

Evaluación de la prefactibilidad técnico-económica de la introducción de sistemas solares térmicos en condiciones climáticas colombianas mediante simulación en software TRNSYS.

Casos de estudio: sector residencial, agroindustrial e industrial

Nelcy Daniela Socha Rojas

Tesis para Optar al Título de Magíster en Ingeniería Química

Director

Viatcheslav V. Kafarov

Doctor en Ciencias Técnicas

Codirector

Brayan Eduardo Tarazona Romero

Doctor en eficiencia energética y sostenibilidad en ingeniería y arquitectura

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en ingeniería Química.

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado, en primer lugar, a Dios, fuente de toda sabiduría, entendimiento y fortaleza. Gracias a Él pude avanzar sin rendirme y comprender, a lo largo de este camino, que aun en las caídas siempre hay una oportunidad para levantarse, y que los tiempos no son los míos, sino los suyos, porque su voluntad es buena, agradable y perfecta.

Dedico también este logro a mis padres, Nelson Socha y Luz Rojas, mis pilares incondicionales. Sin su amor, apoyo y guía constante, nada de esto habría sido posible. Gracias por estar siempre a mi lado y por recordarme, incluso en mis momentos de duda, que puedo confiar en mí misma porque ustedes siempre han confiado en mí. A mis hermanos, Johnathan y Jefferson, quienes, aun sin comprender del todo este proceso, han sido una presencia firme de ánimo y amor.

A Richard, mi amor, gracias por acompañarme con paciencia y entrega; por ayudarme a ser quien soy, incluso cuando yo misma dudaba, y por demostrarme que el amor verdadero también impulsa y sostiene. A mi alma gemela, Alexandra, gracias por caminar conmigo, por enseñarme el valor de la amistad, por cada etapa compartida, por la bendición de mi ahijada y por llenar mi vida de alegría. Y finalmente a mi colega, amiga y ahijada Paula, gracias por recorrer este proceso a mi lado; hacerlo juntas lo hizo más llevadero, más fuerte y más significativo, culminarlo de esta manera es un regalo y una bendición.

A todas las personas que formaron parte de este camino, y a aquellas que no nombro, pero estuvieron presentes de una u otra forma, este proyecto también les pertenece. A cada uno, gracias desde el fondo de mi corazón y los amo infinitamente.

Agradecimientos

En primer lugar, expreso un especial agradecimiento al profesor Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov, director de esta tesis de maestría, por su orientación y acompañamiento durante esta etapa fundamental de mi formación profesional.

Al Dr. Brayan Eduardo Tarazona Romero y al Dr. Víctor Alexis Lizcano González, por su apoyo, disposición y orientación durante todo este proceso de investigación.

A la Universidad Industrial de Santander, por abrirme las puertas de su alma máter; a la Escuela de Ingeniería Química, por permitirme desarrollar esta etapa investigativa; al Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía (CIDES), por hacerme parte de esta investigación; y a las Unidades Tecnológicas de Santander, al grupo de investigación GISEAC y semillero EVOTEC, por su participación activa y contribución al desarrollo del presente trabajo.

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (MinCiencias), por el apoyo económico brindado a mi formación de maestría mediante el proyecto CD 82605 CT ICETEX 2022-0644.

Finalmente, expreso mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este proceso y me acompañaron para culminar de forma satisfactoria esta importante etapa académica.

Tabla de contenido

Introducción.....	15
1. Marco teórico y estado del arte.....	18
1.1 Sistema de captación.....	21
1.2 Sistema de almacenamiento.....	26
1.3 Aplicaciones de Sistemas solares térmicos.....	29
1.3.1 Aplicación doméstica: Suministro de agua caliente y calefacción de espacios cerrados	29
1.3.2 Aplicación agroindustrial: Producción de mermelada de durazno	31
1.3.3 Aplicación industrial: Producción de mangueras	32
1.4 Software TRNSYS.....	34
2. Hipótesis	39
3. Objetivos.....	40
3.1 Objetivo general.....	40
3.2 Objetivos específicos	40
4. Metodología.....	41
4.1 Fase I: Validación de metodología de simulación de sistemas solares térmicos que integren materiales de cambio de fase, con base en el desempeño de estación experimental	41
4.1.1 Tratamiento de datos de DNI y temperatura	41
4.1.2 Montaje en el software TRNSYS	42

4.2 Fase II: Caracterización De Los Casos De Estudios Seleccionados 42

 4.2.1 Caracterización De La DNI Y Temperatura Disponible. 42

 4.2.2 Caracterización De La Demanda De Energía..... 43

 4.2.3 Determinación De La Topología De Los Casos De Estudio 43

4.3 Fase III: Establecimiento De Las Configuraciones De Sistemas Solares Térmicos Como Alternativa De Suministro De Calor En Tres Casos De Estudio Seleccionados, Mediante El Uso Del Software TRNSYS..... 44

 4.3.1 Metodología General Para Las Simulaciones..... 44

 4.3.2 Configuración De Colectores 44

4.4 Fase IV. Análisis De Costos 45

5. Resultados..... 47

5.1 Validación Aplicación De Software TRNSYS 47

 5.1.1 Parámetros Iniciales..... 47

 5.1.2 Datos Meteorológicos..... 48

 5.1.3 Montaje de la simulación en TRNSYS..... 50

 5.1.4 Extracción de datos..... 52

 5.1.5 Datos experimentales vs Datos teóricos 56

5.2 Caracterización La Demanda De Calor Y Disponibilidad De Irradiación Solar ... 57

 5.2.1 Caracterización De Irradiación Solar Directa (DNI) Y Temperatura..... 58

5.3 Caracterización De Demanda De Energía 65

5.3.1	Caso 1: Residencial - Escalamiento Hotel Piedra Parada - Berlín.	65
5.3.2	Caso 2: Agroindustrial - Fabricación De Mermelada – Pamplona.....	71
5.3.3	Caso 3: Industrial - Manufactura De Manguera - Girón	75
5.4	Topología De Sistemas Solares Térmicos Como Alternativa De Suministro De Calor En Tres Casos De Estudio.....	78
5.4.1	Características Principales De Los Casos De Estudio.....	78
5.4.2	Caso 1: Residencial - Escalamiento Hotel Piedra Parada - Berlín.	82
5.4.3	Caso 2: Agroindustrial - Fabricación de mermelada – Pamplona	90
5.4.4	Caso 3: Industrial - Manufactura de manguera – Girón.	98
5.5	Análisis Económico	104
5.5.1	Costo Asociado A La Demanda De Energía	104
5.5.2	Gasto Capital (CAPEX).....	106
5.5.3	Formulación Y Criterios De Evaluación Económica	111
6.	Conclusiones.....	123
7.	Recomendaciones	125
	Referencias Bibliográficas.....	126

Índice de Figuras

Figura 1 Ejemplo de un Sistema Solar Térmico.....	21
Figura 2 Perfil de DNI.....	50
Figura 3 Montaje en TRNSYS	51
Figura 4 Evolución diaria de la temperatura de salida de los colectores (°C).....	53
Figura 5 Datos experimentales - Hotel Piedra Parada.....	54
Figura 6 Datos teóricos - TRNSYS	55
Figura 7 Validación del software TRNSYS	56
Figura 8 Estudio de los tres perfiles de DNI	60
Figura 9 Estudio de los tres perfiles de Temperatura Ambiente	63
Figura 10 Relación entre el consumo específico de energía y la tasa de producción según ICIPC	76
Figura 11 Topología del sistema para ETC	81
Figura 12 Topología del sistema para PTC	82
Figura 13 Demanda de energía vs energía disponible ETC económico - Caso 1	84
Figura 14 Demanda de energía vs energía disponible ETC eficiente - Caso 1	85
Figura 15 Comparación semanal de la energía térmica disponible ETC - Caso 1	86
Figura 16 Demanda de energía vs energía disponible PTC económico - Caso 1.....	88
Figura 17 Demanda de energía vs energía disponible PTC eficiente - Caso 1	89
Figura 18 Comparación semanal de la energía térmica disponible PTC - Caso 1	90
Figura 19 Demanda de energía vs energía disponible ETC económico - Caso 2	92
Figura 20 Demanda de energía vs energía disponible ETC eficiente - Caso 2	92
Figura 21 Comparación semanal de la energía térmica disponible ETC - Caso 2.....	94

Figura 22 Demanda de energía vs energía disponible PTC económico - Caso 2..... 96

Figura 23 Demanda de energía vs energía disponible PTC eficiente - Caso 2 97

Figura 24 Comparación semanal de la energía térmica disponible PTC - Caso 2 98

Figura 25 Demanda de energía vs energía disponible PTC económico - Caso 3..... 100

Figura 26 Demanda de energía vs energía disponible PTC eficiente - Caso 3 101

Figura 27 Comparación semanal de la energía térmica disponible PTC - Caso 3 102

Índice de tablas

Tabla 1 Consumo energético mundial.....	18
Tabla 2 Disponibilidad energética de distintos recursos.....	19
Tabla 3 Clasificación de los colectores solares.....	22
Tabla 4 Características de los colectores.....	23
Tabla 5 Materiales con potencial para uso como PCM encontrados en la industria.....	27
Tabla 6 Rango de temperatura de trabajo de procesos en la industria del plástico.....	33
Tabla 7 Aplicaciones del Software TRNSYS.....	36
Tabla 8 Configuración de Simulaciones por Caso de Estudio.....	45
Tabla 9 Datos de referencia.....	48
Tabla 10 Promedios diarios de DNI, temperatura ambiente y temperatura de entrada.....	49
Tabla 11 Casos de estudio seleccionados.....	58
Tabla 12 Parámetros iniciales de energía requerida.....	66
Tabla 13 Requerimientos energéticos.....	67
Tabla 14 Propiedades de la Estearina de palma hidrogenada - PCM.....	68
Tabla 15 Energía mínima requerida por la aplicación.....	69
Tabla 16 Energía necesaria para fundir el PCM.....	70
Tabla 17 Datos de entrada para el cálculo de la demanda de calor en la elaboración de mermelada.....	72
Tabla 18 Composición del durazno.....	73
Tabla 19 Datos finales de la mermelada.....	74
Tabla 20 Energía necesaria para la fabricación de 1 kg de mermelada de durazno.....	74
Tabla 21 Ejemplos de extrusoras.....	77

EVALUACIÓN DE LA PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE TES	10
Tabla 22 Opciones comerciales de colectores ETC y PTC	78
Tabla 23 Variantes seleccionadas de colectores ETC y PTC utilizadas en las simulaciones	79
Tabla 24 Características del fluido caloportador	80
Tabla 25 Configuraciones analizadas para los ETC en los distintos escenarios de simulación - Caso 1	83
Tabla 26 Configuraciones analizadas para los PTC en los distintos escenarios de simulación - Caso 1	87
Tabla 27 Configuraciones analizadas para los ETC en los distintos escenarios de simulación - Caso 2.....	91
Tabla 28 Configuraciones analizadas para los PTC en los distintos escenarios de simulación - Caso 2.....	95
Tabla 29 Configuraciones analizadas para los PTC en los distintos escenarios de simulación - Caso 3.....	99
Tabla 30 Tabla de tarifas de energía por tipo de caso de estudio.....	105
Tabla 31 Demanda anual de energía convencional y costo asociado para los casos de estudio	105
Tabla 32 Parámetros generales considerados para la estimación del CAPEX.....	108
Tabla 33 Desempeño y requerimientos de colectores ETC y PTC en los escenarios de estudio	109
Tabla 34 CAPEX estimado para sistemas solares térmicos según tipo de colector y caso de estudio.....	110
Tabla 35 Indicadores económicos de los STS por escenario y tipo de colector.....	115

Tabla 36 Índice económico ponderado final para la selección de escenarios en cada caso de estudio..... 119

Tabla 37 Comparación del CAPEX asociado a los escenarios con mejor desempeño económico (ponderado final = 1,00)..... 120

Índice de Apéndices

Apéndice A Perfiles horarios de entrada para simulación en TRNSYS..... 138

Apéndice B Perfiles horarios de producción y demanda térmica – Caso 1 – Estudio Residencial..... 142

Apéndice C Perfiles horarios de producción y demanda térmica – Caso 2 – Estudio Agroindustrial..... 146

Apéndice D Perfiles horarios de producción y demanda térmica – Caso 3 – Estudio Industrial 149

Resumen

Título: Evaluación de la prefactibilidad técnico-económica de la introducción de sistemas solares térmicos en condiciones climáticas colombianas mediante simulación en software TRNSYS. Casos de estudio sector residencial, agroindustrial e industrial*

Autora: Nelcy Daniela Socha Rojas**

Palabras claves: TRNSYS, Temperatura ambiente, Irradiación Solar Directa (DNI), Sistemas Solares Térmicos (STS), Colectores solares, Energía Renovable.

Descripción: La diversificación de la matriz energética colombiana es fundamental frente al crecimiento de la demanda energética y la necesidad de avanzar hacia fuentes más sostenibles. En este contexto, la energía solar térmica representa una alternativa viable para el suministro de calor en los sectores residencial, agroindustrial e industrial. En el presente estudio se evaluó la prefactibilidad técnica y económica de sistemas solares térmicos mediante simulaciones en TRNSYS, considerando colectores de tubos evacuados (ETC) y cilindro-parabólicos (PTC) en configuraciones económicas y eficientes. El análisis incluyó la caracterización del recurso solar, la demanda energética de cada caso de estudio, el porcentaje de reemplazo anual de energía convencional y una evaluación económica basada en indicadores como el Payback y el ROI. Los resultados evidenciaron comportamientos diferenciados según la aplicación analizada, alcanzando reemplazos de hasta un 94% en el caso residencial mediante colectores PTC eficientes y almacenamiento térmico con PCM. Para el caso agroindustrial se obtuvieron los mayores desempeños del estudio, alcanzando reemplazos cercanos al 99%, mientras que, en el escenario industrial, debido a los altos requerimientos térmicos del proceso, los reemplazos máximos fueron del 56%. Asimismo, el análisis económico preliminar mostró que los escenarios de reemplazo intermedio presentaron, en varios casos, un mejor equilibrio entre desempeño técnico e inversión inicial. En este sentido, los resultados indican que no existe una tecnología universalmente superior, ya que la conveniencia de cada alternativa depende de variables como la demanda térmica, las condiciones climáticas, la ubicación geográfica y la capacidad de inversión de cada aplicación.

* Tesis de Maestría

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Doctorado en Ingeniería Química. Director: Viatcheslav Kafarov. Dr. Ciencias Técnicas. Codirector: Brayan Eduardo Tarazona Romero Dr. eficiencia energética y sostenibilidad en ingeniería y arquitectura

Abstract

Title: Assessment of the technical and economic pre-feasibility of introducing solar thermal systems under Colombian climatic conditions using TRNSYS software simulation: residential, agro-industrial, and industrial case studies.*

Author: Nelcy Daniela Socha Rojas**

Key Words: TRNSYS, Ambient temperature, Direct Normal Irradiance (DNI), Solar Thermal Systems (STS), Solar collectors, Renewable energy.

Description: The diversification of the Colombian energy matrix is essential in response to the growing energy demand and the need to transition toward more sustainable energy sources. In this context, solar thermal energy represents a viable alternative for heat supply in the residential, agro-industrial, and industrial sectors. This study evaluated the technical and economic prefeasibility of solar thermal systems through simulations performed in TRNSYS, considering evacuated tube collectors (ETC) and parabolic trough collectors (PTC) under both economic and high-efficiency configurations. The analysis included solar resource characterization, energy demand assessment for each case study, estimation of the annual conventional energy replacement percentage, and a preliminary economic evaluation based on indicators such as Payback and Return on Investment (ROI). The results showed different behaviors depending on the application analyzed, achieving replacement rates of up to 94% in the residential case through efficient PTC collectors combined with PCM thermal storage. The agro-industrial case achieved the highest performance of the study, with replacement rates close to 99%, while in the industrial scenario, due to the high thermal requirements of the process, the maximum replacement reached 56%. Furthermore, the preliminary economic analysis showed that intermediate replacement scenarios provided, in several cases, a better balance between technical performance and initial investment. In this sense, the results indicate that there is no universally superior technology, since the suitability of each alternative depends on variables such as thermal demand, climatic conditions, geographical location, and the investment capacity associated with each application.

* Master's Thesis

** Faculty of Physical and Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, PhD in Chemical Engineering. Director: Viatcheslav Kafarov, PhD in Technical Sciences. Co-director: Brayan Eduardo Tarazona Romero, PhD in energy efficiency and sustainability in engineering and architecture

Introducción

Actualmente, la producción de energía para uso doméstico e industrial se obtiene en un mayor porcentaje por recursos fósiles, como el petróleo, carbón o gas natural. Esto contribuye considerablemente a la contaminación ambiental y el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Desde el 2010 se registró un incremento anual promedio del 1,3% en la emisión de GEI, y en el 2019 este valor aumentó a 2,6% (Naciones Unidas, 2020). Una solución a esta problemática es la generación de energía a partir de fuentes renovables y limpias, como la energía eólica, hidráulica, solar, entre otras. Esta transición permite mitigar la crisis medioambiental y, además, diversifica la matriz energética del país (Cortés & Arango Londoño, 2017).

Dentro de las energías renovables se destaca la energía solar térmica o STE (Solar Thermal Energy, por sus siglas en inglés). Actualmente, esta fuente de energía se ha implementado principalmente para el calentamiento de agua de uso residencial y se estima que reduce el uso del gas en un 50% o 60%. También se presentan algunos usos industriales como el secado de productos agrícolas, la destilación de agua de mar, la generación de energía eléctrica, generación de calor, entre otras. (Arancibia Bulnes & Best, 2010). En esta línea de investigación, el Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía (CIDES) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) lideró el proyecto titulado *Desarrollo de un sistema sostenible de almacenamiento de energía solar térmica en condiciones de alta montaña empleando el cambio de fase de materiales autóctonos* (Lizcano-González, 2025), el cual es una colaboración con la Universidad de Northumbria (Reino Unido) y financiado por The Royal Society. El grupo CIDES también lideró el proyecto titulado *Desarrollo de una herramienta metodológica computacional y tecnologías de energías renovables para la transición energética en zonas de alta montaña en*

condiciones de pos-pandemia, el cual es financiado por MinCiencias y desarrollado en conjunto con la universidad de Pamplona (UNIPAMPLONA), Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) y Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

El aprovechamiento de la energía solar para la generación de calor se realiza mediante sistemas solares térmicos, para los cuales, su diseño, puesta en marcha y posterior uso puede acarrear grandes tiempos, debido a que su funcionamiento depende de muchas variables, como la ubicación geográfica, condiciones climáticas, aplicación específica, entre otros (Carrión Chamba et al., 2021).

El diseño de estos sistemas debe considerar parámetros como la caracterización de la demanda de energía, la necesidad de emplear sistema de almacenamiento de calor o TES (Thermal Energy Storage, por sus siglas en inglés), el tipo de colector solar a emplear, factores geográficos y climáticos, área disponible para instalación, entre otros. Algunas aplicaciones en las que se pueden integrar estos sistemas son: suministro de agua caliente y calefacción en hoteles, producción de manguera de polietileno y fabricación de mermelada. Estas tres aplicaciones están clasificadas como de baja temperatura, ya que en sus condiciones normales de operación no exceden los 150°C.

