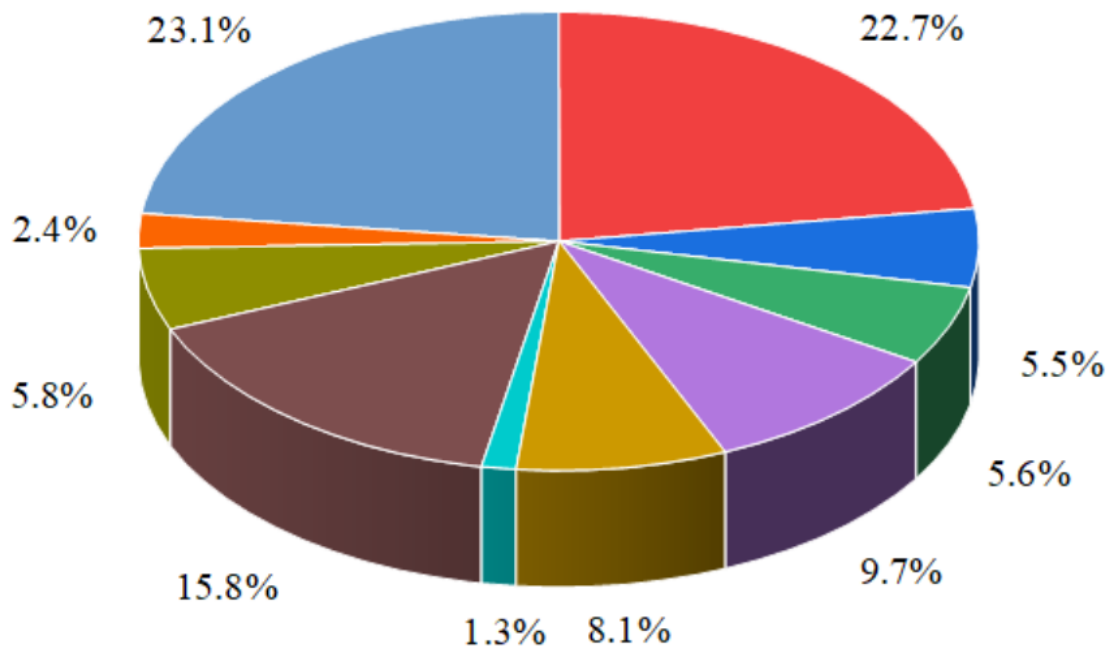
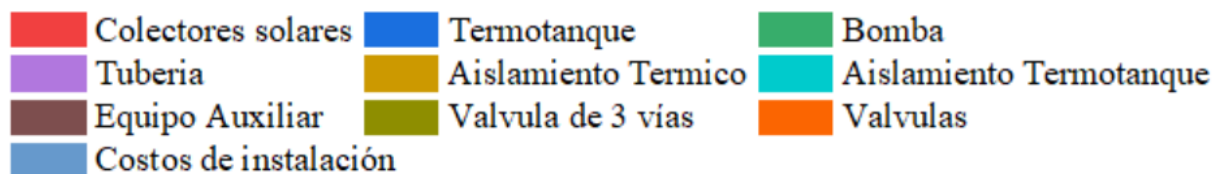


Figura 56. Distribución Porcentual del Costo de los Equipos del Sistema Solar Térmico para máquina de BTBT.

Costos de Operación y Mantenimiento

Los costos de operación del sistema se estiman a partir de la cantidad de calor adicional necesaria para cubrir el 100 % de la demanda térmica anual del equipo. En el caso de la máquina de baja temperatura de operación (BTBT), el sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica logra satisfacer aproximadamente el 86 % de dicha demanda. Por lo tanto, el 14 % restante debe ser suministrado mediante un sistema de respaldo basado en combustible fósil.

En la **Tabla 21** se presenta el cálculo correspondiente, así como el valor estimado de los costos de operación asociados a la configuración seleccionada para la máquina BTBT. Se espera que los costos operativos de esta configuración sean menores en comparación con los asociados a la máquina de alta temperatura de operación (ATBT), debido a dos factores principales: la menor demanda térmica anual del sistema BTBT y un mayor aporte relativo de energía solar térmica (4 % adicional) en comparación con la configuración ATBT.

Adicionalmente, en la misma tabla se incluyen los costos de mantenimiento estimados para el sistema. Este valor se obtuvo de manera proporcional a los costos de mantenimiento estimados para el caso de la máquina ATBT, con el objetivo de contar con un dato aproximado que permita evaluar la viabilidad económica general del sistema propuesto.

Indicadores económicos

Para evaluar la rentabilidad del proyecto, se utilizaron los mismos indicadores económicos empleados en el análisis del caso de alta temperatura (ATBT), específicamente el Valor Presente Neto y el Costo Nivelado del Agua. Estos indicadores permiten analizar la viabilidad financiera del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, y sirven como base para una comparación entre ambas configuraciones, lo cual se aborda en la siguiente sección.

En la **Tabla 22** se presentan los resultados del análisis económico correspondiente al caso de la máquina de baja temperatura (BTBT). Se estima que el VPN del sistema asciende aproximadamente a \$795,199.97 pesos, lo que representa una diferencia significativa en comparación con el sistema ATBT. Asimismo, el costo nivelado del agua se calcula en \$45.68 pesos por metro cúbico durante un periodo de 20 años. Este valor resulta considerablemente menor al obtenido en el caso de ATBT, lo cual evidencia una mejora notable en términos de eficiencia económica. Aunque el costo nivelado del agua de la configuración BTBT se encuentra ligeramente por encima de algunos valores reportados en la literatura científica y en equipos disponibles en el mercado, se mantiene dentro de un rango competitivo, fortaleciendo así la viabilidad comercial y técnica del sistema propuesto.

Tabla 21. Costos Anuales de Operación del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmica para la máquina de BTBT.

Variable	Cantidad
Porcentaje de diésel usado de manera anual	14 %
Requerimiento energético anual	46143.75 kWh
Calor aportado por equipo auxiliar de calor	6460.125 kWh
Litros necesarios de diésel anualmente	659.19 litros
Costos de operación anual	\$ 16,479.91
Costos de mantenimiento	\$16,071.43
Costos anuales	\$32,551.34

Tabla 22. Indicadores Económicos del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmica para máquina de BTBT.

Variable	Cantidad
Inversión inicial	\$475,606.12
Costos anuales	\$32,551.34
Vida útil	20 años
Tasa de inflación	8 %
VPN	\$795,199. 97 pesos
Costo nivelado del agua	\$45,68 pesos/m³ = 2.35 USD/m³

5.4 Desempeño económico de sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica para la máquina de ATBT y BTBT.

Para finalizar el estudio económico, se realiza una comparación entre ambos sistemas (ATBT y BTBT), con el objetivo de identificar no solo las diferencias en los costos asociados a cada configuración, sino también evidenciar las mejoras obtenidas al implementar la máquina de baja temperatura (BTBT). Esta comparación permite valorar tanto la viabilidad técnica como el desempeño económico del sistema.

Aunque ambas configuraciones emplean la misma tecnología de captación solar, las diferencias en la demanda térmica de cada unidad de producción de agua obligan a modificar la cantidad de colectores y el volumen del almacenamiento térmico. Estas diferencias tienen un impacto directo en la inversión y en los indicadores económicos asociado al sistema de energía solar.

En la **Tabla 23** se resumen los parámetros considerados en el análisis económico de ambas configuraciones. Los resultados muestran que, en el caso del sistema BTBT, la inversión inicial se reduce en un 50.9 %, lo que mejora notablemente la viabilidad del proyecto. Asimismo, los costos de operación anual disminuyen significativamente, con una reducción del 55.46 %. Esta disminución está directamente relacionada con la menor demanda de calor que requiere la máquina BTBT, así como con el aprovechamiento de un rango de temperatura más amplio dentro del sistema.

El mayor porcentaje de disminución se observa en los costos de mantenimiento, que presentan una reducción del 57.14 %. En cuanto a los indicadores económicos, el Valor Presente Neto (VPN) del caso BTBT muestra una disminución del 52.84 % en comparación con el sistema ATBT. De forma similar, el Costo Nivelado del Agua (LCOH) también se reduce en un 52.84 %. Cabe destacar que ambos indicadores fueron calculados bajo los mismos supuestos y parámetros, lo que garantiza una comparación adecuada y justa entre ambas configuraciones. En este sentido, la tecnología de producción de agua con menor temperatura de activación y menor requerimiento térmico permite reducir tanto el área de captación como el volumen del tanque, resultando en un menor costo por metro cúbico de agua producido desde el punto de vista solar.

En promedio, los resultados indican que el sistema BTBT presenta una reducción del 53.81 % en los costos totales con respecto al sistema ATBT. Esta disminución significativa pone de manifiesto que, además de los beneficios en términos de eficiencia operativa, el sistema BTBT ofrece ventajas sustanciales desde una perspectiva económica.

Estos resultados refuerzan la pertinencia de optar por una máquina de desalinización operada al alto vacío y baja temperatura, acoplada a un sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, ya que permite producir tanto agua como enfriamiento con una mayor eficiencia y a un costo considerablemente menor. Por lo tanto, el sistema BTBT se perfila como una alternativa tecnológicamente viable y económicamente atractiva.

Dentro del Anexo B se incluyen sistemas de captación y almacenamiento que, si bien no cumplen en su totalidad con los criterios de selección establecidos, fueron evaluados con el propósito de analizar su desempeño económico y explorar su viabilidad. Estos estudios permiten identificar posibles configuraciones alternativas y comprender mejor las implicaciones económicas asociadas a diferentes arreglos del sistema.

Tabla 23. Comparación de Parámetros Económicos para Sistemas de Alta y Baja TBT.

	ATBT	BTBT	Δ%
Inversión inicial	\$ 968,789.35	\$ 475,606.12	50.90 %
Costos de operación	\$ 35,595.55	\$ 16,479.91	53.70 %
Costos de mantenimiento	\$ 37,500.00	\$ 16,071.43	57.14 %
Valor presente neto	\$ 1,686,452.25	\$ 795,199.97	52.84%
Costo nivelado del agua	\$ 96.88 pesos/m ³	\$ 45.68 pesos/m ³	52.84%

Capítulo 6

6 Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas del análisis del sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica, aplicado a dos máquinas destinadas a la producción de agua y enfriamiento. La principal diferencia entre ambas radica en que una de ellas requiere una menor cantidad de energía térmica para su activación. Por tanto, en esta sección se exponen los resultados y reflexiones obtenidas a partir de este estudio exhaustivo.

6.1 Conclusión

Una vez estudiados y analizados los sistemas de captación y almacenamiento de energía solar térmica destinados a activar máquinas productoras de agua y enfriamiento, buscando la mayor viabilidad tecno-económica, se identificó un alto potencial en el uso de la máquina que opera a alto vacío y con baja temperatura (BTBT).