En este contexto, las herramientas computacionales, como el software TRNSYS (Transient System Simulation Tool. Thermal Energy System Specialists, LLC) reducen significativamente el costo y tiempo para estudiar los parámetros necesarios para la implementación de sistemas solares térmicos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente proyecto evaluó la prefactibilidad técnico-económica de la introducción de sistemas solares térmicos en condiciones climáticas colombianas mediante simulaciones realizadas con el software TRNSYS. Para ello, se

analizaron tres escenarios de aplicación del aprovechamiento de la energía solar térmica, cada uno asociado a una ubicación geográfica específica.

La investigación se estructuró en cinco etapas fundamentales. En la primera etapa, se llevó a cabo la validación de la herramienta computacional TRNSYS mediante la comparación de los resultados simulados con datos experimentales obtenidos del proyecto de investigación *Desarrollo de un sistema sostenible de almacenamiento de energía solar térmica en condiciones de alta montaña empleando el cambio de fase de materiales autóctonos* (Lizcano-González, 2025), con el fin de verificar su capacidad para reproducir el comportamiento térmico del sistema.

Posteriormente, se realizó la caracterización del recurso solar y de las condiciones térmicas de cada ubicación, junto con la estimación de la demanda energética asociada a cada caso de estudio. A partir de esta información, se diseñaron distintas configuraciones de sistemas solares térmicos (STS, *Thermal Energy System*), considerando tecnologías solares térmicas existentes y variantes de carácter económico y eficiente.

Finalmente, se desarrolló un análisis económico preliminar de las configuraciones propuestas, empleando indicadores financieros como el periodo de recuperación de la inversión (*Payback*) y el retorno de la inversión (ROI), con el objetivo de comparar la viabilidad de la obtención de energía convencional frente a la energía solar térmica. A partir de este análisis, se establecieron recomendaciones orientadas a la implementación futura de estos sistemas en los sectores residencial, agroindustrial e industrial.

1. Marco teórico y estado del arte

Actualmente, el continuo incremento de la demanda energética se debe principalmente al crecimiento y desarrollo poblacional, los cuales implican un aumento de los requerimientos de recursos energéticos (Barragán Escandón et al., 2019). Por esta razón, el interés por las energías alternativas obtenidas de recursos renovables ha presentado un significativo aumento a nivel global en las últimas décadas. Este interés es promovido por la conciencia ambiental, la búsqueda de la sostenibilidad y la reducción de las emisiones y contaminación (Herrando et al., 2023). En la Tabla 1, se registra el consumo energético mundial desde el año 2006 y algunos pronósticos para los años venideros (Mekhilef et al., 2011).

Tabla 1

Consumo energético mundial.

Año	Consumo mundial de energía del sector industrial [zW]*
2006	51,275
2010	54,469
2015	59,567
2020	64,284
2025	68,474
2030	71,961

Nota. *Consumo energético mundial – [1 zW = 10^{21} W] - (Mekhilef et al., 2011).

En la tabla anterior se puede evidenciar que el consumo energético mundial crece aproximadamente un 6,54 % cada cinco años. Este porcentaje, ligado a que la energía es producida a partir de recursos fósiles hacen de que esta cifra sea preocupante a nivel social y

ambiental, por lo que el estudio de las energías renovables es de vital importancia para la diversificación energética.

Es importante resaltar que, aunque la mayoría de la demanda energética es suplida por recursos no renovables, existen distintas formas de energía renovable que podrían aprovecharse para realizar un proceso de transición energética. En la Tabla 2, se pueden observar el potencial de producción de energía de forma renovable y no renovable, que se estima para las diversas fuentes de energía.

Tabla 2

Disponibilidad energética de distintos recursos.

Tipo de energía	Disponibilidad Anual [TW/A]
Energía Renovable	
Solar	23.000
Mareomotriz	0.3
Undimotriz*	0.2-2.0
Geotérmica	0.2-3.0
Biomasa	2.0-6.0
Eólica	75 - 130
Hidráulica	3.0-4.0
Energía No Renovable	
Gas natural	220
Petróleo	335
Uranio	185
Carbón	830

Nota. En la tabla se presenta la cantidad de energía disponible anualmente para su aprovechamiento, (Jiménez, 2017) - * Tipo de energía que aprovecha la fuerza de las olas para generar electricidad (Solano Rincón , 2022).

Los sistemas de energía renovable tienen vital importancia en la transición y diversificación energética. Según el informe de la REN21, la energía renovable representó cerca del 27% de uso global de electricidad y aproximadamente 18% del consumo total de energía del mundo (Herrando et al., 2023). Además de ello contribuye a algunos objetivos de desarrollo sostenible como, por ejemplo: energía asequible y no contaminante (7), producción y consumo responsables (12), acción por el clima (13), entre otros (Naciones Unidas, s.f.).

Como parte de la diversificación de la matriz energética, se encuentran energías limpias como, la energía hidroeléctrica, eólica, geotérmica, solar, entre otras (López Hurtado , 2020). De ellas se destaca la energía solar, la cual se divide en dos grandes grupos, la energía solar fotovoltaica en la cual la radiación solar se transforma directamente en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico y la STE la cual es obtenida a partir de la radiación solar y transformada en calor o electricidad (Cano Pina , 2021). Algunos de los ejemplos más comunes de esta aplicación son el calentamiento de agua sanitaria, calefacción de ambientes, procesos industriales como el secado de productos agrícolas, la destilación de agua de mar, la generación de energía eléctrica, generación de calor, entre otras (Arancibia Bulnes & Best , 2010).

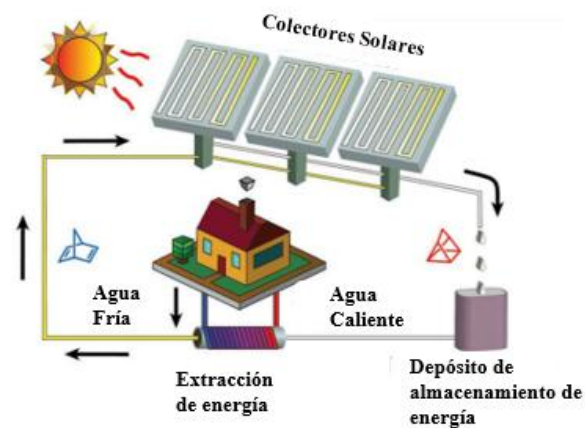
Actualmente, la STE está catalogada como una de las fuentes energéticas más importantes dentro de las energías renovables (Tahmineh et al., 2017). Según la Asociación Internacional de la Energía (IEA) la energía solar puede generar aproximadamente 994 TWh en todo el mundo. Teóricamente, 0.001 TW de energía solar tiene la capacidad de abastecer a aproximadamente 500.000 hogares con un promedio de consumo de energía entre los 1.8×10^{-7} y 2×10^{-7} TWh. Los STE son utilizados comúnmente para proporcionar agua caliente

sanitaria o calefacción, también son usados para la climatización y como uso industrial en centrales termosolares para generar electricidad (Osornio-Cárdenas et al., 2022).

Para el funcionamiento de cualquier STS, se requieren tres componentes esenciales, el sistema de captación, sistema de almacenamiento y sistema de aprovechamiento, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Ejemplo de un Sistema Solar Térmico.



Nota. Se presenta la estructura básica de un STS compuesta por colectores solares, tanque almacenamiento y el sistema de aplicación final. (Wang et al., 2019).

1.1 Sistema de captación

Los sistemas de captación térmica son los encargados de capturar la radiación proveniente del sol y transformarla en calor (Tobaja Vázquez, 2012).

Los colectores solares están definidos como los dispositivos que absorben la radiación solar. La energía, en forma de calor, se transfiere a un fluido en movimiento que posteriormente se utiliza en el sistema de almacenamiento de calor o en la aplicación final (Siddharth, Mohd., & Manabendra, 2015). Los colectores solares, se clasifican en dos

grupos: sin seguimiento y con seguimiento solar; estos últimos pueden ser con seguimiento de uno o dos ejes.

Los colectores solares sin seguimiento son aquellos que se encuentran en reposo, más conocidos como colectores fijos o estacionarios, no tienen la capacidad de moverse para buscar que la radiación solar incida de forma perpendicular. Algunos de los colectores que se encuentran en esta clasificación son: colectores de placa plana, tubo de vacío y parabólicos compuestos (Siddharth, Mohd., & Manabendra , 2015). Por otro lado, están los colectores con seguimiento definidos como aquellos que pueden seguir el movimiento del sol para que la radiación solar entre perpendicular a ellos. Entre los ejemplos más conocidos están: El colector concentrador parabólico y el reflector Fresnel lineal, que pertenecen a los colectores con seguimiento de un solo eje y mientras que el receptor de torre central, el reflector de plato parabólico y la lente circular de Fresnel, son colectores con seguimiento de dos ejes (Suman, Kaleem Khan, & Pathak, 2015). En la Tabla 3, se muestra la clasificación de los colectores anteriormente planteada.

Tabla 3

Clasificación de los colectores solares.

Colector	Clasificación	Ejemplo
Sin seguimiento	No aplica	Placa plana
		Tubo de vacío
		Parabólicos compuestos
Con seguimiento	Seguimiento de un eje	Cilindro-parabólico
		Reflector Fresnel lineal
	Seguimiento de dos ejes	Receptor de torre central
		Reflector de plato parabólico
		Lente circular de Fresnel

Nota. Colectores más usados en sistemas solares térmicos (Siddharth et al., 2015).

Ahora bien, los colectores solares son el componente principal de los STS, se destaca que estos sistemas se pueden usar en distintas zonas climáticas. Es de vital importancia conocer que el rendimiento de los colectores está ligado a múltiples factores como: la irradiación solar incidente, el área de superficie, la temperatura y las condiciones climáticas (Rawlings , 2009).

Se debe tener en cuenta que cada uno de los colectores solares anteriormente planteados tienen características y particularidades individuales, las cuales inciden en la aplicación que se esté realizando. En la Tabla 4, se establecerán algunas características importantes de los colectores mencionados anteriormente:

Tabla 4

Características de los colectores.

Tipo de colector	Características	Aplicaciones	Temperatura máxima [°C]	Referencia
Colector placa plana (FPC)	De mayor importancia en la conversión de energía solar.	Calefacción de baja a media temperatura Calentamiento de agua para viviendas	200	(Imtiaz Hussain et al., 2018)
	Fácil acceso en el mercado	Calentamiento de agua para piscinas cubiertas		
	Capacidad de captar el calor	Calefacción	250	

Colector tubo de vacío (ETC)	solar de forma más sencilla. Las pérdidas de calor por convección son menores que en FPC.	Uso en escenarios geográficos con clima frío		(Imtiaz Hussain et al., 2018)
Colector parabólico compuesto	Formado por dos superficies parabólicas Son necesarios algunos ajustes estacionales	Aprovechamiento de la radiación solar difusa Aplicaciones de baja y mediana temperatura	200	(Saettone Olschewski et al., 2017)
Colector cilindro parabólico (PTC)	Seguimiento de un eje Constante alineación con el sol.	Calentamiento de agua Producción de vapor en una central térmica Generación de energía eléctrica	400	(Echevarría López, 2011)
Colector reflector Fresnel lineal (LFR)	Serie de espejos reflectores alineados horizontalmente Movimiento hacia adelante y atrás en un solo eje	Gran potencial de aplicación en áreas con alta radiación solar Sistemas desalinización solar indirectos	600	(Moreno Valencia & Morales Anaya , 2022)
Colector receptor de	Gran número de heliostatos.	Generación de energía	800	(Suman et al., 2015)

torre central (CRS)	Sistemas individuales de seguimiento de dos ejes.	Capacidad de generar altas temperaturas		
Colector reflector de plato parabólico	El mecanismo es un disco parabólico Disposición similar a la de una antena parabólica	Generar electricidad en rango de los kilovatios Generar energía cinética	400	(Li & Dubowsky, 2011)
Colector lente circular de Fresnel	Uso de una lente convexa Capacidad de alcanzar temperaturas muy altas	Calentadores de agua Visibilidad a grandes distancias para fines de navegación	300	(Hasan Nia et al., 2014).

Nota. Características importantes de los colectores más conocidos comercialmente.

Dentro de los colectores mencionados anteriormente, se destaca el colector de tubo de vacío o ETC (Evacuated Tube Collector, por sus siglas en inglés) y el colector cilindro parabólico o PTC (Parabolic Trough Collector, por sus siglas en inglés) debido a su rango de temperatura de trabajo, facilidad comercial y sus focos de aplicación, lo cual se adecua a las necesidades del presente estudio.

El funcionamiento del ETC consiste en una capa negra para la absorción de energía la cual se encuentra al interior de un tubo de vidrio. Este tubo a su vez se encuentra al interior de un tubo de vidrio de mayor diámetro, encontrándose entre ellos un aislamiento al vacío.

Este tipo de características permiten eliminar las pérdidas de calor por convección y de esta manera recolectan de manera más sencilla el calor (Guerrero, 2023).

Por otro lado, el PTC cuenta consiste en un tubo de vidrio de doble pared, por el cual fluye en su interior un fluido que transporta el calor. La radiación solar incide en el tubo como resultado de su reflejo en una superficie parabólica, lo cual concentra la energía, permitiendo alcanzar mayores temperaturas (Cubillos, 2023).

Colombia es un país que, debido su zona geográfica cuenta con irradiación solar directa o DNI (Direct Normal Irradiance, por sus siglas en inglés) constante en determinadas zonas, lo cual beneficia la implementación de este tipo de energía (Cardenas Acosta, 2019). Es importante resaltar que en cada ubicación puede variar considerablemente factores importantes que inciden en el rendimiento de la tecnología que se usa, se destaca como factor importante el DNI y la temperatura ambiente del lugar de estudio.

1.2 Sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento de calor es el segundo componente de los sistemas solares térmicos. Estos sistemas comúnmente se utilizan en cualquier proceso en el que sea necesario producir calefacción o refrigeración y también cuando se necesite almacenar un producto para su posterior aprovechamiento (OVACEN , 2022).

Los sistemas de almacenamiento térmico se dividen en tres grandes grupos: Almacenamiento térmico por calor sensible, termoquímico y calor latente. El almacenamiento por calor sensible es aquel en el que hay un incremento de temperatura, pero no se presenta un cambio de estado. La estimación de la energía que es posible almacenar puede ser conocida teniendo datos como la masa, la capacidad calorífica específica y el

cambio en la temperatura del material (Mhadhbi, 2018). Por otro lado, un sistema de almacenamiento termoquímico se basa en el uso de una fuente de energía para inducir una reacción química reversible y/o proceso de sorción, es decir un cambio de entalpía durante una reacción termoquímica (Lizana et al., 2017). Finalmente, en el almacenamiento por calor latente, la energía es almacenada durante el proceso de cambio de fase, idealmente este es un proceso isotérmico en sustancias puras (Mhadhbi, 2018).

Por lo general, en la industria se prefiere trabajar con el almacenamiento de energía en forma de calor latente o LHTES (Latent Heat Thermal Energy Storage, por sus siglas en inglés). Como se mencionó anteriormente, el LHTES es un tipo de almacenamiento en el cual se desea calentar un material, hasta que este experimenta un cambio de fase (Mhadhbi, 2018). La temperatura a la cual el material presenta este cambio se le conoce como temperatura de cambio de fase y el material es conocido como material de cambio de fase o PCM (Phase Change Material, por sus siglas en inglés) (Tao & Ya-Ling, 2018). Finalmente, cuando se alcanza esa temperatura el PCM absorbe una cantidad considerable de energía en forma de calor que permite la transformación y se le conoce como calor latente de fusión (Cárdenas & León, 2013). En la Tabla 5, se presentan algunos materiales con potencial para su uso como PCM encontrados en la industria con su respectivas temperatura y entalpia de fusión, es importante resaltar que la selección del material depende del uso final del suministro de calor.

Tabla 5

Materiales con potencial para uso como PCM encontrados en la industria

PCM	Tf [°C]	Hf [kJ/kg]	Referencias
Ácido Láurico	42.6	176.4	(Sari, 2006)

Ácido mirístico	54.6	193.8	(Tang et al., 2016)
Parafina	58.9	189.6	(Sari, 2006)
Ácido Palmítico	62.07	219.63	(Wan et al., 2019)
Ácido esteárico	67.8	198.9	(Sari, 2006)
Acetamida	82	263	(Sharma et al., 2000)
Acido benzoico	85	147	(Haillot et al., 2011)
Nitrato de magnesio hexahidrato	89	134	(Shobo et al., 2018)
Ácido oxálico	105	356	(Pereira da Cunha y Eames, 2016)
Eritritol	118	339.8	(Sharma et al., 2005)
Acetanilida	118.9	222	(Buddhi et al., 2003)
Polietileno de alta densidad	125	178.96	(Tang et al., 2016)
Polietileno	126	235	(Shobo et al., 2018)
Anhídrido ftálico	131	160	(Pielichowska & Pielichowski, 2014)
Urea	134	250	(Pereira da Cunha y Eames, 2016)
Ácido málico	141	385	(Haillot et al., 2011)
Ácido 2-clorobenzoico	142	164	(Pereira da Cunha y Eames, 2016)
Ácido adípico	152	275	(Hasl y Jiricek, 2018)
D- Manitol	165	300	(Kenisarin, 2014)
Hidroquinona	172	258	(Jankowski y McCluskey, 2014)
Cloruro de Aluminio	192	280	(Pielichowska & Pielichowski, 2014)

Nota. Temperatura y entalpia de fusión materiales con potencial para uso como PCM

Ahora bien, las variables establecidas en la tabla anterior son importantes para el cálculo de almacenamiento de energía térmica, el cual está dividido en tres partes: calor sensible sólido, calor latente y calor sensible líquido (Zhao et al., 2020) y se modela según la siguiente ecuación:

$$Q = \int_{T_1}^{T_m} mc_{p,s}dT + m\Delta H + \int_{T_m}^{T_2} mc_{p,l}dT \quad (1)$$

De la ecuación (1), se tienen términos como: m, C_p y T que corresponden a la masa, calor específico y temperatura del PCM respectivamente; el ΔH indica la entalpía de cambio de fase por unidad de masa; los subíndices '1' y '2' indican el comienzo y el final del proceso de transferencia de calor, respectivamente; y los subíndices 's', 'm' y 'l' se refieren a la fase sólida, el proceso de fusión y la fase líquida, respectivamente (Zhao et al., 2020).

1.3 Aplicaciones de Sistemas solares térmicos.

Después de que los sistemas de captación de energía realicen su función, dicha energía es almacenada y se encuentra disponible para su posterior aprovechamiento. Actualmente, las aplicaciones de la STS se han incrementado considerablemente debido a la necesidad de implementar formas más limpias de obtención energía.

Las aplicaciones de los STS se pueden dividir en tres secciones que son las más relevantes en cuanto a su implementación para este proyecto de investigación: aplicaciones domésticas, agroindustriales e industriales

1.3.1 Aplicación doméstica: Suministro de agua caliente y calefacción de espacios cerrados

La calefacción de espacios y el suministro de agua caliente sanitaria es uno de los sectores que presenta una demanda energética muy alta. Se estima que representa

aproximadamente el 75% del consumo energético en el sector industrial, residencial y comercial (Anuar Shari et al., 2015).

En un proyecto realizado por el Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía y titulado *Desarrollo de un sistema sostenible de almacenamiento de energía solar térmica en condiciones de alta montaña empleando el cambio de fase de materiales autóctonos* (Lizcano-González, 2025), se estudia el desempeño de la estearina de palma hidrogenada como PCM en un sistema piloto utilizando el almacenamiento de STE. El piloto de pruebas se ubica en Berlín – Tona (Santander). Este sistema solar térmico le proporciona calefacción a una (1) habitación y agua caliente a una (1) ducha. Algunas características importantes del equipo son: el tanque de almacenamiento tiene dimensiones internas de 0,76 m x 0,76 m x 1,2 m, para una capacidad de PCM de 550 kg. El PCM es estearina de palma que tiene una temperatura y entalpia de fusión de 59,2 °C y 234,4 kJ/kg. Además, se conoce que el sistema de captación son colectores fijos de ETC un total de 140 tubos y el sistema de suministro final es un radiador de tubo con aletas.

El piloto de pruebas se encuentra instalado en el Hotel Piedra Parada el cual con doce (12) pods, cada uno con requerimientos de temperatura y energía aproximadamente igual al estudio anteriormente planteado. En este contexto, obtener confort térmico para la totalidad del hotel en cuestión, representa un escalamiento del proceso de verificación. Se establece que el punto de partida es una igual necesidad térmica para cada habitación, por lo que entonces se propone un aumento proporcional de los sistemas de almacenamiento y captación para observar el comportamiento que presenta.

1.3.2 Aplicación agroindustrial: Producción de mermelada de durazno

La ubicación geográfica de Colombia, situada en la zona intertropical, le otorga un elevado potencial para el aprovechamiento de la energía solar a lo largo de todo el año. Este recurso energético se presenta como una alternativa viable y sostenible para suplir necesidades energéticas en comunidades campesinas localizadas en áreas rurales, donde el acceso a fuentes convencionales suele ser limitado. Entre sus aplicaciones más relevantes en el ámbito agroindustrial se encuentra el secado de productos agrícolas, proceso mediante el cual se reduce el contenido de agua de las cosechas, incrementando su vida útil y facilitando su conservación, sin alterar de manera significativa sus propiedades nutricionales (Marulanda-Meza & Burbano-Jaramillo, 2021). En términos generales, los procesos propios de la agroindustria presentan requerimientos térmicos significativamente menores en comparación con los asociados a la industria pesada. En la mayoría de los casos, las temperaturas de operación no superan los 150 °C, lo que evidencia que la demanda de calor en este sector puede ser cubierta de manera eficiente mediante el uso de colectores solares térmicos estacionarios disponibles comercialmente. Esta característica convierte a la STE en una alternativa tecnológica apropiada y factible para el desarrollo de procesos agroindustriales sostenibles (Guillén Ángel & Julián , 2023).

La producción de mermelada a partir de frutas ha experimentado una evolución significativa, pasando de ser una actividad artesanal a consolidarse como un proceso de carácter industrial, estructurado en etapas de mayor escala. La incorporación de innovaciones tecnológicas ha sido determinante en esta transformación, pues ha permitido optimizar la eficiencia de los procesos y reducir los costos asociados a la elaboración del producto (Barón González, 2022). En el contexto colombiano, para el año 2016 se reportó una producción anual de 5964135 kilogramos, de los cuales aproximadamente el 20% correspondió a

pequeñas y medianas empresas, lo que refleja la relevancia de este sector en la economía nacional. Particularmente en Pamplona, Santander, la producción de durazno constituye una actividad agrícola de importancia, favorecida por las condiciones climáticas de la región, y se configura como un insumo estratégico para el desarrollo de la industria de mermeladas a nivel local (Barón González, 2022).

En este contexto, resulta pertinente considerar alternativas energéticas sostenibles que contribuyan al mejoramiento del proceso productivo. La elaboración de mermelada demanda un suministro continuo de calor, principalmente durante la etapa de concentración en marmitas, donde se requiere alcanzar temperaturas relativamente bajas (inferiores a 150 °C). Estas condiciones se ajustan a la capacidad operativa de los colectores solares térmicos estacionarios, lo cual abre la posibilidad de implementar sistemas basados en energía solar como una opción técnica y económicamente viable para la agroindustria local. De esta manera, la integración de recursos renovables no solo favorecería la reducción de costos de producción, sino que también impulsaría la sostenibilidad y competitividad de las pequeñas y medianas empresas en la región.

1.3.3 Aplicación industrial: Producción de mangueras

En el ámbito industrial, la integración de STS se ha consolidado como una estrategia efectiva para disminuir los costos operacionales asociados al consumo de combustibles fósiles y, al mismo tiempo, mitigar la emisión de gases de efecto invernadero (Alkilan et al., 2011). Aunque este tipo de energía se emplea principalmente en aplicaciones de baja temperatura, como se expuso anteriormente, también existen múltiples campos de aplicación en los que se requieren rangos de trabajo medios y medio-altos, alcanzando hasta los 240 °C. En este sentido, la producción de calor se ha identificado como uno de los usos más relevantes

de la STE en el sector industrial, con un amplio abanico de procesos que incluyen la esterilización, pasteurización, secado, hidrólisis, destilación y evaporación, así como operaciones de lavado, limpieza y polimerización (Kalogirou, 2014). Algunos de los procesos que se pueden llevar a cabo en la industria del plástico se pueden observar en la

Tabla 6

Tabla 6

Rango de temperatura de trabajo de procesos en la industria del plástico

Industria	Proceso	Rango de temperatura de trabajo
		[°C]
Plástico	Preparación	120 – 140
	Destilación	140 – 150
	Separación	200 – 220
	Extensión	140 – 160

Nota. Datos extraídos de (Kalogirou, 2014).

La producción de mangueras plásticas constituye un proceso industrial de gran relevancia dentro del sector de la transformación de polímeros, dado que se trata de un insumo fundamental para la construcción, la agricultura, la industria automotriz y diversas aplicaciones domésticas. El procedimiento inicia con la preparación de la materia prima, que puede ser de origen virgen o reciclado, la cual se alimenta a través de la tolva de la extrusora (Criz Tigse, 2021). Una vez en el sistema, el material es transportado por un cilindro sinfín donde se produce su fusión, proceso facilitado por el calor proveniente de resistencias eléctricas tipo abrazadera, así como por la fricción y la presión generadas durante el movimiento del tornillo. Posteriormente, el polímero fundido es conducido hacia el cabezal y la boquilla de extrusión, donde adquiere la geometría tubular característica de la manguera, tras lo cual pasa a un tanque de enfriamiento. En esta etapa, el control de la velocidad de

arrastré resulta determinante, pues de este depende en gran medida el espesor final de la manguera producida. Finalmente, el producto es sometido a operaciones de corte, medición y almacenamiento (Pachacama Campaña, 2019).

La temperatura de fusión del polietileno es 125°C (Tang et al., 2016), y con este dato establecido se puede plantear que la temperatura mínima de trabajo que se necesita en el proceso. Partiendo de ese hecho se debe realizar la selección del material de cambio de fase adecuado para el proceso y establecer por medio de guías de equipos la eficiencia del extrusor a utilizar. Es importante resaltar que la temperatura de trabajo de la extrusora está por debajo de la temperatura máxima de los colectores ETC y PTC, siendo estas 200 y 400 °C respectivamente, las cuales se presentan en la Tabla 4.

1.4 Software TRNSYS

Aunque la implementación de los sistemas solares térmicos es importante para la diversificación de la matriz energética del país. En Colombia, el desarrollo y el conocimiento que involucran las energías renovables como la STE es lento y representa un gran desafío tecnológico e ingenieril, a pesar de ser uno de los países que cuenta con una matriz energética diversa, pues posee combustibles fósiles y recursos renovables (Vidal G & Fontalvo G, 2018).

Entre los problemas más frecuentes al implementar los sistemas solares térmicos es la cantidad de variables para tener en cuenta en el proceso, entre ellas la ubicación geográfica, la irradiación del lugar en estudio, el área a cubrir, el tipo de colector a utilizar para esa aplicación en especial, entre otros. Debido a este tipo de características y en pro de conocer la cantidad energía solar que puede ser aprovechada se puede hacer uso de herramientas tecnológicas disponibles.

El modelado de sistemas y procesos de cualquier tipo, hacen considerablemente más fácil la toma de decisiones. La idea de la simulación o modelados de un proceso es que por medio de técnicas matemáticas se pueda obtener un escenario similar al funcionamiento del proceso en el mundo real (Cargua & Gustavo, 2018). Es importante resaltar que el uso de un software para el modelamiento de procesos tiene entre sus funciones que sea menos costoso y que el tiempo en el cual se ensaye el modelado sea mucho más corto, de esta manera también se reduce la incertidumbre de diversos factores ligados a la situación climática, geográfica y también el error humano (Shrivastava et al., 2017).

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, en 1975 aparece el software TRNSYS. Una herramienta de simulación energética enfocada en la evaluación de sistemas de energía solar, que con los años se ha sometido a diferentes actualizaciones por distintos centros de investigación alrededor del mundo (Larriva Arévalo & Torres Jara, 2021). TRNSYS está basado en gráficos, es flexible y su principal uso es la simulación de comportamientos transitorios. Uno de sus factores más importantes es que permite a los usuarios modificar los componentes o escribir los propios, ingresando datos de los sistemas de colectores, datos meteorológicos, de radiación solar, sistemas de control, entre otros (Ahamed et al., 2016).

Teniendo en cuenta las características que se mencionaron anteriormente, TRNSYS ha sido usado de manera recurrente desde su aparición para hacer diferentes estimaciones y poder aprovechar la optimización de costos y tiempo. A continuación, se presentan algunas de sus aplicaciones en los últimos años.

Tabla 7

Aplicaciones del Software TRNSYS

Año	Aplicación	Referencia
2017	Modelamiento y simulación de un calentador de agua solar	(Shrivastava et al., 2017)
2018	Sistema de enfriamiento con rueda desecante híbrido	(Cargua & Gustavo, 2018)
2018	Cálculo de la energía anual y la temperatura de dos tipos colectores: placa plana (FPC) y de tubo de vacío (ETC) en las condiciones climáticas frías de Irán	(Tahmineh et al., 2017)
2019	Calcular el rendimiento de un secador solar híbrido indirecto de madera	(Lamrani et al., 2019)
2020	Calcular el ahorro potencial en instalaciones de ACS mediante el uso de Energía Solar Térmica en los Hospitales de Extremadura (España)	(Sánchez Barroso et al., 2020)
2020	Análisis técnico, energético y económico de un sistema híbrido terrestre, solar y eólico, que proporciona calefacción/refrigeración de espacios, agua caliente sanitaria y energía eléctrica para un hogar.	(Figaj et al., 2020)
2021	Modelamiento en TRNSYS de un sistema de colectores solares, de placa plana y tubo al vacío, para la obtención de ACS en la ciudad de Cuenca, Ecuador.	(Larriva Arévalo & Torres Jara, 2021)
2021	Simulación dinámica de un sistema de desalinización flash de múltiples etapas impulsado por colectores cilindro-parabólicos.	(Ziyaei et al., 2021)

2022	Análisis térmico del sistema de evaporación-condensación para el tratamiento de aguas residuales avícolas	(Rey Benavides, 2022)
2022	Performance Evaluation of a Parabolic Trough Collector Applying SolTrace and TRNSYS	(Tarazona-Romero, Arenas-Gracia, & Jaimes-Orostegui, 2022)
2023	Simulación un sistema de bomba de calor con fuente de aire acoplada a energía solar.	(Ma et al., 2023)
2023	Simulación de un deshumidificador que forma parte de un desalinizador solar.	(Cárdenas Romero & Pinto Cordero, 2023)
2023	Simulación de un colector lineal Fresnel calentamiento de agua y su aplicabilidad en el sector de la Guajira, Colombia	(Rios Jimenez & Sarmiento Martinez, 2023)
2023	Evaluación la producción de agua del sistema de desalinización solar indirecto por concentración, para realizar una validación general en cuanto a la producción de agua dulce respecto a la producción de salmuera.	(Ulloa Ariza & Camacho Aza , 2023)
2025	Evaluation of ventilation systems as a cooling strategy in dwellings using a validated TRNSYS model	(Vera Alves, Martínez Beltrán, & Molina González , 2025)

En la Tabla 7, se pueden observar diferentes proyectos, donde el software TRNSYS fue empleado como herramienta de simulación. Entre los estudios, se resalta la forma en la que es importante comparar y analizar el rendimiento de distintos colectores. Al realizar este tipo de estudios se puede optimizar tiempo y recursos económicos empleados para la realización de los proyectos. Una de las comparaciones más interesantes dentro de los

estudios planteados, es la diferencia en el rendimiento de los colectores de placa plana o FPC (Flat-Plate Collector, por sus siglas en inglés) y los ETC en condiciones climáticas frías de Irán, donde bajo estos parámetros los colectores tienen un rendimiento y una ganancia de energía útil del 41% y 30% más que el colector FPC respectivamente (Tahmineh et al., 2017).

Las aplicaciones que implementan sistemas de energía renovable en los sectores doméstico, agroindustrial e industrial son cada vez más relevantes debido a la necesidad de diversificar la matriz energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En este contexto, herramientas de simulación como TRNSYS permiten estudiar, modelar y optimizar sistemas solares térmicos bajo diferentes condiciones climáticas y operativas, reduciendo costos, tiempos de implementación e incertidumbres asociadas al diseño de este tipo de tecnologías.

No obstante, aunque la literatura internacional reporta múltiples aplicaciones de TRNSYS en sistemas solares térmicos, gran parte de los estudios se enfocan en casos específicos o en análisis predominantemente energéticos desarrollados bajo condiciones climáticas, económicas y tecnológicas distintas a las presentes en Colombia. En consecuencia, aún es limitada la cantidad de investigaciones que integren comparaciones técnico-económicas entre distintas tecnologías y aplicaciones considerando condiciones representativas del contexto colombiano.

Por esta razón, el presente trabajo propone una evaluación integral de configuraciones basadas en colectores ETC y PTC para aplicaciones residenciales, agroindustriales e industriales, considerando variables climáticas, energéticas y económicas que permitan establecer criterios de prefactibilidad para su implementación en distintas regiones del país.

2. Hipótesis

La aplicación del modelo dinámico mediante la herramienta TRNSYS integrando datos bibliográficos, resultados de laboratorio y variables meteorológicas locales permitirá realizar el análisis técnico-económico de sistemas solares térmicos. Este enfoque permitirá comparar la forma de obtención de energía convencional con uno basado en energía solar, además generará recomendaciones preliminares para la implementación de dichos sistemas en ámbitos residenciales, agroindustriales e industriales, ajustados a condiciones específicas.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la prefactibilidad técnica y económica de sistemas solares térmicos mediante simulaciones en el software TRNSYS, con el fin de determinar su potencial de aplicación como alternativa sostenible de suministro de calor en distintas regiones de Colombia. Casos de estudio sector residencial, agroindustrial e industrial

3.2 Objetivos específicos

Validar los parámetros de simulación del software TRNSYS mediante la comparación con datos experimentales obtenidos en una estación experimental.

Caracterizar la demanda térmica y la disponibilidad de irradiación solar en tres ubicaciones geográficas de Colombia, a partir del análisis de datos meteorológicos y energética secundarios en los tres casos de estudio (residencial, agroindustrial e industrial)

Diseñar la topología de distintos sistemas solares térmicos empleando el software TRNSYS, evaluando el porcentaje de reemplazo anual para cada configuración en cada caso de estudio.

Analizar la viabilidad económica de las configuraciones simuladas, considerando los costos de inversión, operación y mantenimiento, con el fin de establecer su rentabilidad y potencial de implementación en el contexto colombiano.

4. Metodología

La investigación se dividió en cuatro etapas. En la primera etapa se realizó la validación de la herramienta computacional TRNSYS, empleando los datos experimentales generados en el piloto de investigación construido en el proyecto *Desarrollo de un sistema sostenible de almacenamiento de energía solar térmica en condiciones de alta montaña empleando el cambio de fase de materiales autóctonos* (Lizcano-González, 2025). Posteriormente se realizó la caracterización de la disponibilidad de DNI y temperatura ambiente de tres casos de estudio, además de establecer la demanda propia de cada aplicación. Una vez establecida la metodología de simulación y caracterizadas las demandas de calor, se evaluó el desempeño de STS integrados a los casos de estudio seleccionados. Finalmente se realizó un análisis de costos para cada caso de estudio, en donde se comparó la tecnología empleada tradicionalmente y la propuesta basada en STE con el fin de determinar factores como Tasa Interna de Retorno y Valor Presente Neto.

4.1 Fase I: Validación de metodología de simulación de sistemas solares térmicos que integren materiales de cambio de fase, con base en el desempeño de estación experimental

4.1.1 Tratamiento de datos de DNI y temperatura

Con base en los obtenidos de la estación experimental construida en Berlín realizada en el proyecto de doctorado titulado *Desarrollo de un sistema sostenible de almacenamiento de energía solar térmica en condiciones de alta montaña empleando el cambio de fase de materiales autóctonos* (Lizcano-González, 2025), se recopilaron registros de temperatura de entrada a los colectores, temperatura ambiente y DNI. Estos valores fueron organizados en un archivo de 215 horas que incluyó las tres variables mencionadas. Posteriormente, dicho

archivo fue transformado en un fichero de texto (.txt) compatible con TRNSYS, para alimentar el modelo en la plataforma de simulación.

4.1.2 Montaje en el software TRNSYS

En esta etapa se construyó el modelo en TRNSYS utilizando como parámetro central de validación la temperatura de salida de los colectores solares. Una vez cargados los archivos de datos correspondientes a temperatura de entrada, temperatura ambiente y DNI, y configurados los parámetros iniciales del sistema, se ejecutó la simulación y se compararon los valores simulados de temperatura de salida con los datos medidos experimentalmente.

Con el fin de simplificar el modelo y garantizar estabilidad computacional durante las simulaciones, se asumieron ciertas condiciones de operación constantes, tales como el caudal del fluido caloportador y la eficiencia del colector de tubos de vacío (ETC). Asimismo, no se consideraron pérdidas térmicas menores asociadas a tuberías y accesorios, dado que su efecto sobre el comportamiento global del sistema se consideró reducido frente a las principales variables térmicas analizadas.

4.2 Fase II: Caracterización De Los Casos De Estudios Seleccionados

4.2.1 Caracterización De La DNI Y Temperatura Disponible.

Se recopiló históricamente la DNI y la temperatura ambiente de cada sitio de estudio, empleando la herramienta PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) del Joint Research Centre (JRC) de la Unión Europea. Esta plataforma permite obtener mediciones de parámetros climáticos como el DNI en W/m^2 y temperatura ambiente en $^{\circ}C$, en distintos periodos (horas, días, meses, años) según las necesidades del estudio.

4.2.2 Caracterización De La Demanda De Energía

Los tres casos de estudio seleccionados para este proyecto de investigación emplean tecnologías convencionales para el suministro de calor. Entonces a partir de la caracterización de la potencia y/o consumo energético de los equipos instalados, se puede determinar la demanda de energía actual. Se verificará los registros históricos y manuales operacionales con el fin de establecer la periodicidad de la demanda y los ciclos de trabajo.