El sistema solar térmico implementado en esta configuración presenta mejoras sustanciales respecto a la máquina convencional que opera con alta temperatura (ATBT). La comparación entre ambas alternativas permite visualizar con claridad el impacto relativo en su desempeño. Los resultados obtenidos demuestran que la configuración BTBT constituye la opción más favorable, destacándose en la mayoría de los indicadores evaluados. Este mejor rendimiento se atribuye principalmente a su mayor eficiencia energética, al lograr una producción de agua mayor, siendo que se utiliza una menor cantidad de energía que la obtenida con la configuración ATBT, pero con un requerimiento térmico significativamente menor. Esto posiciona a la alternativa BTBT como una solución más eficiente, viable y adaptable para su implementación.

Estas mejoras repercuten directamente en el diseño del sistema solar térmico. La configuración BTBT requiere un 57.14 % menos de área de captación solar, lo cual representa una disminución considerable en la inversión inicial asociada a la adquisición e instalación de colectores solares.

Asimismo, el volumen del termotanque necesario se reduce en un 80 %, generando un impacto positivo en los costos del sistema de almacenamiento térmico.

Adicionalmente, al disminuir la superficie de captación, también se reduce de manera proporcional el flujo necesario en los colectores solares (57.14 %), lo que contribuye a una disminución directa del consumo energético del sistema de bombeo. Esta reducción mejora la eficiencia operativa global del sistema y reduce los costos de operación.

Por otro lado, la disminución del volumen del termotanque permite alcanzar la temperatura objetivo sin extracción de calor en un menor tiempo: se estima una reducción cercana al 70 % en el tiempo de calentamiento, tanto en condiciones estivales como invernales. Esto favorece una puesta en marcha más rápida y eficiente del sistema, consolidando así las ventajas de la configuración BTBT frente a su contraparte convencional.

Durante un año completo de simulación, el sistema BTBT logró cubrir hasta el 88 % de la demanda térmica total para la producción de agua y enfriamiento, requiriendo únicamente un 12 % de aporte adicional mediante una fuente de calor auxiliar. Este resultado evidencia una alta autosuficiencia térmica. Este comportamiento se explica, en parte, por el incremento en el rango operativo de temperaturas de la máquina. Mientras que el sistema convencional trabaja entre 75 °C y 95 °C, la configuración BTBT amplía dicho rango desde los 35 °C hasta los 95 °C, lo cual representa un aumento del 55 %. Esta ampliación en el rango operativo permite una reducción sustancial en los requerimientos del sistema de captación y almacenamiento, haciendo más factible la implementación de sistemas solares de baja temperatura.

Cabe mencionar que, si bien la configuración seleccionada en esta tesis corresponde a una de las que aporta menor volumen de agua y enfriamiento en términos anuales, se identificaron otros arreglos de colectores solares y volúmenes de termotanque capaces de cubrir hasta el 96 % de la demanda energética anual. Esto se traduce en una producción equivalente del 96 % del agua y enfriamiento requeridos, manteniéndose todavía por debajo de los requerimientos térmicos de la máquina convencional. Este hallazgo demuestra que la configuración BTBT no solo es viable, sino que además posee un amplio margen de mejora.

Para alcanzar dicha cobertura del 96 %, bastaría con incrementar en un 10 % el área de captación solar y en un 77 % el volumen del termotanque. Aunque este último aumento implica una mayor inversión en almacenamiento térmico, los beneficios en términos de reducción de costos operativos, pueden justificar plenamente dicha inversión.

El estudio económico refuerza aún más la notable diferencia entre la configuración de la máquina de baja temperatura (BTBT) en comparación con la máquina convencional (ATBT). Los resultados evidencian una ventaja económica significativa para el sistema BTBT, con un promedio de ahorro del 53.81 % en los distintos parámetros analizados. Tal como se indicó en el apartado técnico, se exploraron alternativas adicionales para ambas configuraciones, las cuales también fueron evaluadas desde una perspectiva económica. Estas alternativas demostraron un mayor potencial, al presentar fracciones solares superiores, lo que se traduce en un mejor desempeño en términos de eficiencia energética, así como en una posible reducción adicional de los costos asociados al sistema.

En resumen, la máquina BTBT demuestra un alto potencial al ser capaz de operar con sistemas de captación y almacenamiento solar térmico de baja calidad térmica. Gracias a que estos sistemas pueden diseñarse con arreglos relativamente compactos, se abre la posibilidad de su implementación en zonas donde el acceso a recursos energéticos convencionales es limitado. Esta característica no solo reduce significativamente los costos de instalación y operación, sino que también posiciona a los sistemas solares térmicos como una alternativa cada vez más atractiva y sostenible para la producción de agua y enfriamiento en entornos aislados o con infraestructura restringida.

6.2 Trabajos Futuros

Con base a los estudios generados en esta tesis se recomienda:

- Investigar el comportamiento del intercambiador de calor, con énfasis en su operación continua. Se busca evaluar su eficiencia térmica bajo distintas condiciones de carga y temperatura, así como su impacto en la estabilidad y el rendimiento global del sistema.
- Implementar fuentes de calor auxiliar, como el biogás u otras fuentes disponibles localmente, para cubrir el déficit térmico en momentos de baja irradiación solar. Esta integración permitiría evaluar esquemas híbridos que aseguren la operación continua del sistema durante todo el año.
- Estudiar la viabilidad técnica del uso de colectores solares de menor eficiencia, pero menor costo, con el objetivo de comparar su desempeño y rentabilidad frente a colectores de alta eficiencia. Este análisis permitirá determinar si la reducción en inversión inicial compensa las posibles pérdidas energéticas, favoreciendo su adopción en contextos de bajo presupuesto.
- Explorar la viabilidad técnica de colectores solares híbridos (PV/T), que permitan la producción simultánea de energía térmica y eléctrica. Esta alternativa podría cubrir no solo las necesidades térmicas del sistema, sino también el consumo eléctrico asociado, reduciendo aún más la dependencia de fuentes externas y mejorando la autosuficiencia del conjunto.