4.2.3 Determinación De La Topología De Los Casos De Estudio

Una vez definida la topología de los sistemas y los mecanismos de almacenamiento y transferencia de calor, se procede a su implementación en el entorno de simulación TRNSYS. Dado que el modelo se centra en la evaluación del desempeño térmico bajo diferentes condiciones operativas, la validación se abordó mediante un enfoque energético basado en balances de calor, utilizando la relación para estimar la energía útil transferida al fluido caloportador.

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

Este procedimiento permite verificar la coherencia de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones, al representar de manera global los procesos de captación y transferencia de calor que tienen lugar en los colectores solares, tales como la absorción de radiación, la conducción en los materiales y la transferencia de calor hacia el fluido de trabajo. En este sentido, la energía calculada refleja el efecto conjunto de estos mecanismos, permitiendo evaluar la consistencia física del modelo.

No obstante, es importante señalar que este tipo de validación corresponde a un análisis de primer orden, enfocado en la conservación de la energía. Una validación más detallada implicaría la incorporación explícita de componentes como intercambiadores de

calor y sistemas de almacenamiento térmico, así como la resolución más detallada de las resistencias térmicas del sistema. Sin embargo, considerando el alcance del presente estudio, orientado a la comparación del desempeño energético entre distintas configuraciones, se optó por un análisis de primer orden.

Adicionalmente, se verificó que la evolución temporal de la energía térmica obtenida sigue la tendencia de la radiación solar disponible, lo cual es consistente con el comportamiento esperado en sistemas de captación solar. En consecuencia, los resultados presentan coherencia con los principios termodinámicos y permiten establecer tendencias confiables en el desempeño de los sistemas analizados, siendo apropiados para el propósito comparativo planteado en esta investigación.

4.3 Fase III: Establecimiento De Las Configuraciones De Sistemas Solares Térmicos Como Alternativa De Suministro De Calor En Tres Casos De Estudio Seleccionados, Mediante El Uso Del Software TRNSYS.

4.3.1 Metodología General Para Las Simulaciones

Para las simulaciones de los tres casos de estudio preseleccionados, se utilizó la metodología validada en la fase anterior. Cada caso siguió idéntico procedimiento: carga de datos, configuración del modelo en TRNSYS y ejecución de simulaciones. Es importante destacar que las características específicas del sistema pueden variar según la aplicación, pero el proceso metodológico se mantiene coherente.

4.3.2 Configuración De Colectores

Se estudiaron dos tipos de colectores solares en cada caso: ETC y PTC. Para cada tecnología, se evaluó una variante eficiente desde el punto de vista térmico y una alternativa

más económica, sumando un total de cuatro simulaciones por caso de estudio, y al menos diez en total según el caso de estudio como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8

Configuración de Simulaciones por Caso de Estudio

	Casos de estudio	Temperatura de trabajo [°C]	Equipo de suministro final
1	Escalamiento para el Hotel Piedra Parada	60 – 130	Radiador de tubo con aletas
2	Producción de mermelada de durazno	40 – 130	Marmita
3	Producción de manguera de Polietileno	90 – 280	Extrusor

Aunque el presente estudio no desarrolló un análisis de sensibilidad estadístico formal, sí contempló múltiples configuraciones tecnológicas bajo diferentes condiciones climáticas y de demanda energética. Esto permitió analizar indirectamente la influencia de variables como el recurso solar disponible, la ubicación geográfica, el tipo de colector y el nivel de reemplazo energético sobre el desempeño técnico y económico de los sistemas solares térmicos.

4.4 Fase IV. Análisis De Costos

Para llevar a cabo el análisis de costos, se realizó una comparación entre aspectos financieros claves de las dos formas de obtención de energía (convencional vs. renovable). Además de los parámetros de desempeño técnico, se considerarán variables financieras. A continuación, se detallan los datos de entrada requeridos para esta fase:

- **Tarifas de energía:** para el abastecimiento energético, Colombia depende de la explotación de recursos fósiles, en este contexto, se estudian los precios e incrementos de los precios a lo largo del análisis.
- **Tasa Representativa del Mercado – TRM:** Representa la cantidad de pesos colombianos necesarios para comprar un dólar estadounidense (León-Esteban et al., 2023).
- **Costos de inversión del sistema de almacenamiento de energía solar térmica y tecnologías actuales:** para este análisis se tienen en cuenta los costos de inversión e instalación de los sistemas solares térmicos y tecnologías actuales. Inicialmente los costos de la implementación de la energía renovable están considerablemente más altos que los equipos comerciales para el suministro de energía en los casos de estudio seleccionados.
- **Costo variable de operación y mantenimiento:** se estima el consumo energético de las tecnologías convencionales y renovables, con el fin de comparar los costos variables entre ellos para su implementación bajo un mismo caso de estudio.
- **Costo fijo de operación y mantenimiento:** para este inciso se tendrán características importantes como el tiempo de vida útil de los equipos dentro de las configuraciones de los sistemas solares térmicos y para las tecnologías convencionales los equipos que generan la potencia indicada en el para el caso en estudio.

Tras realizar los análisis previamente descritos, se procederá al cálculo del Payback y Retorno de Inversión (ROI). Estos indicadores facilitaran una evaluación preliminar de los sistemas de obtención de energía renovable y compararlos con la obtención de energía convencional.

5. Resultados

5.1 Validación Aplicación De Software TRNSYS

Con el fin de garantizar la veracidad y confiabilidad de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en esta investigación, se llevó a cabo un proceso de validación del software TRNSYS, empleado para la estimación del comportamiento térmico y la topología de sistemas solares en tres casos de estudio ubicados en diferentes zonas de Colombia (Berlín, Pamplona y Girón).

Es importante destacar que la precisión de los resultados de este tipo de herramientas computacionales depende en gran medida de su capacidad para reproducir condiciones reales de operación. Para ello, inicialmente se realizó una comparación directa de los resultados obtenidos por la herramienta computacional con los datos reportados en el proyecto de doctorado titulado *Desarrollo de un sistema sostenible de almacenamiento de energía solar térmica en condiciones de alta montaña empleando el cambio de fase de materiales autóctonos*, realizado en el marco del grupo de investigación CIDES. Dicho estudio, basado en mediciones experimentales y simulaciones, constituye una referencia válida para contrastar el comportamiento del software en condiciones similares de operación.

5.1.1 Parámetros Iniciales

Dentro de los parámetros fundamentales considerados para la simulación del sistema solar térmico, se destacaron variables clave como el tiempo de operación, la DNI, la temperatura ambiente, la temperatura de entrada a los colectores, el área y el tipo de

colectores solares empleados. La validación del modelo se centró en la comparación de un parámetro crítico: la temperatura de salida del agua en los colectores solares.

Tabla 9

Datos de referencia

Parámetro	Descripción	Unidades
Tipo de colector	Tubos de vacío	-
PCM	Estearina de Palma Hidrogenada	-
Ubicación	Hotel Piedra Parada	-
Área efectiva	6,4	m ²
Eficiencia	70	%
Caudal	158,76	kg/h

En la Tabla 9, se presentan los datos de referencia utilizados, que sirvieron como base para establecer la viabilidad entre los resultados simulados en TRNSYS y los datos experimentales.

5.1.2 Datos Meteorológicos

Para llevar a cabo la simulación en TRNSYS, se emplearon tres tipos de datos esenciales: DNI, temperatura de entrada a los colectores y temperatura ambiente del sitio de estudio. Estos perfiles se obtuvieron mediante un proceso riguroso de recolección meteorológica dentro del marco del proyecto doctoral mencionado anteriormente, y se convirtieron en la base para validar el software.

En primer lugar, se llevó a cabo un tratamiento sistemático de los datos recolectados, cuyo objetivo fue estructurar perfiles horarios que luego fuesen compatibles con TRNSYS.

Para ello, se realizó una revisión y limpieza de datos donde se verificaron los datos extraídos para mantener una coherencia entre los mismos. Posteriormente, se realizó la agrupación por hora de los datos obtenidos del 15 al 23 de julio del 2024, el resultado fue un conjunto de 215 registros horarios, destinados a la etapa de validación del software. Finalmente, se creó el archivo .txt necesario para utilizar el fichero en el type 9c de TRNSYS.

Tabla 10

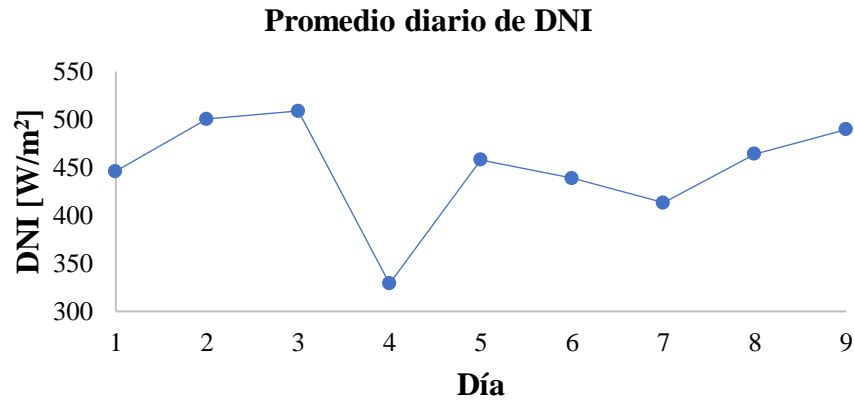
Promedios diarios de DNI, temperatura ambiente y temperatura de entrada

Fecha	DNI [W/m²]	Temperatura Ambiente [°C]	Temperatura Entrada [°C]
15/07/2024	446,15	11,16	29,80
16/07/2024	500,52	12,43	29,91
17/07/2024	508,96	12,13	29,61
18/07/2024	328,92	11,82	28,34
19/07/2024	457,87	11,94	30,28
20/07/2024	438,93	12,09	29,30
21/07/2024	413,35	11,32	27,55
22/07/2024	464,17	11,77	30,32
23/07/2024	489,54	12,13	29,56

En la Tabla 10, se muestran los perfiles horarios elaborados a partir de los 215 registros (DNI, temperatura ambiente y temperatura de entrada al colector), los cuales posteriormente fueron estructurados para su uso en TRNSYS.

Figura 2

Perfil de DNI



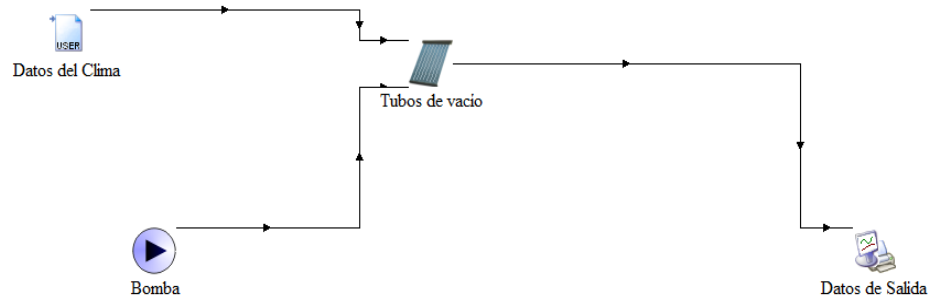
En la Figura 2, se puede observar el perfil de DNI correspondiente a una secuencia de 9 días de medición continua del sistema solar térmico instalado en el Hotel Piedra Parada, ubicado en Berlín, Santander. Del análisis se destacan dos valores representativos el pico superior de DNI en el tercer día (17/07/24) con un valor de 508,96 W/m² y el menor valor de DNI reportado el 18 de julio 2024 con un valor 328,92 W/m².

5.1.3 Montaje de la simulación en TRNSYS

El software TRNSYS permite definir criterios de simulación específicos según la ubicación geográfica y la topología del sistema en estudio. En este contexto, una vez realizado el tratamiento de datos y la elaboración del archivo correspondiente, se procede al montaje de la simulación conforme a los criterios previamente establecidos.

Figura 3

Montaje en TRNSYS



En la Figura 3 se presenta el montaje de la simulación correspondiente a la validación del software TRNSYS para el Hotel Piedra Parada. Para el estudio de verificación, se definió como criterio principal la temperatura de salida de los colectores. En este caso particular, se emplearon cuatro types propios del entorno TRNSYS, los cuales se describen a continuación:

- **Type 9c (Datos climatológicos):** Este componente es indispensable para la lectura de datos meteorológicos. Su configuración se realiza mediante un archivo de texto (.txt) con cuatro columnas con datos específicos de hora, DNI, temperatura ambiente y temperatura de entrada. En total, se establecen 215 datos correspondientes a las horas comprendidas del 15 al 23 de julio del 2024.
- **Type 114 (Bomba):** Encargado de regular el flujo de agua dentro sistema. Para este caso específico, se estableció un flujo constante de 158,76 kg/h, de acuerdo con las condiciones experimentales previamente definidas.
- **Type 71 (Tubos de vacío):** Representa uno de los elementos más relevantes en esta simulación. Permite configurar criterios claves como el área de los

colectores, el flujo de agua por metro cuadrado y la eficiencia. Gracias a estas opciones de personalización, se logra una representación más fiel del comportamiento térmico observado en las pruebas experimentales.

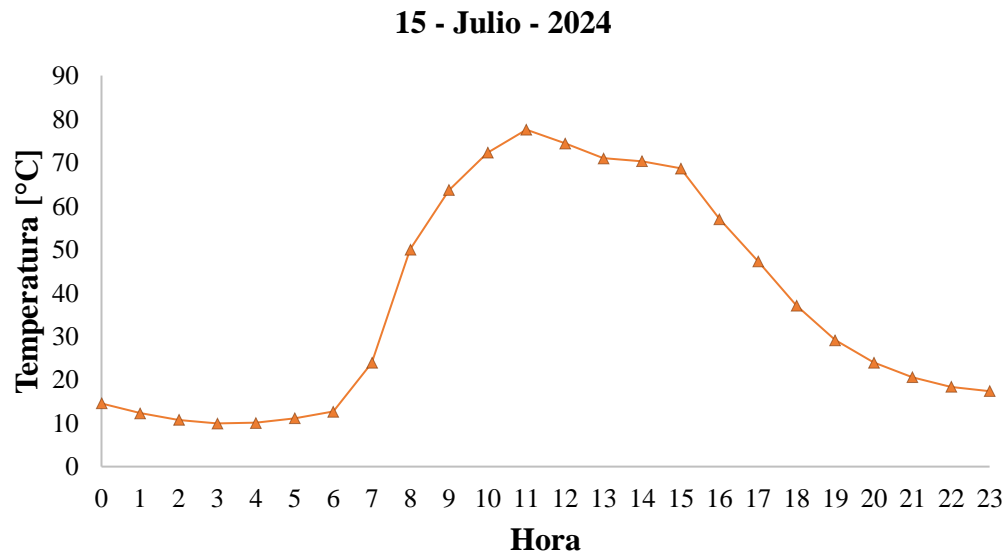
- **Type 65d (Datos de salida):** Su función principal es la extracción y visualización de los datos obtenidos en la simulación. Este Type fue seleccionado debido a su capacidad para mostrar los datos de forma inmediata y exportarlos a un archivo en formato Excel (.xls), facilitando así su análisis posterior.

5.1.4 Extracción de datos

A continuación, se presentan los datos experimentales de temperatura de salida de los colectores, los cuales serán comparados con los resultados obtenidos a partir de la simulación en TRNSYS. El objetivo de esta comparación es determinar el promedio de diferencia de temperatura entre ambos conjuntos de datos, bajo las condiciones previamente establecidas para el estudio.

Figura 4

Evolución diaria de la temperatura de salida de los colectores (°C)

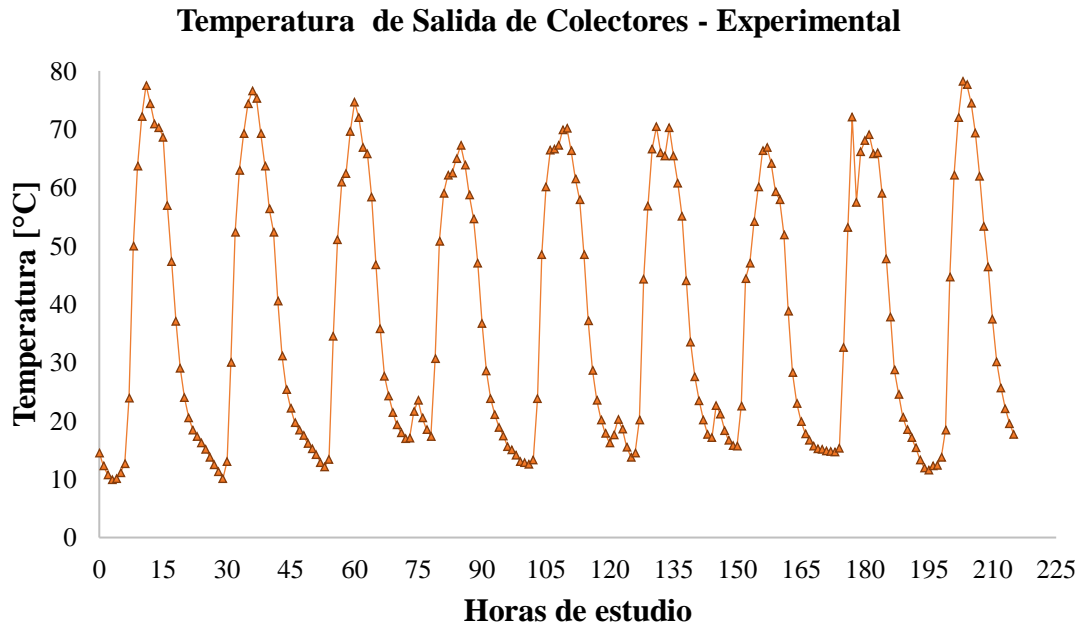


La Figura 4 muestra la evolución de la temperatura de salida de los colectores durante un día representativo de operación. Durante las primeras seis horas, la temperatura se mantuvo por debajo de 13 °C; posteriormente, presentó un incremento sostenido hasta aproximadamente las 11:00 am, momento en el cual se alcanzan los valores máximos de temperatura. Después de este punto, se observa un descenso gradual asociado a la disminución del recurso solar.

A continuación, la Figura 5 ilustra la evolución diaria de la temperatura de salida de los colectores en los nueve días, permitiendo identificar tendencias comunes en el comportamiento térmico durante el periodo de estudio.