7 Referencias

- Abu-Arabi, M., Al-Harashsheh, M., Ahmad, M., & Mousa, H. (2020). Theoretical modeling of a glass-cooled solar still incorporating PCM and coupled to flat plate solar collector. *Journal Of Energy Storage*, 29, 101372. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101372>
- Abubakkar, A., Selvakumar, P., Rajagopal, T., & Tamilvanan, A. (2020). Development of concentrating dish and solar still assembly for sea water desalination. *Materials Today Proceedings*, 45, 974-980. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.043>
- Adalberto, T. M., & Gabriel, G. A. (2015). *Prontuario solar de México*. <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/40076>
- Agua: Panorama general. (s. f.). World Bank. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>
- Aguilar-Jiménez, J., Velázquez, N., Acuña, A., Cota, R., González, E., González, L., López, R., & Islas, S. (2018). Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids. *Solar Energy*, 174, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.078>
- Aguilar-Jiménez, J., Velázquez-Limón, N., López-Zavala, R., González-Urbe, L., Islas, S., González, E., Ramírez, L., & Beltrán, R. (2019). Optimum operational strategies for a solar absorption cooling system in an isolated school of Mexico. *International Journal Of Refrigeration*, 112, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.12.010>
- Al-Hrari, M., Ceylan, İ., Nakoa, K., & Ergün, A. (2020). Concentrated photovoltaic and thermal system application for fresh water production. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115054. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115054>
- Alsehli, M., Essa, F. A., Omara, Z., Othman, M. M., Elsheikh, A. H., Alwetaishi, M., Alghamdi, S., & Saleh, B. (2022). Improving the performance of a hybrid solar desalination system under various operating conditions. *Process Safety And Environmental Protection*, 162, 706-720. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.044>
- Anand, B., & Murugavelh, S. (2019). A hybrid system for power, desalination, and cooling using concentrated photovoltaic/thermal collector. *Energy Sources Part A Recovery Utilization And Environmental Effects*, 44(1), 1416-1436. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1644395>

Anand, B., Shankar, R., Murugavelh, S., Rivera, W., Prasad, K. M., & Nagarajan, R. (2021). A review on solar photovoltaic thermal integrated desalination technologies. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 141, 110787. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110787>

Arun, C., & Sreekumar, P. (2018). Modeling and performance evaluation of parabolic trough solar collector desalination system. *Materials Today Proceedings*, 5(1), 780-788. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.147>

Bahrami, M., Avargani, V. M., & Bonyadi, M. (2019). Comprehensive experimental and theoretical study of a novel still coupled to a solar dish concentrator. *Applied Thermal Engineering*, 151, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.103>

Balachandran, G. B., David, P. W., Vijayakumar, A. B. P., Kabeel, A. E., Athikesavan, M. M., & Sathyamurthy, R. (2019). Enhancement of PV/T-integrated single slope solar desalination still productivity using water film cooling and hybrid composite insulation. *Environmental Science And Pollution Research*, 27(26), 32179-32190. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06131-9>

Bamasag, A., Alqahtani, T., Sinha, S., Ghaffour, N., & Phelan, P. (2020). Experimental investigation of a solar-heated direct contact membrane distillation system using evacuated tube collectors. *Desalination*, 487, 114497. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114497>

Ceupe. (2023, 4 noviembre). ¿Qué es el Costo de producción? Elementos, tipos y ejemplo. <https://www.ceupe.com/blog/costo-de-produccion.html>

Chen, Y., Ji, X., Lv, G., Jia, Y., Yang, B., & Han, J. (2023). Study on compound parabolic concentrating vaporized desalination system with preheating and heat recovery. *Energy*, 276, 127619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127619>

Communications. (2024, 26 agosto). Inversión inicial de una empresa: cómo gestionarla. BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/innovacion/inversion-inicial-de-una-empresa-como-gestionarla/>

De La ONUde La Década Del / Carlos Mario Gómez De, J. M., De La ONUde La Década Del / Carlos Mario Gómez De, J. M., & De La ONUde La Década Del / Carlos Mario Gómez De, J. M. (2014, January 24). El acceso al agua y la energía, condición básica para superar la pobreza. El País. https://elpais.com/elpais/2014/01/13/planeta_futuro/1389606854_541241.html

Deepak, G., Aggarwal, K., Dineshbabu, N., Sowndharya, R., Manimaran, B., & Sagar, B. J. K. (2024). Thermodynamic analysis of a novel concentrated solar power plant with integrated thermal

energy storage. Thermal Science And Engineering Progress, 103055. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103055>

Del Agua, C. N. (s. f.). Llama Conagua a fortalecer un uso responsable del agua para enfrentar la sequía que afecta al país. gob.mx. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/llama-conagua-a-fortalecer-un-uso-responsable-del-agua-para-enfrentar-la-sequia-que-afecta-al-pais?idiom=es>

Ferreiro, H. (1991). Manual de arquitectura solar.

Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2009). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1— Concepts, materials and modellization. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 14(1), 31-55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>

Hernández, A. L., & Quiñonez, J. E. (2017). Experimental validation of an analytical model for performance estimation of natural convection solar air heating collectors. Renewable Energy, 117, 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.082>

Hu, J., & Zhang, G. (2019). Performance improvement of solar air collector based on airflow reorganization: A review. Applied Thermal Engineering, 155, 592-611. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.021>

Islam, M. T., Huda, N., Abdullah, A., & Saidur, R. (2018). A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 91, 987-1018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>

Jha, P., Das, B., Gupta, R., Mondol, J., & Ehyaei, M. (2023). Review of recent research on photovoltaic thermal solar collectors. Solar Energy, 257, 164-195. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.004>

Johnson, A., Mu, L., Park, Y. H., Valles, D. J., Wang, H., Xu, P., Kota, K., & Kuravi, S. (2019). A Thermal Model for Predicting the Performance of a Solar Still with Fresnel Lens. Water, 11(9), 1860. <https://doi.org/10.3390/w11091860>

Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress In Energy And Combustion Science, 30(3), 231-295. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>

Key World Energy Statistics 2021. (2021). En Key world energy statistics . . .
<https://doi.org/10.1787/2ef8cebc-en>

Khanmohammadi, S., Chaghakaboodi, H. A., & Musharavati, F. (2021). A new design of solar tower system amplified with a thermoelectric unit to produce distilled water and power. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117406. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117406>

Li, G., & Lu, L. (2019). Modeling and performance analysis of a fully solar-powered stand-alone sweeping gas membrane distillation desalination system for island and coastal households. *Energy Conversion And Management*, 205, 112375. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112375>

López-Zavala, R., Velázquez, N., González-Uribe, L., Quezada-Espinoza, K., Aguilar-Jiménez, J., Islas, S., Nakasima-López, M., & González, E. (2019). Absorption cooling and desalination system with a novel internal energetic and mass integration that increases capacity and efficiency. *Desalination*, 471, 114144. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114144>

López-Zavala, R., Velázquez-Limón, N., González-Uribe, L., Aguilar-Jiménez, J., Alvarez-Mancilla, J., Acuña, A., & Islas, S. (2019). A novel LiBr/H₂O absorption cooling and desalination system with three pressure levels. *International Journal Of Refrigeration*, 99, 469-478. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.01.003>

López-Zavala, R., Velázquez-Limón, N., Ojeda-Benítez, S., Nakasima-López, M., Lara, F., Aguilar-Jiménez, J., Santillán-Soto, N., & Islas, S. (2023). Novel desalination system that uses product water to generate cooling through a barometric ejector-condenser. *Energy*, 276, 127536. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127536>

Ma, Q., Ahmadi, A., & Cabassud, C. (2018). Direct integration of a vacuum membrane distillation module within a solar collector for small-scale units adapted to seawater desalination in remote places: Design, modeling & evaluation of a flat-plate equipment. *Journal Of Membrane Science*, 564, 617-633. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.07.067>

Madhuri, R., Said, Z., Ihsanullah, I., & Sathyamurthy, R. (2025). Solar energy-driven desalination: A renewable solution for climate change mitigation and advancing sustainable development goals. *Desalination*, 602, 118575. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.118575>

Mishra, A. K., Meraj, M., Tiwari, G. N., Ahmad, A., & Khan, M. Z. (2021). Parametric studies of PVT-CPC active conical solar still. *Materials Today Proceedings*, 46, 6660-6664. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.115>

Nedaei, N., Azizi, S., & Farshi, L. G. (2022). Performance assessment and multi-objective optimization of a multi-generation system based on solar tower power: A case study in Dubai, UAE. *Process Safety And Environmental Protection*, 161, 295-315. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.022>

Qadourah, J. A. (2022). Energy and economic potential for photovoltaic systems installed on the rooftop of apartment buildings in Jordan. *Results In Engineering*, 16, 100642. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100642>

Rabie, M., Salem, M. S., Ali, A. Y., El-Shazly, A., Elkady, M., & Ookawara, S. (2020). Modeling of an integrated air gap membrane distillation unit utilizing a flat plate solar collector. *Energy Reports*, 6, 1591-1596. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.10.046>

Sabiha, M., Saidur, R., Mekhilef, S., & Mahian, O. (2015). Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 51, 1038-1054. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.016>

Saneamiento: Panorama general. (s. f.). World Bank. <https://www.bancomundial.org/es/topic/sanitation>

Shabgard, H., Parthasarathy, R., & Xu, B. (2019). Energy and exergy analysis of a novel multiple-effect vapor chamber distillation system for high-salinity wastewater treatment. *Desalination And Water Treatment*, 171, 1-17. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.25017>

Shoeibi, S., Kargarsharifabad, H., Rahbar, N., Khosravi, G., & Sharifpur, M. (2021). An integrated solar desalination with evacuated tube heat pipe solar collector and new wind ventilator external condenser. *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 50, 101857. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101857>

Siddiqui, O., & Dincer, I. (2018). Examination of a new solar-based integrated system for desalination, electricity generation and hydrogen production. *Solar Energy*, 163, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.077>

Staff, I. (2025, 22 marzo). Situación del agua en México. IMCO. <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>

Tian, Y., & Zhao, C. (2012). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538-553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>

Xiao, J., Zheng, H., Jin, R., Liang, S., Wang, G., & Ma, X. (2021). Experimental investigation of a bubbling humidification-dehumidification desalination system directly heated by cylindrical Fresnel lens solar concentrator. *Solar Energy*, 220, 873-881.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.006>