Figura 5

Datos experimentales - Hotel Piedra Parada



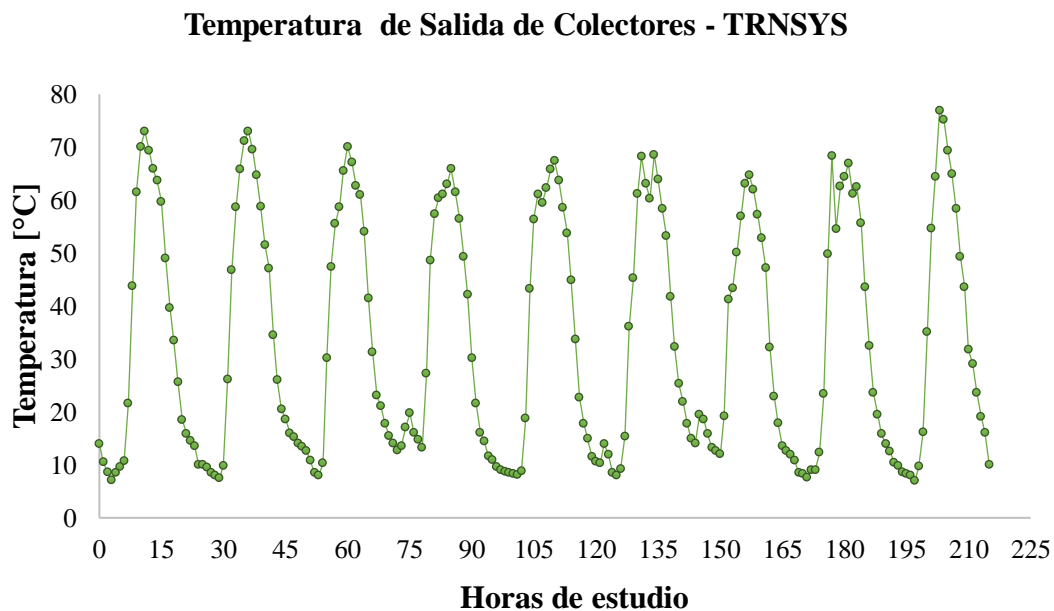
En la Figura 5 se presenta el comportamiento experimental de la temperatura de salida de los colectores durante los nueve días analizados, considerando la recirculación del agua tras su paso por el tanque con PCM. Se observa una tendencia térmica consistente entre las distintas jornadas, aunque con variaciones en las temperaturas máximas alcanzadas, asociadas principalmente a la disponibilidad del recurso solar.

Entre los valores más elevados destacan los registrados el 15 y 23 de julio a las 11:00 am, con temperaturas de 77,54 °C y 78,26 °C, respectivamente. En contraste, durante los días con menor disponibilidad de DNI se presentan reducciones significativas en el desempeño térmico del sistema, alcanzando temperaturas cercanas a 9 °C en las horas de menor radiación.

En general, se identifica una relación directa entre el comportamiento del DNI y la temperatura de salida de los colectores, evidenciando que mayores niveles de radiación solar favorecen un incremento en el desempeño térmico del sistema.

Figura 6

Datos teóricos - TRNSYS



En la Figura 6 se presentan los resultados simulados en TRNSYS para la temperatura de salida de los colectores solares durante el periodo de estudio. Se observa que el modelo reproduce una tendencia térmica consistente con el comportamiento experimental previamente analizado, evidenciando incrementos de temperatura durante las horas de mayor disponibilidad de radiación solar y descensos progresivos al final de la jornada.

Los días 15, 16 y 23 de julio presentan las temperaturas simuladas más elevadas, superando los 70 °C, mientras que el 21 de julio registra el menor desempeño térmico, con una temperatura máxima aproximada de 63,10 °C. Estas variaciones reflejan la influencia

directa de las condiciones meteorológicas sobre la respuesta térmica del sistema y evidencian la capacidad del modelo para representar cambios asociados a la disponibilidad de DNI.

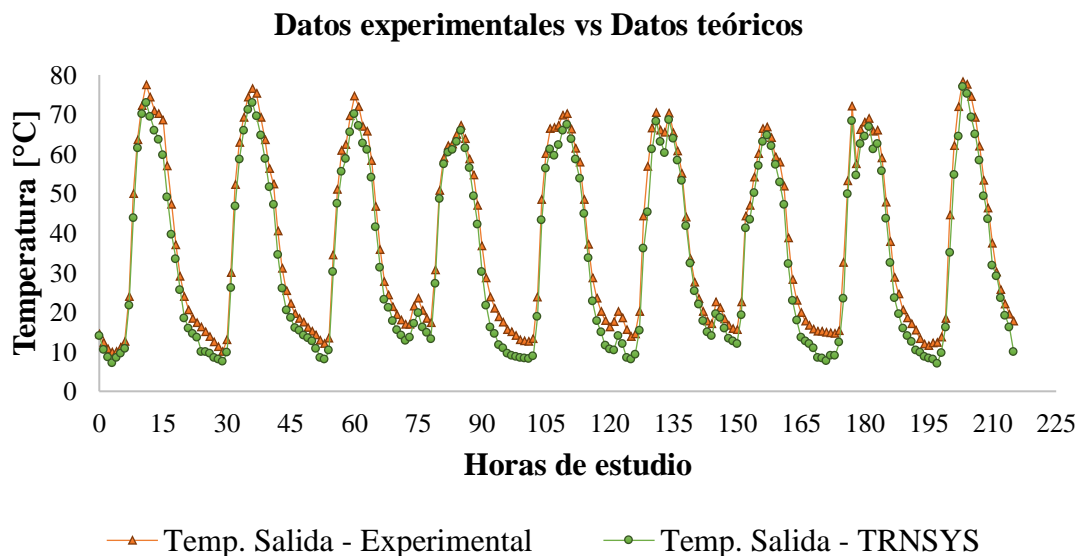
5.1.5 Datos experimentales vs Datos teóricos

Finalmente, se realiza la comparación entre los dos escenarios previamente planteados, con el objetivo de identificar similitudes y diferencias relevantes. Este proceso tiene como propósito establecer la confiabilidad de TRNSYS como una herramienta adecuada para el desarrollo de estudios futuros en distintas ubicaciones geográficas.

Aunque el parámetro principal de validación fue la temperatura de salida de los colectores, esta variable integra indirectamente la respuesta térmica global del sistema bajo las condiciones de operación definidas, incluyendo efectos asociados a la radiación solar incidente, la temperatura ambiente, el caudal del fluido y el desempeño térmico del colector. En este sentido, la comparación entre los resultados experimentales y simulados permitió evaluar la coherencia general del modelo implementado.

Figura 7

Validación del software TRNSYS



En la Figura 7 se presentan de manera superpuesta los perfiles de temperatura experimentales y simulados obtenidos mediante TRNSYS. Se observa una adecuada concordancia entre ambas curvas a lo largo de las 215 horas evaluadas, especialmente durante los periodos de mayor radiación solar.

La diferencia promedio obtenida entre los datos experimentales y simulados fue de aproximadamente 4,27 °C, siendo más notorias las discrepancias durante las horas finales del día, donde el modelo presenta un descenso térmico ligeramente más pronunciado. Estas diferencias pueden estar asociadas a simplificaciones adoptadas durante la modelación, tales como condiciones de operación constantes y la no consideración de pérdidas térmicas menores.

No obstante, el comportamiento general del modelo presenta una tendencia coherente con los datos experimentales, lo que respalda la capacidad de TRNSYS para representar adecuadamente el desempeño térmico del sistema bajo las condiciones evaluadas.

5.2 Caracterización La Demanda De Calor Y Disponibilidad De Irradiación Solar

En esta sección, se realizan los perfiles de irradiación solar directa (DNI), temperaturas disponibles y demanda de calor correspondientes a los tres casos de estudio mencionados en la metodología. La Tabla 11 establece las coordenadas geográficas exactas y el tipo de caso de estudio para cada sitio.

Tabla 11

Casos de estudio seleccionados

	Tipo	Aplicación	Ubicación	Coordenadas	
Caso 1	Residencial	Escalamiento hotel Piedra Parada	Berlín	7.148	-72.905
Caso 2	Agroindustrial	Fabricación de mermelada	Pamplona	7.199	-72.879
Caso 3	Industrial	Manufactura de manguera	Girón	7.110	-73.163

5.2.1 Caracterización De Irradiación Solar Directa (DNI) Y Temperatura

Inicialmente, se procedió a extraer los perfiles horarios de irradiancia normal directa (DNI) y temperatura ambiente correspondientes al año 2023 desde la plataforma PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) del JRC-Europa, para las tres ubicaciones especificadas en la Tabla 11. Los datos fueron descargados en formato CSV con resolución horaria, correspondientes a un total de 8760 registros anuales, los cuales constituyen la base de entrada para la simulación de los casos de estudio. Los perfiles horarios obtenidos se presentan de manera detallada en el Apéndice A, donde se consolidan todos los datos empleados.

La irradiancia DNI representa la radiación solar incidente en una superficie perpendicular a la dirección de los rayos solares. Por lo tanto, para su aplicación en el modelo, es necesario considerar la orientación e inclinación del colector, parámetros que permiten determinar la radiación efectiva sobre la superficie del mismo. En este estudio, los colectores se orientaron hacia el sur (azimut de 180°) y se emplearon ángulos de inclinación definidos en función de la latitud de cada ubicación, con el fin de maximizar la captación de energía solar.

Dentro de TRNSYS, el modelo del colector solar térmico emplea la información de radiación solar junto con los parámetros geométricos del sistema, tales como el ángulo de inclinación y el azimut, para determinar la radiación incidente efectiva sobre la superficie del colector. Para este trabajo, se manejaron ángulos de inclinación de 7.1° y un azimut de 180° para todos los casos de estudio.

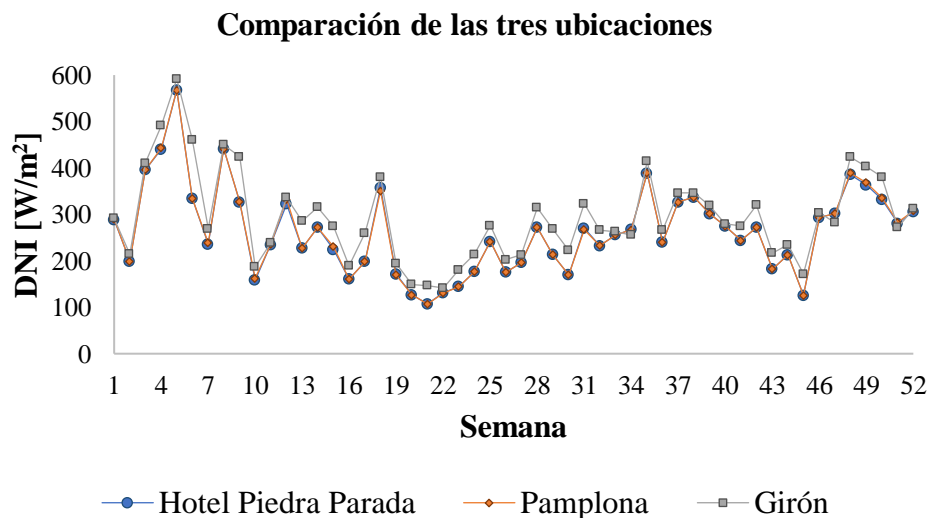
De esta manera, la integración de los datos climáticos horarios con el modelo de simulación transitoria permite evaluar el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones reales de operación, garantizando la coherencia entre el recurso solar disponible y la respuesta del sistema térmico.

En esta sección se presentan los perfiles semanales de DNI y temperatura para cada una de las tres ubicaciones seleccionadas, con el objetivo de analizar su evolución a lo largo de las 52 semanas del año y facilitar la comparación entre los sitios, identificando diferencias y similitudes en la disponibilidad del recurso solar y las condiciones térmicas.

5.2.1.1 Irradiación Solar Directa (DNI). Con el fin de analizar el comportamiento del DNI según las condiciones geográficas y climáticas de cada ubicación mencionada en la Tabla 11, se realiza una comparación de los perfiles semanales de DNI descargados desde PVGIS para el año 2023. Esta comparación permite identificar similitudes y diferencias en los patrones de radiación solar, información que resulta fundamental para evaluar la viabilidad y el rendimiento potencial de los sistemas solares térmicos en cada uno de los contextos estudiados.

Figura 8

Estudio de los tres perfiles de DNI



Nota. Se observa que los perfiles de la variable DNI correspondientes al Hotel Piedra Parada y Pamplona resultan prácticamente coincidentes. Por tal razón, las curvas de ambas ubicaciones se solapan en casi toda la extensión del gráfico.

Para evaluar simultáneamente el comportamiento del DNI en las tres ubicaciones seleccionadas, se realizó un análisis conjunto basado en una única gráfica comparativa

(Figura 8) en la cual se integran los perfiles semanales de DNI correspondientes al año 2023. A partir de esta representación se llevó a cabo el siguiente análisis.

En el caso del Hotel Piedra Parada, se observa un pico máximo de DNI durante la semana 5 (29 de enero al 4 de febrero), alcanzando un valor de 567,84 W/m². Este valor supera en aproximadamente 23 % y 41 % a los registrados en las semanas 4 y 6, respectivamente. El promedio semanal más bajo se presenta en la semana 21 (21–27 de mayo), con un valor de 107,09 W/m². El perfil correspondiente a Pamplona muestra un comportamiento muy similar al del Hotel Piedra Parada dentro de la misma gráfica por lo cual se puede observar cómo los perfiles se solapan entre sí durante la mayoría del año. Nuevamente se puede observar el pico máximo en la semana 5, con un valor de 567,88 W/m². Finalmente, en Girón la gráfica revela igualmente un máximo en la semana 5, alcanzando 591,80 W/m².

Es importante resaltar que el perfil semanal de las tres ubicaciones presenta un comportamiento general similar, como se observa en la Figura 8. No obstante, al analizar las particularidades de los perfiles, se evidencia que las ubicaciones del Hotel Piedra Parada y Pamplona muestran una alta concordancia, con curvas que se superponen en la mayor parte del año. En estos casos, las variaciones porcentuales se mantienen entre 0,004 % y 2,83 %, siendo esta última la diferencia más alta registrada a lo largo del año, correspondiente a la semana 12, con una variación aproximada de 9 °C.

Por otro lado, la discrepancia más significativa se presenta entre la ubicación de Girón y las otras dos localidades. Esta diferencia alcanza su valor máximo en la semana 6, correspondiente al período comprendido entre el 5 y el 11 de febrero, donde se observa una variación aproximada del 27 %, equivalente a una diferencia de 126 W/m² en los valores de irradiancia directa normal (DNI) entre Girón y las demás ubicaciones analizadas.

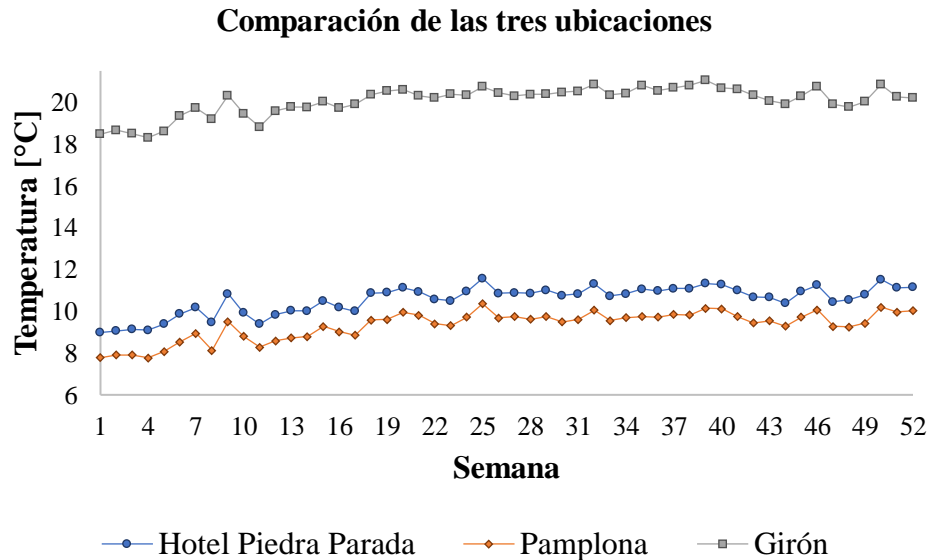
En conclusión, la comparación de los perfiles de DNI para las tres ubicaciones analizadas permite evidenciar una tendencia general similar en el comportamiento de la irradiancia a lo largo del año, con valores por encima de los 140 W/m^2 lo cual indica condiciones favorables para la implementación de sistemas solares térmicos en todas las zonas estudiadas. No obstante, Girón presenta variaciones más marcadas en ciertos periodos, como en la semana 6. Estas diferencias deben considerarse al dimensionar y optimizar los sistemas para cada aplicación específica.

5.2.1.2 Temperatura Ambiente. Como complemento al análisis del DNI, se realizó un estudio comparativo de la temperatura ambiente en las tres ubicaciones analizadas. Esta variable climática es determinante para el desempeño térmico de los sistemas solares, ya que influye directamente en la eficiencia de captación y en las pérdidas de calor.

Una vez obtenidos los perfiles de temperatura ambiente en cada una de las tres ubicaciones: Hotel Piedra Parada, Pamplona y Girón, se realizó una comparación general con el fin de identificar similitudes y diferencias relevantes. Este análisis permitió evaluar cómo las condiciones térmicas varían según la altitud y ubicación geográfica.

Figura 9

Estudio de los tres perfiles de Temperatura Ambiente



En la Figura 9 se presenta la comparación de la temperatura ambiente en las tres ubicaciones correspondientes a los casos de estudio previamente definidos. Se observa que las ubicaciones del Hotel Piedra Parada y Pamplona presentan un comportamiento térmico similar, con valores de temperatura que oscilan entre 7 °C y 12 °C. La menor variación entre ambas localidades se registra en la semana 52 del año, con una diferencia porcentual aproximada del 10 %. En contraste, la ubicación de Girón presenta temperaturas considerablemente más elevadas, con un diferencial promedio de al menos 9 °C respecto a las otras dos localidades. En la comparación con el Hotel Piedra Parada, la máxima diferencia se presenta en la semana 17, alcanzando un valor de 9,89 °C, equivalente a un 50 %. Por su parte, en la comparación con Pamplona, se observa la mayor discrepancia térmica en la semana 8, con una diferencia de 11,08 °C, correspondiente a un 58 %. Estas diferencias

evidencian la influencia significativa de la altitud y de las condiciones climáticas locales en el comportamiento térmico característico de cada sitio de estudio.

En el caso del Hotel Piedra Parada, la temperatura ambiente presenta valores que oscilan entre 8 °C y 12 °C a lo largo del año. El máximo ocurre en la semana 25 (18–24 de junio), con 11,57 °C, mientras que el valor mínimo se registra en la primera semana del año con 8,98 °C. Su promedio anual de 10,55 °C evidencia que esta ubicación mantiene temperaturas frías con variaciones moderadas, característica propia de zonas de alta montaña.

Pamplona muestra un comportamiento térmico similar al del Hotel Piedra Parada, con valores comprendidos entre 7 °C y 11 °C. Al igual que en Piedra Parada, el pico anual se presenta en la semana 25, alcanzando 10,36 °C, mientras que las semanas 1 a 4 concentran las temperaturas más bajas del año, todas ligeramente por debajo de los 8 °C. Este patrón confirma que ambas ubicaciones comparten condiciones climáticas frías y estables.

Por otro lado, Girón exhibe un comportamiento térmico claramente diferenciado. Las temperaturas se mantienen por encima de los 18 °C durante todo el año, con un promedio anual de 20,07 °C. El valor máximo se registra en la semana 39 (24–30 de septiembre), alcanzando 21,05 °C, mientras que el mínimo aparece en enero con un promedio de 18,49 °C. Este comportamiento evidencia un clima cálido y estable, propio de zonas de menor altitud y con menor variación térmica estacional.