Xinxin, G., Heng, Z., Haiping, C., Kai, L., Jiguang, H., & Haowen, L. (2019). Experimental and theoretical investigation on a hybrid LCPV/T solar still system. *Desalination*, 468, 114063.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.07.003>

Zhang, Z., Hu, Z., Xu, H., Dai, X., Wang, J., Jiao, W., Yuan, Y., & Phelan, P. (2019). Theoretical analysis of a solar-powered multi-effect distillation integrated with concentrating photovoltaic/thermal system. *Desalination*, 468, 114074.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114074>

Anexo A

Costos de equipo necesario para sistema de energía solar térmica



Suntask® HIGH-QUALITY SOLAR HOT WATER

ZHEJIANG SHENTAI SOLAR ENERGY CO.,LTD.
E-mail: usa@suntask.com

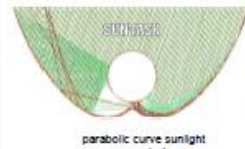
SOLAR COLLECTOR

Fast assembly CPC Heat pipe collector

SHC

1. Production Summary
Overheating solution, higher power output suitable less installation area, industry heating applicable.

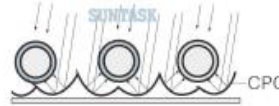
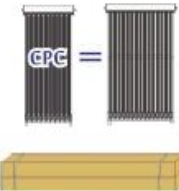
2. Technology Core


SHC Fast assembly CPC Heat pipe collector

- sunlight concentrators make the efficiency doubly increased.
- Fast assembly CPC concentrators more easy installation and transportation.
- 360° sunlight absorber, hot water in cloudy
- Overheating protection just disassembly the CPC concentrators in summer
- Temperature startup more faster than the normal solar thermal co
- Applicable for the industry heating
- More thermal production based on the same aperture
- EN12976/Solar Keymark

CPC reflector
Maximum performance at minimum bigger than gross surface area. Three dimensionally 360 shaped absorbers for the greatest possible energy collect surface, utilized up to most of the diffuse and direct red from morning to evening.

● The power output higher 60% compare to the normal solar collectors. Smaller installation area but equal to the same power output.

● Patented fast assembly CPC, Roll sheet, more convenient for the installation and transportation

3. Professional production








4. Collector models:

No.	Model	L*W*H mm	Heat Pipe Vacuum Tube mm/pcs	Power Output	Efficiency rate	CPC	Header mm	Frame	Insulation	PCB SHANKING		Container loading 30W/40W	Net/gross weight(kg)
										UCL (USD)	Container (USD)		
1	SHC8	1917*910*133	68*1800mm*8	839w	0.868	●	φ56/1.0	AL alloy	glasswool	\$146.00	\$138.00	186/146	27
2	SHC10	1917*1130*133	68*1800mm*10	1188w		●	φ56/1.0	AL alloy	glasswool	\$177.00	\$169.00	169/166	33
3	SHC12	1917*1350*133	68*1800mm*12	1440w		●	φ56/1.0	AL alloy	glasswool	\$208.00	\$199.00	149/166	40
4	SHC15	1917*1680*133	68*1800mm*16	1816w		●	φ56/1.0	AL alloy	glasswool	\$267.00	\$246.00	120/290	49
5	SHC18	1917*2010*133	68*1800mm*18	2191w		●	φ56/1.0	AL alloy	glasswool	\$308.00	\$282.00	100/242	69
6	SHC20	1917*2230*133	68*1800mm*20	2440w		●	φ56/1.0	AL alloy	glasswool	\$340.00	\$324.00	87/210	86
7	SHC22	1917*2450*133	68*1800mm*22	2680w		●	φ56/1.0	AL alloy	glasswool	\$388.00	\$363.00	88/202	72
8	SHC24	1917*2670*133	68*1800mm*24	2945w		●	φ56/1.0	AL alloy	glasswool	\$408.00	\$388.00	77/188	78

*above price for slope roof system / flat roof frame need extra charge. * ● Yes — No

heat pipe solar collector with CPC Mirror model	SHC-8	SHC-10	SHC-12	SHC-15	SHC-18	SHC-20	SHC-24
No. of tubes	8	10	12	15	18	20	24
Aperture area (M ²)	1.41	1.78	2.16	2.72	3.28	3.66	4.41
Solar keymark Maximum power output per collector module (G=1000W/m ²)	939w	1189w	1440w	1815w	2191w	2442w	2943w
Gross length (mm)	1917	1917	1917	1917	1917	1917	1917
Gross width (mm)	910	1130	1350	1680	2010	2230	2670
Gross height (mm)	133	133	133	133	133	133	133
Gross area (M ²)	1.74	2.17	2.59	3.22	3.82	4.28	5.12
Efficiency (n ^o)	0.668						
Stagnation temperature	276°C						
Maximum operation pressure	1MPa						
Mass flow	0.02kg/(sm2)						
heat loss	< 0.8 W/m2c						
Material of the cover tube	High borosilicate glass 3.3						
tube dimension and thickness	58mm*1800mm with 1.6mm thickness						
Distance between two tubes	110mm						
Solar absorptance	≥93%						
Hemispherical emittance	≤5%						
Material of header pipe	Copper						
Outer diameter of the header pipe	35mm						
Construction of the absorber	Evacuated tube and heating pipe connected by Aluminium alloy						
Material of the fin an thickness	Aluminium with 0.24mm thickness						
Conduction oil	HT350						
Insulation material and thickness	glass fabric with 30mm						
Casing material	Anodized aluminum alloy						
Sealing material	Silicon seal						
Reflectors Material	Aluminum sheet						
Reflectivity	0.9						
Surface treatment	polished						
Max. operation temperature	120°C						
Heat transfer medium	Water /antifreeze						

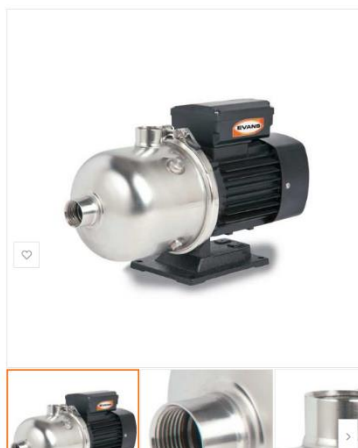
Inicio » Bomba acero inox. 45GPM 3Hp


 Te asesoramos en el
 800 00 EVANS
 Horario de Atención de
 9:30am a 5pm


 Chat en vivo para
 dudas y asesoría


 Solicita cotización


 Envío gratuito



Bomba acero inox. 45GPM 3Hp

Descripción: Bomba multietapas monofásica, 45GPM, motor 3Hp y descarga 1 1/2" NPT.

Modelo: SS45424E300

Características especiales: Eficiente y Silenciosa

Marca: EVANS

\$13,250.71

Cant.

[AÑADIR](#)

[COMPRAR](#)

✓ **En existencia** [AGREGAR PARA COMPARAR](#)

Sea el primero en dejar una reseña para este artículo

COMPARAR ARTÍCULOS

No tiene artículos para comparar.



Envíos a Todo México
 Envío gratis en pedidos
 mayores a \$15,000
 Aplican restricciones

Buscar productos

[INICIAR SESIÓN / REGISTRARSE](#)

[\\$0.00](#)

CATEGORÍAS

[ALUMINIO](#)
[ARAÑAS](#)
[BARANDALES](#)
[CANCELES DE BAÑO](#)
[GENERAL](#)
[HERRAMIENTAS](#)
[JALADERAS Y CHAPAS](#)
[LINEA NEGRO](#)
[LINEA ORO](#)
[REPISAS](#)
[SELLADORES Y SILICONES](#)
[SISTEMAS](#)



-25%

HOME » TIENDA » TUBO REDONDO 1-1/2" ACERO INOXIDABLE

< >

TUBO REDONDO 1-1/2" ACERO INOXIDABLE

~~\$950.00~~ **\$710.00**

- 1 +

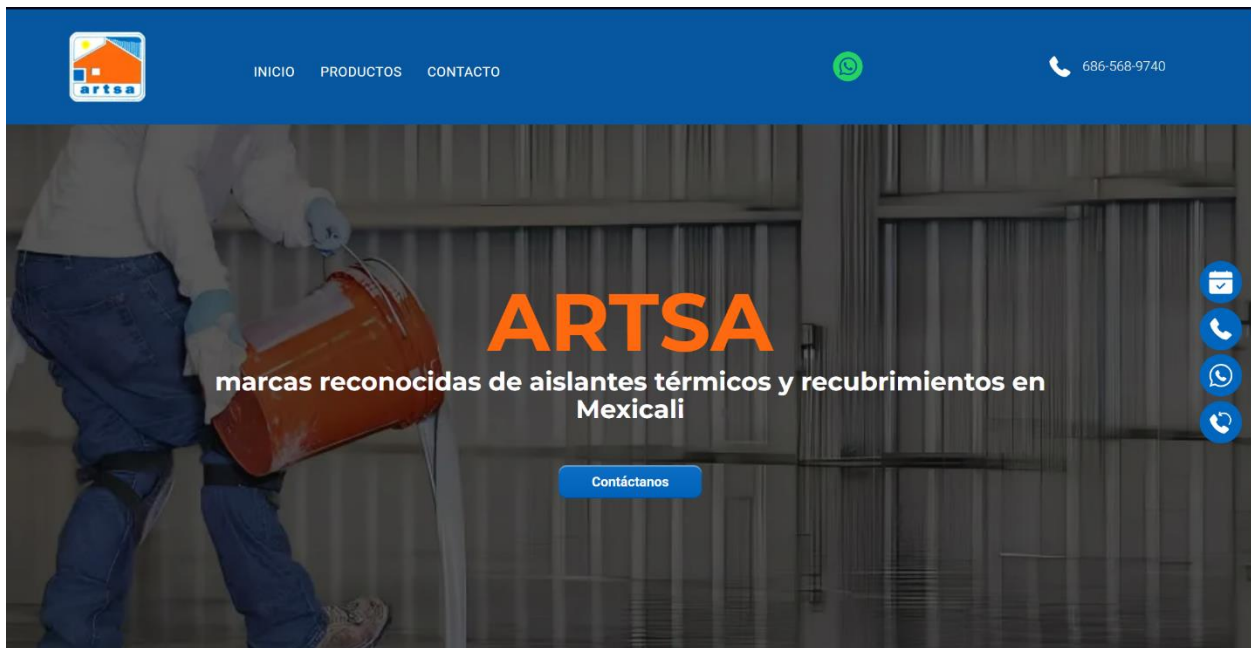
[AÑADIR AL CARRITO](#)

SKU: TUBREDI-1/2

Categoría: TUBOS

Compartir: [f](#) [t](#) [p](#) [w](#)





Calentador de Agua Tipo Vertical Pirotubular Modelo CR-ECO



descripción

Numero de Pasos: 2 y 3 pasos (retorno de gases calientes)
 Tipo: Vertical DRY BACK
 Servicio: Agua Caliente
 Capacidades: Desde 2 cc hasta 125 cc (6760,000 kcal/hr)
 Potencia Térmica a La Salida: Desde 16,900 kcal/hr hasta 1056,250 kcal/hr)
 Funcionamiento: Estándar, automático hasta PLC
 Combustibles: Gas Lp., Gas natural, Biogás, Diesel y Dual

características



Bajo costo de mantenimiento

Operación automática



CEMATIC

Válvula de Bola 3 Vías Bridada con Actuador Eléctrico

• EN EXISTENCIA

- 1 +

Solicitar Cotización

• Disponible para recoger en CEMATIC MX
Normalmente está listo en 24 horas
[Visualizar información de la tienda](#)

Hola!
¿Cómo podemos ayudarte?