El análisis conjunto de DNI y la temperatura ambiente en las tres ubicaciones permite establecer diferencias significativas en el comportamiento climático que influyen directamente en el desempeño esperado de los sistemas solares térmicos para aplicaciones residenciales, agroindustriales e industriales. El estudio y comparación de estas tres

ubicaciones permitió establecer las diferencias de DNI y temperatura ambiente para cada caso de estudio para finalmente realizar los ficheros climáticos ligados a cada ubicación para realizar la aplicación del software TRNSYS en cada caso de estudio.

5.3 Caracterización De Demanda De Energía

Posterior al análisis climático se llevó a cabo la caracterización de la demanda energética en cada uno de los casos de estudio. Este paso resulta fundamental para establecer los requerimientos térmicos asociados a los procesos desarrollados en cada ubicación.

5.3.1 Caso 1: Residencial - Escalamiento Hotel Piedra Parada - Berlín.

Teniendo en cuenta el aporte del solar térmico a la transición energética en Colombia en 2024, se estima una demanda promedio de agua caliente sanitaria (ACS) de 50 litros/persona para zonas de alta montaña (Bertinat & Navntoft, 2024). A partir de esta referencia, se establece una relación directa entre dicha demanda y la energía requerida para abastecer al Hotel Piedra Parada. Adicionalmente, se contempla la utilización de un radiador como fuente complementaria para calefacción, con un tiempo promedio de funcionamiento diario de 8 horas, con el fin de cubrir las necesidades térmicas interiores en las horas de mayor requerimiento.

Para el cálculo de la demanda de calor en el Hotel Piedra Parada, se emplean los conceptos de calor sensible y calor latente previamente descritos en el marco teórico. En particular, se utiliza la ecuación general para el cálculo de la energía térmica requerida, presentada originalmente como la Ecuación (1) y reproducida a continuación para facilitar su aplicación en este apartado:

$$Q = \int_{T_1}^{T_m} mc_{p,s}dT + m\Delta H + \int_{T_m}^{T_2} mc_{p,l}dT$$

Estos conceptos permiten estimar de manera precisa la energía requerida, considerando tanto el incremento de temperatura del fluido como los procesos de cambio de fase que puedan presentarse. En el caso del agua caliente sanitaria (ACS), se determina la energía necesaria para elevar la temperatura del agua desde su valor inicial hasta la temperatura de servicio establecida. En cuanto a la calefacción mediante radiadores, se cuantifica el calor sensible necesario para mantener las condiciones de confort térmico durante el periodo de uso diario estimado. De esta forma, se establece una base técnica sólida para dimensionar la contribución del sistema solar térmico y evaluar su capacidad de cubrir la demanda en condiciones reales de operación.

Tabla 12

Parámetros iniciales de energía requerida

ACS		
Promedio de Temperatura	9	°C
Temperatura Final	40	°C
Cp	4,186	kJ/kg°C
Demanda de agua	50	litros/persona
Promedio de personas	3	
Pods (habitáculo)	12	
Calefacción		
Radiador	1500	w
Horas de uso	8	h

Nota. Esta tabla fue elaborada con base en los parámetros utilizados para el caso de estudio del Hotel Piedra Parada, tomando como referencia los datos obtenidos de la estación experimental reportada por (Lizcano-González, 2025).

En la Tabla 12 se presentan los parámetros iniciales empleados para el cálculo de la demanda mínima de energía necesaria para abastecer con agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción a los 12 pods (habitáculos) ubicados en el Hotel Piedra Parada.

Una vez realizado el cálculo de la demanda diaria de energía, se obtuvieron los resultados que se resumen a continuación en la Tabla 13. Estos valores reflejan el requerimiento energético total para satisfacer las necesidades de agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción en los 12 pods del Hotel Piedra Parada, considerando las condiciones establecidas en los parámetros iniciales.

Tabla 13

Requerimientos energéticos

Tipo de aplicación	Demanda por día [kJ/día]
Agua Caliente Sanitaria	233578,8
Calefacción	518400
Total	751978,8

A partir de este valor, se procede a calcular la cantidad de estearina de palma hidrogenada que, actuando como material de cambio de fase (PCM), permitirá almacenar la energía necesaria para cubrir la demanda térmica del sistema.

Para este propósito, se emplean las propiedades térmicas del material obtenidas experimentalmente mediante análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), lo cual garantiza una representación más precisa del comportamiento real del PCM bajo condiciones

de operación. En particular, se consideran la entalpía de cambio de fase, la capacidad calorífica y los rangos de temperatura de fusión y solidificación, parámetros fundamentales para estimar la energía almacenada tanto en forma de calor sensible como latente.

En la siguiente tabla se resumen los criterios y parámetros fundamentales considerados para el desarrollo de este cálculo.

Tabla 14

Propiedades de la Estearina de palma hidrogenada - PCM

Estearina de palma hidrogenada - PCM		
Rango temperatura de fusión	49,7 - 59,9	°C
Rango temperatura de solidificación	46,6 - 38,3	°C
Entalpía de fusión	228	kJ/kg
Entalpía de solidificación	188,6	kJ/kg
C _p	1,98	kJ/kg °C
Temperatura mínima final	60	°C

Nota. Esta tabla fue elaborada con base en los parámetros utilizados para el caso de estudio del Hotel Piedra Parada, tomando como referencia los datos obtenidos de la estación experimental reportada por (Lizcano-González, 2025).

Con base en los parámetros establecidos en la Tabla 14 y aplicando el correspondiente despeje de la Ecuación (1), se determinó la masa mínima de PCM requerida para almacenar la energía mínima calculada en la Tabla 13.

$$m = \frac{Q}{H_{\text{cristalización}} + (C_p * \Delta T)}$$

Donde m corresponde a la masa mínima del PCM requerida, Q es la energía en forma de calor mínima determinada para esta aplicación, H la entalpía de cristalización del PCM,

Cp la capacidad calorífica y ΔT la diferencia de temperatura de solidificación y la temperatura final a la que deseo llevar el material. Finalmente se obtiene:

$$m = \frac{751978,8}{188,6 + (1,98 * 60 - 46,6)} = 3495,42 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta el resultado obtenido, se determina que se requiere una masa mínima aproximada de 3500 kg de PCM para suministrar 751978,8 kJ diarios de energía que comprende la necesidad de ACS y calefacción, alcanzando una temperatura mínima de 60 °C. Posteriormente, en la Tabla 15 se presenta la relación entre la masa de PCM y la temperatura final, con el fin de estimar la energía que podría entregarse para las aplicaciones en estudio variando la masa de PCM disponible y la temperatura final.

Tabla 15

Energía mínima requerida por la aplicación

Masa PCM [kg]	Temperatura [°C]				
	60	65	70	75	80
3500	752962	787612	822262	856912	891562
4000	860528	900128	939728	979328	1018928
4500	968094	1012644	1057194	1101744	1146294
5000	1075660	1125160	1174660	1224160	1273660
5500	1183226	1237676	1292126	1346576	1401026
6000	1290792	1350192	1409592	1468992	1528392
6500	1398358	1462708	1527058	1591408	1655758
7000	1505924	1575224	1644524	1713824	1783124
7500	1613490	1687740	1761990	1836240	1910490
8000	1721056	1800256	1879456	1958656	2037856

En la Tabla 15 se observa que existe una relación directa entre la masa de PCM y la energía entregada, así como entre la temperatura final del sistema y dicha energía. Un

incremento en la temperatura del sistema, manteniendo constante la masa, permite suministrar más energía que la requerida; de igual manera, al aumentar la masa de PCM manteniendo la temperatura constante, se registra un aumento proporcional en la energía disponible.

Ahora bien, es importante resaltar que, para suministrar la energía planteada previamente, es necesario determinar qué fracción de esta se destina específicamente al proceso de almacenamiento mediante el cambio de fase del material. Para ello, se aplicó la misma relación de cálculo, sustituyendo la entalpía de cristalización por la entalpía de fusión del PCM y estableciendo una temperatura mínima de 40°C.

Tabla 16

Energía necesaria para fundir el PCM

Masa PCM [kg]	Temperatura [°C]				
	60	65	70	75	80
3500	936600	971250	1005900	1040550	1075200
4000	1070400	1110000	1149600	1189200	1228800
4500	1204200	1248750	1293300	1337850	1382400
5000	1338000	1387500	1437000	1486500	1536000
5500	1471800	1526250	1580700	1635150	1689600
6000	1605600	1665000	1724400	1783800	1843200
6500	1739400	1803750	1868100	1932450	1996800
7000	1873200	1942500	2011800	2081100	2150400
7500	2007000	2081250	2155500	2229750	2304000
8000	2140800	2220000	2299200	2378400	2457600

Al comparar los resultados de la Tabla 15 y la Tabla 16, se observa que la energía requerida para fundir el PCM y efectuar el almacenamiento térmico es superior a la energía

que el sistema entregará posteriormente. Este comportamiento se asocia a la histéresis térmica del material, evidenciada en la diferencia entre la entalpía de fusión y la entalpía de solidificación, determinada experimentalmente mediante análisis DSC.

En particular, dado que la entalpía de fusión es mayor que la de solidificación, el sistema requiere una mayor cantidad de energía para cargar el material de la que posteriormente puede recuperar durante su descarga. En consecuencia, para el dimensionamiento y la definición de los requerimientos mínimos de la demanda energética, se adoptan como referencia los valores calculados a partir de la entalpía de fusión (Tabla 16), ya que estos representan la condición más exigente desde el punto de vista energético y garantizan la viabilidad del almacenamiento térmico bajo condiciones reales de operación.

5.3.2 Caso 2: Agroindustrial - Fabricación De Mermelada – Pamplona

En Colombia, la Norma Técnica Colombiana 285 define la mermelada como un producto de consistencia pastosa, que es obtenida por la cocción y concentración de una o más frutas, al cual se le agregan edulcorantes naturales, con la adición o no de agua y aditivos permitidos (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015). Dentro de los parámetros mínimos para la realización de la mermelada debe elaborarse con al menos el 40 % en masa de fruta en este caso específico el durazno; además, debe contener un porcentaje mínimo de sólidos solubles de 60 % en producto terminado (Laborde , 2024).

Es importante destacar que la concentración de azúcar influye de manera determinante en el grado de gelificación del producto (Laborde , 2024). En la Tabla 17 se presentan las propiedades relevantes para calcular la demanda de calor teniendo como base de cálculo 1 kg de mermelada.

Tabla 17

Datos de entrada para el cálculo de la demanda de calor en la elaboración de mermelada

Datos de entrada		
Cp durazno	3,77	kJ/kg °C
Cp agua	4,186	kJ/kg °C
% Agua del durazno	85,1	%
Base de calculo	1	kg
Relación F/A	55/45	-
Solido en la mermelada	60	%
Agua en la mermelada	40	%
Temperatura Inicial	25	°C
Temperatura Final	85	°C
Calor latente agua	2257	kJ/kg

Nota. Datos obtenidos de (Orrego Alzate, 2003)

Una vez definidos los criterios anteriores, se procedió a calcular la demanda térmica del proceso de elaboración de mermelada aplicando los conceptos de calor sensible y calor latente (Ecuación (1)). Para ello se formuló la expresión matemática que cuantifica la energía requerida para elevar la temperatura de la masa de fruta hasta la temperatura de cocción y para evaporar la cantidad de agua necesaria para alcanzar el grado de sólidos solubles deseado. Los parámetros utilizados en los cálculos incluyen masa de materia prima, calor específico de la pulpa, variación de temperatura y masa de agua evaporada; las unidades y procedimientos de cálculo se especifican a continuación.

Inicialmente se usó el % de agua que tiene el durazno para de esa manera calcular la cantidad de solidos de fruta como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18

Composición del durazno

Características de la fruta	Peso [kg]
Mermelada de durazno	1
Agua del durazno	0,851
Durazno Solido	0,149

Posteriormente se realiza un balance de sólidos de la mermelada, estableciendo:

$$0,6 = \text{Solidos de la fruta} + \text{azúcar}$$

$$0,6 = 0,149F + A \quad (2)$$

Haciendo uso de la relación establecida entre la fruta (F) y el azúcar (A) en la tabla 17 se realiza el reemplaza en la ecuación (2) y se obtiene

$$\frac{F}{A} = \frac{0,55}{0,45}$$

$$A = \frac{0,45}{0,55}F \quad (3)$$

Finalmente reemplazando en la ecuación 2, se obtiene:

$$0,6 = 0,149F + \frac{0,45}{0,55}F \quad (4)$$

$$F = \frac{0,6}{0,149 + \frac{0,45}{0,55}} = 0,6204 \text{ kg}$$

Tabla 19

Datos finales de la mermelada

Datos obtenidos	Peso [kg]
F	0,6204
A	0,5076
Agua inicial del durazno	0,5279
Agua final de la mermelada	0,4000
Agua para evaporar	0,1279

Con los datos de la Tabla 19 se calcularon el calor sensible y el calor latente asociados al proceso de fabricación de la mermelada. Los cálculos se realizaron por unidad de producto (1 kg) y consideran: calentamiento de la mezcla desde 25 °C hasta 85 °C; elevación de la masa de agua en exceso (0,1279 kg) desde 85 °C hasta el punto de ebullición; y la posterior vaporización de dicha masa de agua.

Tabla 20

Energía necesaria para la fabricación de 1 kg de mermelada de durazno

Energía [kJ]	
Q sensible	258,33
Q latente	288,73
Q total	547,06

En la Tabla 20 se presenta la energía térmica requerida para la producción de 1 kg de mermelada de durazno (521,10 kJ/kg). Escalando a la producción mensual media de las PYMES (Pequeñas Y Medianas Empresas) en Colombia 99402,25 kg/mes, equivalente al 20

% de la producción nacional anual reportada por (Barón González, 2022), la demanda térmica teórica de proceso resulta en aproximadamente 54378772,7 kJ/mes.

5.3.3 Caso 3: Industrial - Manufactura De Manguera - Girón

Dentro de la manufactura de mangueras se destaca el sector de la manguera hidráulica, el cual ha ganado robustez debido al aumento en la demanda en sectores como la construcción, la agricultura y la automatización industrial (Global Growth Insights, 2025). Según este reporte, más del 45 % de la demanda global proviene del sector de la construcción, mientras que el sector agrícola también representa una fracción significativa. Además, los sectores con automatización industrial participan de forma relevante en la demanda, especialmente en aplicaciones manufactureras que requieren sistemas hidráulicos confiables y de alto desempeño (Global Growth Insights, 2025).

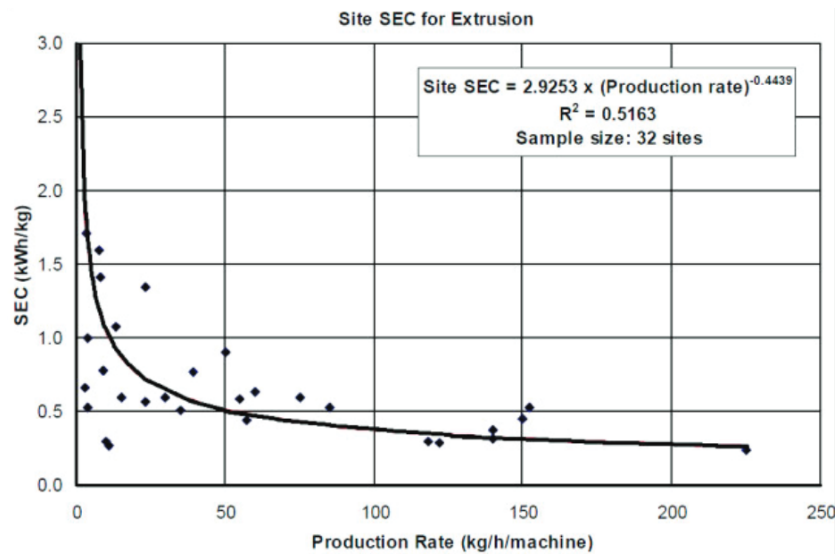
El proceso de manufactura de mangueras consta de varias etapas: preparación del PVC (filtrado y acondicionamiento térmico), extrusión mediante tornillo extrusor controlando temperatura, velocidad y presión, y finalmente enfriamiento y corte según los requerimientos operativos. En un escenario ideal, el accionamiento del tornillo consume alrededor del 50% de la energía total; el 50% restante corresponde a calentamiento, enfriamiento, equipos auxiliares y servicios (Vargas Isaza, Posada Correa, Jaramillo Zapata, & García, 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, para estimar la demanda energética del proceso se estableció la correlación matemática ICIPC, la cual relaciona el flujo de material procesado con el consumo energético de la extrusora. En la Figura 10 se observa la curva de operación obtenida por Tangram Technology, que representa la relación entre el consumo específico de

energía y la tasa de producción (Vargas Isaza, Posada Correa, Jaramillo Zapata, & García, 2015), basada en datos obtenidos de aproximadamente 98 empresas a nivel mundial.

Figura 10

Relación entre el consumo específico de energía y la tasa de producción según ICIPC



Teniendo en cuenta la Figura 10, se estableció la correlación matemática ICIPC, la cual define una relación lineal entre el flujo de materia prima procesada y el consumo energético de la extrusora, donde el consumo energético (kWh) se modela como función del volumen de producción (kg/h), según:

$$SEC = 2,9253 * (production\ rate)^{-0,4439} \tag{5}$$

Donde:

- SEC: Consumo energético específico de la extrusora [kWh]
- Production rate: flujo del material [kg/h]

Para estimar la demanda energética del proceso, se realizó una revisión de tipos de extrusoras que permiten dimensionar su capacidad de salida entendida como la masa de

producto que la extrusora puede generar por hora bajo condiciones de operación continua, alimentación adecuada, temperatura óptima y sin interrupciones. Esta capacidad de salida (kg/h) sirve como variable clave para la modelación de la demanda energética del proceso. A continuación, en la Tabla 21, se establecen algunos tipos de extrusoras con sus diferentes características.

Tabla 21

Ejemplos de extrusoras

Nombre	Diámetro mínimo [mm]	Diámetro máximo [mm]	Capacidad de salida [kg/h]
Krauss Maffei	280	800	1100
KME 105-36 B/R			
Beier BRD 60/38	20	160	500
Olmas C2/90	10	55	60

La elección de la extrusora depende de las necesidades específicas del fabricante. Para los cálculos de demanda energética de este proyecto se seleccionó la extrusora Beier BRD-60/38, asumiendo una capacidad de salida de 500 kg/h bajo condiciones de operación continua, alimentación adecuada, temperatura óptima y sin interrupciones. Utilizando la ecuación (5), se obtiene:

$$SEC = 2,9253 * (500)^{-0,4439} = 0,1854 kWh$$

Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó un consumo específico de energía de 0,1854 kWh por kilogramo para la extrusora seleccionada en este estudio. Sobre la base de una jornada de trabajo de 8 horas diarias y un flujo de materia prima de 4.000 kg/día, se calcularon los requerimientos energéticos diarios necesarios para su operación continua.

Estos indican que la extrusora demandaría aproximadamente 741,6 kWh/día o 2669760 kJ/diarios bajo las condiciones estipuladas.

5.4 Topología De Sistemas Solares Térmicos Como Alternativa De Suministro De Calor En Tres Casos De Estudio

5.4.1 Características Principales De Los Casos De Estudio

Con el propósito de evaluar el equilibrio entre rendimiento térmico y costos, se estudiaron colectores solares tipo ETC y PTC. Para cada tipo, se consideraron tres opciones comerciales (ver Tabla 22), de las cuales se seleccionaron dos variantes para el análisis, conforme a los criterios definidos en la metodología.

Tabla 22

Opciones comerciales de colectores ETC y PTC

Tubos de vacío - ETC				
Nombre	Alto [m]	Ancho [m]	Eficiencia [%]	Precio USD/U
Heat Pipe Solar	2,02	1,825	73,4	1,190.10
ThermoPower™	0,042	0,056	70	1,439.94
HSC-20	1,8	0,15	70	850
Cilindro Parabólico - PTC				
Nombre	Apertura [m]	Longitud [m]	Eficiencia [%]	Precio USD/m²
Ultimate Trough	7,51	24,5	95	178
SunBeam	8,2	21	75,6	120
SkyTrough	6	13,9	75	170

En la Tabla 23 se presentan las dos variantes seleccionadas por cada tipo de colector (ETC y PTC), elegidas con base en criterios definidos anteriormente, destacando la eficiencia térmica y el costo como las características más relevantes.

Tabla 23

Variantes seleccionadas de colectores ETC y PTC utilizadas en las simulaciones

Tubos de vacío - ETC			
Nombre	Área por unidad [m²]	Eficiencia [%]	Precio USD/unidad
Heat Pipe Solar	3,6865	73,4	1,190.10
HSC-20	5,4	70	850
Cilindro Parabólico - PTC			
Nombre	Área por unidad [m²]	Eficiencia [%]	Precio USD/m²
Ultimate Trough	183,995	95	178
SunBeam	172,2	75,6	120

Además de determinar los tipos de colectores a utilizar, la selección del fluido caloportador es un paso crucial, pues es el medio mediante el cual la energía captada puede transportarse o transferirse directamente a la carga térmica. En este estudio, el fluido caloportador fluye por los colectores descritos en la Tabla 23, absorbe calor y puede actuar ya sea como agente de transferencia directa o como medio de transporte hacia el sistema térmico (De Miguel Gamo, 2019). En la Tabla 24, se presentan algunas de las propiedades más relevantes del fluido escogido para este estudio. Estas características fueron seleccionadas por su influencia directa en la eficiencia del transporte de calor, la estabilidad operativa y el desempeño térmico del sistema.

Tabla 24

Características del fluido caloportador

DYNALENE MS-1	
Densidad [kg/m ³]	1930
Capacidad Calorífica Cp [kJ/kg °C]	1,61
Conductividad [W/m ²]	0,5
Máxima temperatura de trabajo [°C]	565

Una vez definidas las configuraciones de los sistemas solares térmicos, incluyendo el tipo de colector, el fluido caloportador y la topología de cada caso de estudio, se procede a la simulación de su comportamiento energético en el entorno TRNSYS.

Las simulaciones se desarrollaron bajo un enfoque transitorio con resolución horaria (8760 datos anuales), lo que permite capturar la variabilidad del recurso solar y la respuesta dinámica del sistema térmico a lo largo del tiempo. Este enfoque resulta fundamental para evaluar con precisión el desempeño de los sistemas en condiciones reales de operación.

Es importante destacar que las configuraciones analizadas presentan diferencias en su arquitectura. En los casos que emplean únicamente aceite térmico como fluido caloportador, la respuesta del sistema está directamente asociada a la disponibilidad instantánea de radiación solar, sin capacidad de almacenamiento térmico. Por otro lado, las configuraciones que incorporan materiales de cambio de fase (PCM) introducen un efecto de almacenamiento, permitiendo desacoplar parcialmente la generación de la demanda mediante procesos de carga y descarga energética.

Dado el volumen de información generado por la simulación horaria, los resultados se presentan en términos de valores promediados con el fin de facilitar la comparación entre escenarios y evitar la saturación gráfica.

En la Figura 11 se presenta el esquema base de la simulación para los colectores tipo ETC, mientras que en la Figura 12 se ilustra la configuración adoptada para los colectores tipo PTC. Ambas topologías comparten una estructura general similar dentro del entorno TRNSYS; sin embargo, las diferencias fundamentales entre los escenarios radican en el área efectiva del campo colector, las eficiencias térmicas de cada tecnología y los parámetros operativos asociados.

Estas variaciones influyen directamente en la cantidad de energía térmica captada y en la respuesta del sistema frente a la demanda, afectando tanto la producción energética como la capacidad de cobertura de las necesidades térmicas en cada caso de estudio

Figura 11

Topología del sistema para ETC

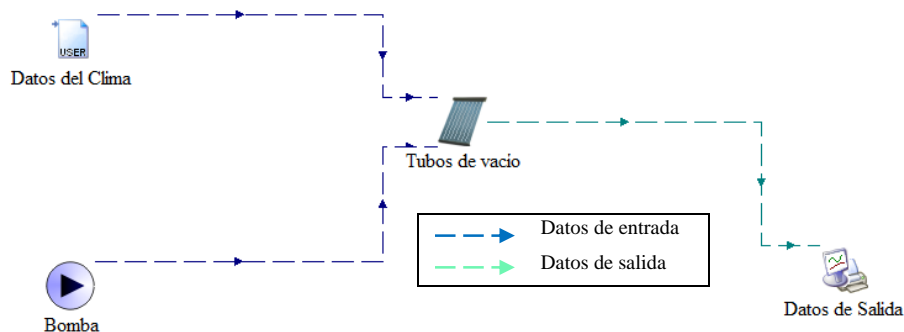
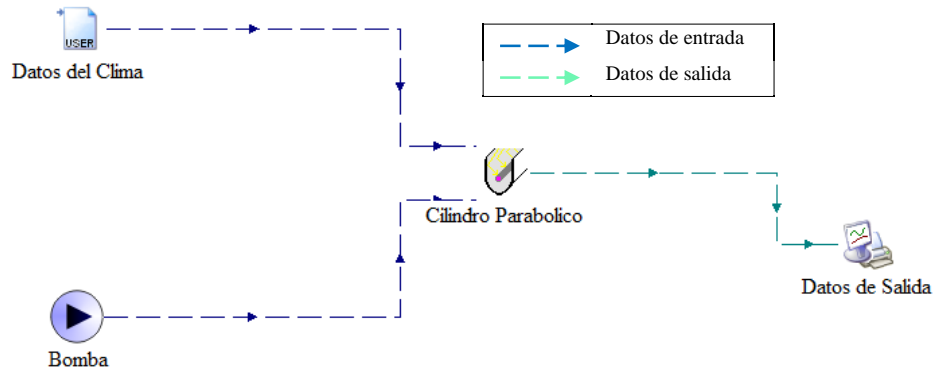


Figura 12

Topología del sistema para PTC



5.4.2 Caso 1: Residencial - Escalamiento Hotel Piedra Parada - Berlín.

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la sección 5.2, en la cual se caracterizaron los perfiles de DNI y temperatura, así como la demanda diaria de la aplicación en estudio, se establecieron los criterios de simulación en el software TRNSYS. El propósito de dicha simulación y del posterior tratamiento de datos fue determinar la cantidad de energía térmica (Q) disponible para satisfacer, de manera parcial o total, la demanda energética definida. Es importante resaltar que, conforme a lo establecido en la metodología, se presentan a continuación dos variantes de colectores solares (ETC y PTC) junto con sus respectivas versiones en términos económicos y de eficiencia, tal como se muestra en la Tabla 23.

Para el cálculo de la energía térmica disponible (Q) se estableció un rango de temperatura de operación entre $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este intervalo se mantuvo debido a que un incremento excesivo de la temperatura podría generar pérdidas térmicas significativas hacia el ambiente. Asimismo, se implementaron dos configuraciones del sistema: una conexión en serie y otra en paralelo, con el fin de aprovechar de manera óptima las ocho horas de

disponibilidad de DNI. En este contexto, cuando la temperatura de los colectores conectados en serie supera los 130 °C, el sistema cambia a una configuración en paralelo, permitiendo así un control más eficiente de la temperatura.

5.4.2.1 Estudio De Colectores De Tubos De Vacío – ETC – Caso I. A continuación, en la Tabla 25, se establecen las variaciones de cada colector tipo ETC utilizado para este caso de estudio, las unidades de tecnología utilizada y el área total utilizada.

Tabla 25

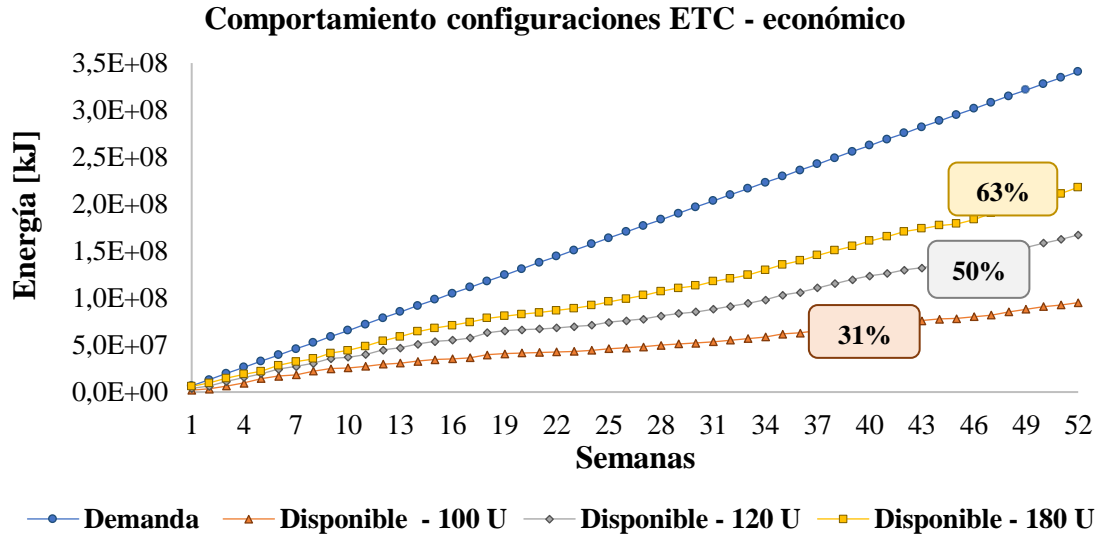
Configuraciones analizadas para los ETC en los distintos escenarios de simulación - Caso 1

Variante del colector ETC	Área total en estudio [m ²]	Unidades de colectores
	540	100
HSC-20	648	120
	972	180
	542	147
Heat Pipe Solar	649	176
	973	264

Con base en las configuraciones descritas en la Tabla 25, se realizaron las simulaciones correspondientes a los tres escenarios definidos para cada variante de colector. En esta etapa se comparó la energía demandada acumulada (Q) durante las 52 semanas del año con la energía térmica renovable disponible, obtenida a partir de los ETC al variar el área de estudio y el tipo de tecnología empleada.

Figura 13

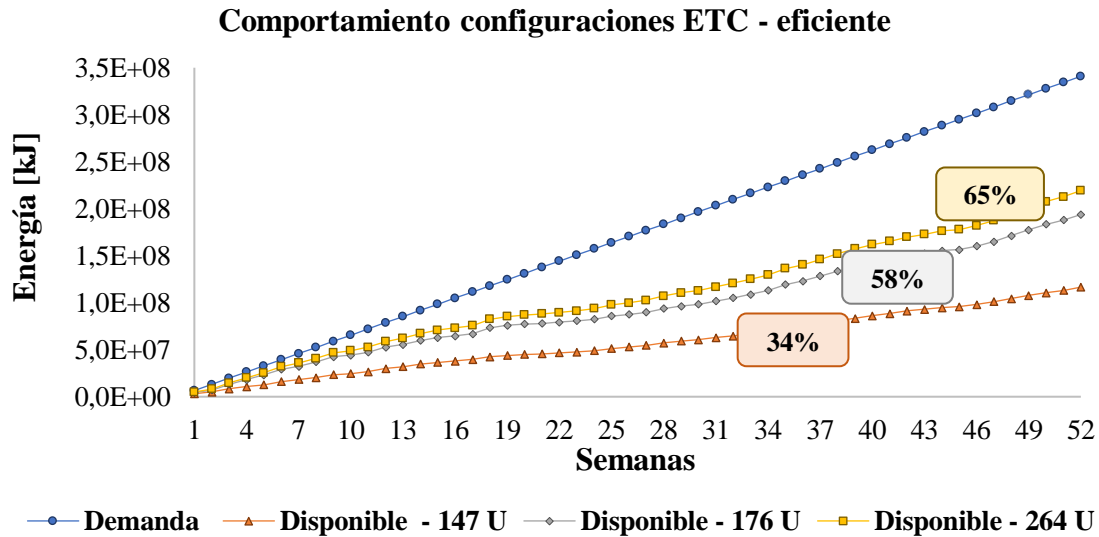
Demanda de energía vs energía disponible ETC económico - Caso 1



En la Figura 13 se presenta el comportamiento acumulado de la demanda energética y la energía térmica disponible para la variante económica de los colectores ETC. Se observa que el incremento del área de captación mejora progresivamente el porcentaje de reemplazo energético, alcanzando coberturas del 31 %, 50 % y 63 % para 100, 120 y 180 unidades, respectivamente. Aunque el aumento del número de colectores incrementa significativamente la disponibilidad térmica, la configuración evaluada no logra cubrir la totalidad de la demanda anual.

Figura 14

Demanda de energía vs energía disponible ETC eficiente - Caso 1



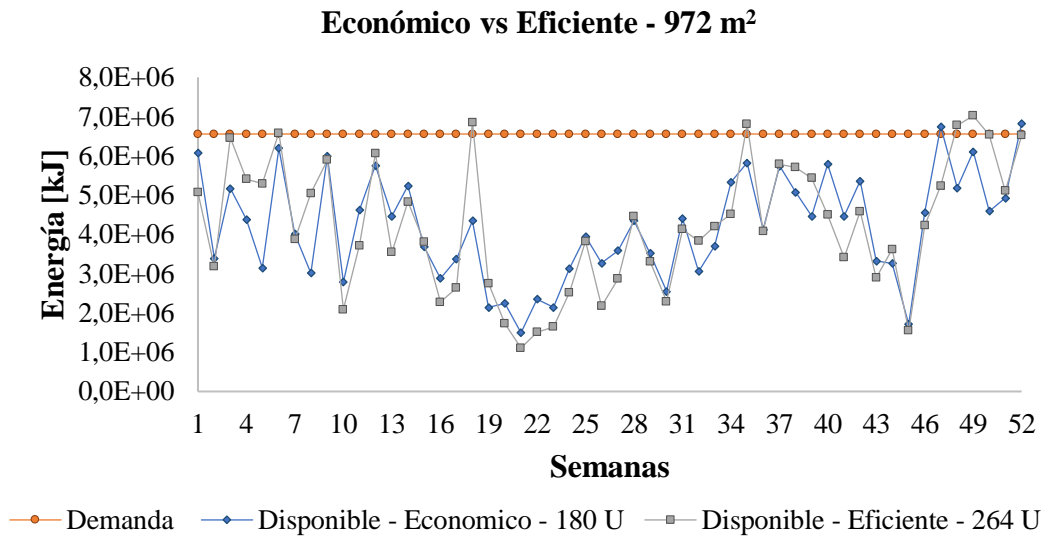
En la Figura 14 se utiliza la variante eficiente de los colectores ETC. Existen diferencias significativas entre las dos tecnologías analizadas, principalmente en la eficiencia térmica y en el área de captación por unidad de colector (ver Tabla 23). Por esta razón, fue necesario emplear un mayor número de unidades para alcanzar un área total de estudio equivalente.

Aunque ambas configuraciones presentan un comportamiento similar de la energía acumulada, los colectores Heat Pipe Solar alcanzan un porcentaje de reemplazo ligeramente superior, evidenciando un mejor aprovechamiento del DNI y un desempeño térmico más eficiente.

Con base en estos resultados, en la Figura 15 se presenta la comparación semanal entre las variantes económica y eficiente para el escenario con mayor porcentaje de reemplazo energético, correspondiente a un área aproximada de 972 m².

Figura 15

Comparación semanal de la energía térmica disponible ETC - Caso 1



En la Figura 15, se presenta el comportamiento semanal de las dos variantes de colectores ETC a lo largo del año, en comparación con la demanda energética de la aplicación en estudio. Aunque ambas configuraciones muestran una tendencia similar, la variante eficiente presenta un desempeño superior durante la mayor parte del periodo analizado. En semanas específicas, como la semana 18, la energía térmica disponible alcanza o supera el 100% de reemplazo, mientras que la variante económica no logra cubrir completamente la demanda bajo las mismas condiciones.

Este comportamiento se asocia con la mayor eficiencia térmica de los colectores Heat Pipe Solar, los cuales permiten un aprovechamiento más efectivo del DNI, especialmente en periodos de menor irradiancia. No obstante, ambas configuraciones presentan semanas con cobertura insuficiente de la demanda energética, evidenciando la necesidad de considerar sistemas complementarios o fuentes auxiliares para garantizar la continuidad del suministro térmico.

5.4.2.2 Estudio De Colectores Cilindro Parabólico – PTC – Caso 1. Para complementar el análisis del caso de escalamiento del Hotel Piedra Parada, se evaluó el desempeño de colectores cilindro parabólicos (PTC) en sus variantes económica y eficiente. En la Tabla 26, se presentan las configuraciones analizadas, considerando el área total de captación y el número de unidades instaladas.

Tabla 26

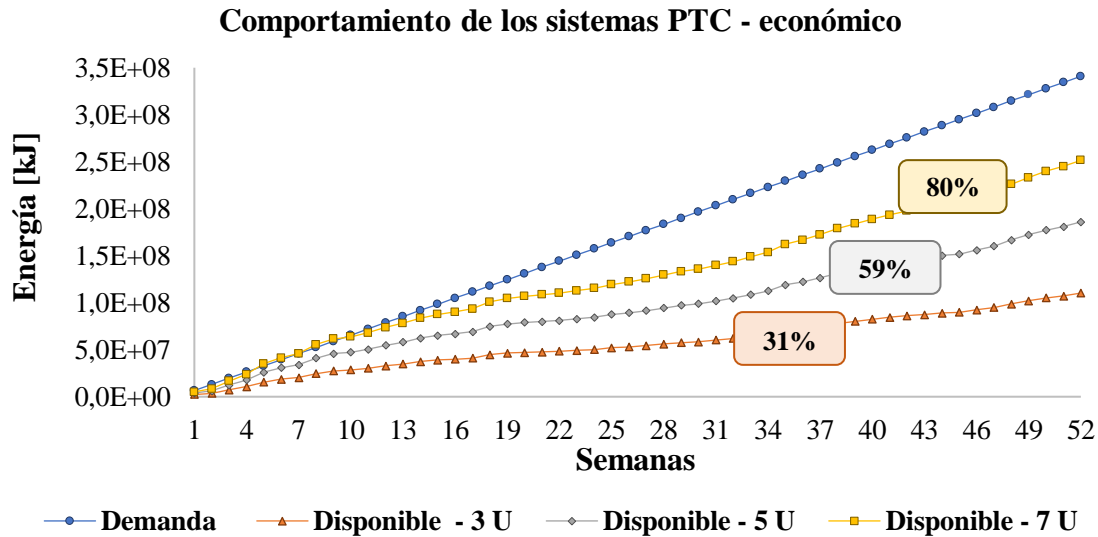
Configuraciones analizadas para los PTC en los distintos escenarios de simulación - Caso 1

Variante del colector	Área total en estudio [m ²]	Unidades de colectores
	516,6	3
SunBeam	861	5
	1205,4	7
Ultimate Trough	551,985	3
	919,975	5
	1287,965	7

Con base en las configuraciones definidas en la Tabla 26, se evaluó la relación entre la demanda energética del sistema y la energía térmica disponible obtenida mediante colectores PTC, determinando el porcentaje de reemplazo alcanzado en cada escenario.