Anexo B

Inversión Inicial del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de ATBT, caso 3 colectores en serie, 7 paralelos y 13 metros cúbicos de termotanque.

Cantidad	Equipo y Accesorios	Precio Unitario	Total
21	Colector Solar	\$ 12,000	\$252,000.00
13	Termotanque	\$13,186.80	\$171,428.40
2	Bomba	\$13,250.71	\$26,517.86
162	Tubería	\$ 710.00	\$115,020.00
162	Aislamiento térmico	\$591.72	\$95,858.64
9	Aislamiento termotanque	\$3,168.48	\$28,516.32
1	Equipo auxiliar	\$75,000.00	\$75,000.00
1	Válvula de 3 vías	\$27,425.88	\$3,700.00
36	Válvula	\$540.40	\$18,158.40
1	Costos de instalación	30% del total	\$235,859.89
Total			\$1,022,059.51

Variable	Cantidad
Porcentaje de diésel usado de manera anual	17 %
Requerimiento energético anual	77519.20 kWh
Calor aportado por equipo auxiliar de calor	13178.26 kWh
Litros necesarios de diésel anualmente	1344.72 litros
Costos de operación anual	\$ 33,618.02
Costos de mantenimiento	\$37,500.00
Costos anuales	\$71,118.02

Variable	Cantidad
Inversión inicial	\$1,022,059.51
Costos anuales	\$71,118.02
Vida útil	20 años
Tasa de inflación	8 %
VPN	\$1,720,306.71 pesos
Costo nivelado del agua	\$98.93 pesos/m³ = 5.09 USD/m³

Inversión Inicial del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de ATBT, caso 2 colectores en serie, 5 paralelos y 7 metros cúbicos de termotanque.

Cantidad	Equipo y Accesorios	Precio Unitario	Total
10	Colector Solar	\$ 12,000	\$120,000.00
7	Termotanque	\$13,186.80	\$92,307.60
2	Bomba	\$13,250.71	\$26,501.42
72	Tubería	\$ 710.00	\$51,120.00
72	Aislamiento térmico	\$591.72	\$42,603.84
5	Aislamiento termotanque	\$3,168.48	\$15,842.40
1	Equipo auxiliar	\$75,000.00	\$75,000.00
1	Válvula de 3 vías	\$27,425.88	\$27,425.88
30	Válvula	\$540.40	\$15,132.00
1	Costos de instalación	30% del total	\$139,779.94
Total			\$605,713.08

Variable	Cantidad
Porcentaje de diésel usado de manera anual	5.21 %
Requerimiento energético anual	46143.75 kWh
Calor aportado por equipo auxiliar de calor	2404.08 kWh
Litros necesarios de diésel anualmente	245.31 litros
Costos de operación anual	\$ 6,132.88
Costos de mantenimiento	\$17,857.14
Costos anuales	\$23,990.02

Variable	Cantidad
Inversión inicial	\$605,713.08
Costos anuales	\$23,990.02
Vida útil	20 años
Tasa de inflación	8 %
VPN	\$841,250.67 pesos
Costo nivelado del agua	\$48.3 pesos/m³ = 2.49 USD/m³

Inversión Inicial del Sistema de Captación y Almacenamiento Solar Térmico para Máquina de ATBT, caso 2 colectores en serie, 5 paralelos y 9 metros cúbicos de termotanque.

Cantidad	Equipo y Accesorios	Precio Unitario	Total
10	Colector Solar	\$ 12,000	\$120,000.00
9	Termotanque	\$13,186.80	\$118,681.20
2	Bomba	\$13,250.71	\$26,501.42
80	Tubería	\$ 710.00	\$56,800.00
80	Aislamiento térmico	\$591.72	\$47,337.60
6	Aislamiento termotanque	\$3,168.48	\$19,010.88
1	Equipo auxiliar	\$75,000.00	\$75,000.00
1	Válvula de 3 vías	\$27,425.88	\$27,425.88
30	Válvula	\$540.40	\$15,132.00
1	Costos de instalación	30% del total	\$151,766.69
Total			\$657,655.67

Variable	Cantidad
Porcentaje de diésel usado de manera anual	4.00 %
Requerimiento energético anual	46143.75 kWh
Calor aportado por equipo auxiliar de calor	1845.75 kWh
Litros necesarios de diésel anualmente	188.34 litros
Costos de operación anual	\$ 4,708.55
Costos de mantenimiento	\$17,857.14
Costos anuales	\$22,565.69

Variable	Cantidad
Inversión inicial	\$657,655.67
Costos anuales	\$22,565.69
Vida útil	20 años
Tasa de inflación	8 %
VPN	\$879,208.93 pesos
Costo nivelado del agua	\$50.51 pesos/m³ = 2.60 USD/m³