Figura 16

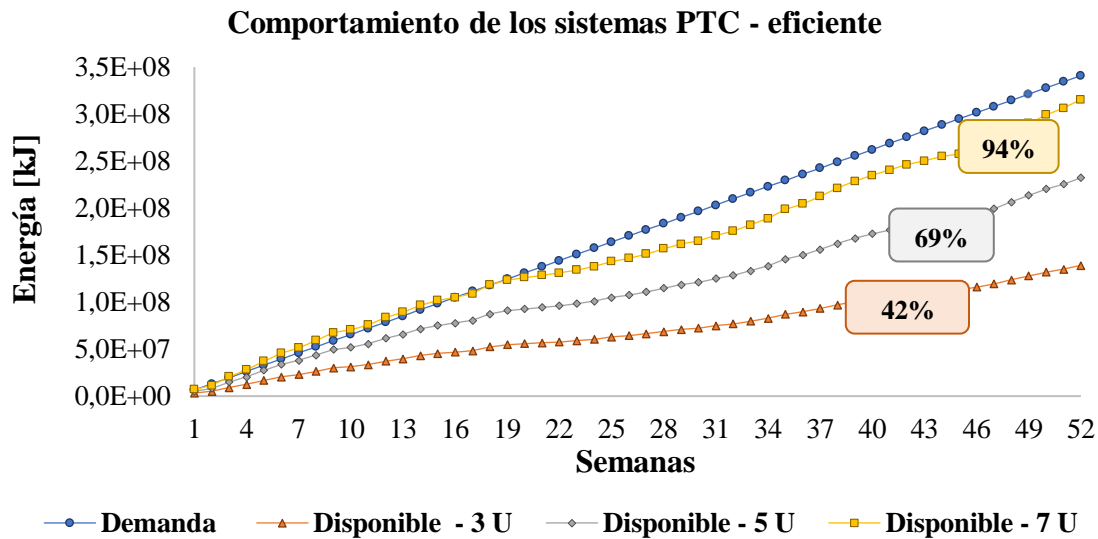
Demanda de energía vs energía disponible PTC económico - Caso 1



En la Figura 16 se presenta la relación entre la demanda energética del Hotel Piedra Parada y la energía térmica disponible obtenida mediante colectores PTC en su variante económica. Los resultados muestran que el incremento en el número de unidades instaladas aumenta proporcionalmente la fracción de demanda cubierta, alcanzando reemplazos anuales de 31%, 59% y 80% para configuraciones de 3, 5 y 7 unidades, respectivamente. De manera similar, aunque se presenta un aumento significativo en el área de captación en este caso, hasta 1205,4 m² y presenta un mayor porcentaje de reemplazo energético la configuración evaluada no logra cubrir el 100% de la demanda térmica anual.

Figura 17

Demanda de energía vs energía disponible PTC eficiente - Caso 1

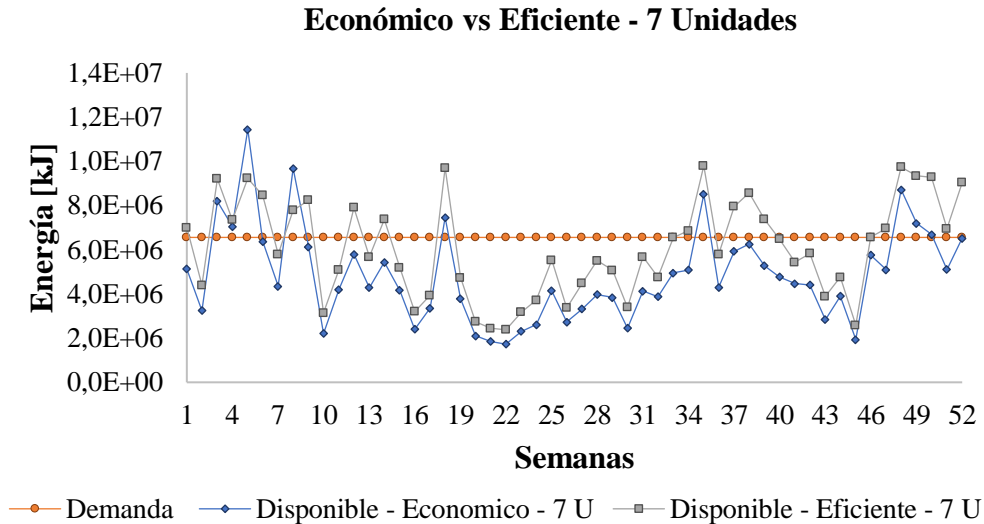


En la Figura 17 se presenta el comportamiento de la demanda energética frente a la energía térmica disponible utilizando la variante eficiente de los colectores PTC. En este caso, el colector Ultimate Trough, con una configuración de siete unidades, alcanzó un reemplazo promedio anual del 94%, evidenciando un desempeño térmico superior respecto a la variante económica.

Con el fin de comparar el comportamiento anual de ambas tecnologías, en la Figura 18 se presenta el escenario con mayor porcentaje de reemplazo energético para cada variante de colector PTC.

Figura 18

Comparación semanal de la energía térmica disponible PTC - Caso 1



En la Figura 18 se comparan las dos variantes de colectores PTC considerando las configuraciones con mayor porcentaje de reemplazo energético. Aunque existe una diferencia aproximada de 11,795 m² en el área de captación entre ambas tecnologías, la comparación se realizó con base en el número de unidades instaladas debido a las características estructurales propias de los colectores PTC.

Los resultados muestran que la variante eficiente presenta más semanas con valores de energía disponible superiores a la demanda, reflejando un mejor desempeño térmico. Sin embargo, incluso en este escenario, no se alcanza el 100% de cobertura anual, por lo que continúa siendo necesaria una fuente auxiliar para garantizar la continuidad del suministro energético.

5.4.3 Caso 2: Agroindustrial - Fabricación de mermelada – Pamplona

En este segundo caso de estudio se evaluó la aplicación de sistemas solares térmicos en el proceso de fabricación de mermelada, considerando nuevamente las tecnologías ETC y

PTC descritas en la Tabla 23. Para este proceso se estableció un rango de operación entre 40 °C y 130 °C, correspondiente a las etapas de cocción, concentración y pasteurización.

Al igual que en el caso anterior, se implementaron configuraciones en serie y paralelo para optimizar el aprovechamiento del DNI disponible. La conexión en serie se mantuvo hasta alcanzar temperaturas cercanas a 130 °C, mientras que la configuración en paralelo permitió controlar el exceso de temperatura y mejorar el desempeño térmico del sistema.

5.4.3.1 Estudio De Colectores De Tubos De Vacío – ETC – Caso 2. Inicialmente, se evaluaron las configuraciones ETC presentadas en la Tabla 27, considerando las diferencias de área efectiva y geometría entre ambas tecnologías.

Tabla 27

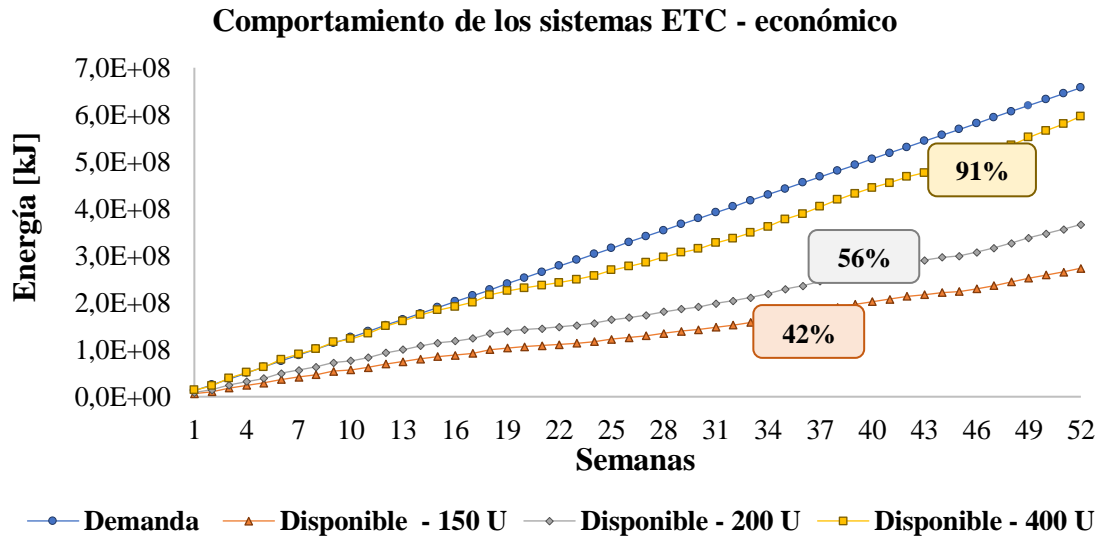
Configuraciones analizadas para los ETC en los distintos escenarios de simulación - Caso 2

Variante del colector ETC	Área total en estudio [m ²]	Unidades de colectores
	810	150
HSC-20	1080	200
	2016	400
	811,03	220
Heat Pipe Solar	1080,1445	293
	2160,289	586

Para este caso fue necesario emplear archivos meteorológicos específicos de Pamplona, debido a las variaciones de temperatura ambiente respecto al caso residencial (ver Figura 9), aunque los perfiles de DNI presentaron tendencias similares (Figura 8). Esto permitió garantizar mayor representatividad en las simulaciones realizadas en TRNSYS.

Figura 19

Demanda de energía vs energía disponible ETC económico - Caso 2



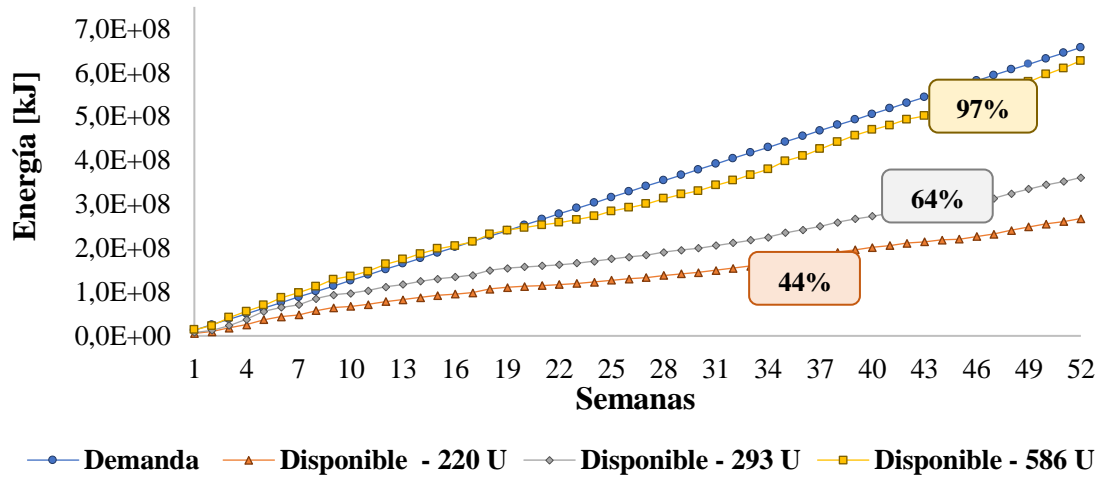
En la Figura 19 se presenta la relación entre la demanda de energía térmica asociada al proceso de fabricación de mermelada en Pamplona y la energía renovable disponible obtenida mediante la simulación. Los valores de demanda corresponden a los resultados obtenidos en la Fase 2 del presente proyecto, donde se estableció un requerimiento energético de 12644476,87 kJ/semana. Dado que esta demanda es considerablemente superior a la del caso de estudio anterior, fue necesario incrementar el área total de captación solar analizada.

En este caso se evaluaron tres escenarios con diferentes áreas de colectores, alcanzando un reemplazo energético máximo del 91% de la demanda semanal. Este resultado representa una fracción significativa de sustitución, especialmente al considerar el objetivo de favorecer la implementación de sistemas solares térmicos en procesos productivos de las PYMES dedicadas a la fabricación de mermelada.

Figura 20

Demanda de energía vs energía disponible ETC eficiente - Caso 2

Comportamiento de los sistemas ETC - eficiente

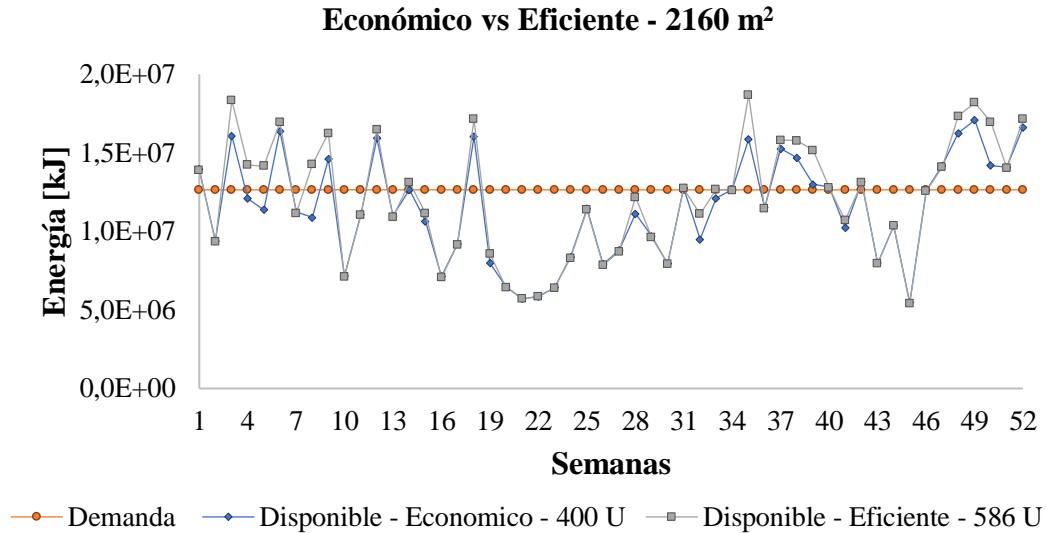


En la Figura 20 se observa que la eficiencia acumulada máxima alcanzada en los escenarios evaluados corresponde a un 97%, empleando un total de 586 unidades, lo que equivale a aproximadamente 2160 m² de colectores tipo ETC. Es importante destacar que, si bien el incremento de eficiencia respecto a los otros dos escenarios evaluados con 220 y 293 unidades, que representan 44% y 64% de eficiencia acumulada respectivamente es significativo, no se logra cubrir en su totalidad los requerimientos energéticos anuales del proceso productivo.

Finalmente, en la Figura 21 se presenta la comparación entre los dos tipos de colectores que alcanzaron los mayores porcentajes de reemplazo, con el propósito de analizar las similitudes y diferencias en su comportamiento térmico semanal a lo largo del año de estudio.

Figura 21

Comparación semanal de la energía térmica disponible ETC - Caso 2



En la Figura 21 se presenta la comparación del comportamiento térmico de los dos tipos de colectores utilizados con la mayor área en estudio (2160 m²), correspondiente al escenario con el mayor porcentaje de reemplazo energético en ambas configuraciones de colectores ETC. Se resalta que el colector HCS-20 alcanzó un reemplazo acumulado 6% inferior al obtenido con el colector Heat Pipe Solar. Sin embargo, al analizar el comportamiento semanal, se observa que el HCS-20 logra cubrir al menos el 100% de la demanda en 31 de las 52 semanas del año, mientras que el Heat Pipe Solar alcanza este nivel en 28 semanas. Esta diferencia se explica porque, aunque el colector Heat Pipe Solar supera significativamente el 100% de reemplazo en ciertas semanas, el HCS-20 mantiene un desempeño más uniforme y constante a lo largo del año, lo que se refleja en un reemplazo ligeramente superior en las semanas de estudio.

5.4.3.2 Estudio De Colectores Cilindro Parabólico – PTC – Caso 2. Se realizó el análisis del comportamiento de los colectores solares de tipo PTC aplicados al proceso de fabricación de mermelada. Este estudio tuvo como finalidad evaluar el desempeño térmico de esta tecnología bajo las mismas condiciones de demanda energética establecidas para el caso de estudio, considerando las variantes económica y eficiente definidas en la Tabla 28. De igual forma, se mantuvieron las configuraciones de conexión en serie y en paralelo con el fin de optimizar el aprovechamiento del recurso solar disponible durante las horas de mayor radiación.

Tabla 28

Configuraciones analizadas para los PTC en los distintos escenarios de simulación - Caso 2

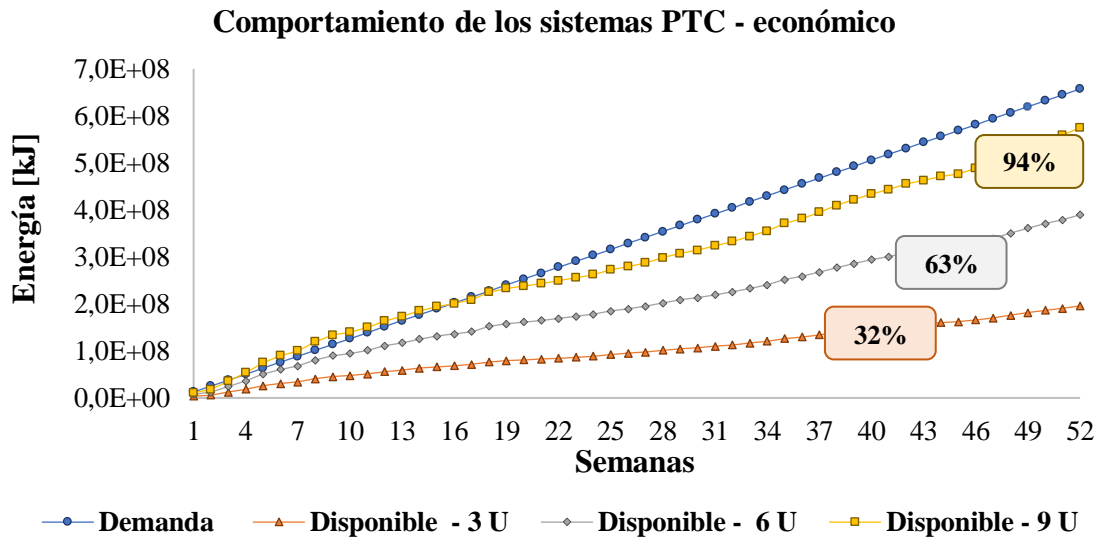
Variante del colector	Área total en estudio [m ²]	Unidades de colectores
SunBeam	516,6	3
	1033,2	6
	1549,8	9
Ultimate Trough	551,985	3
	1103,97	6
	1655,955	9

Teniendo en cuenta que en esta sección se analiza la tecnología de colectores PTC, la comparación entre las variantes se realizó con base en el número de unidades en estudio y no en el área total cubierta. Esta decisión se fundamenta en las diferencias estructurales propias de este tipo de colectores, que dificultan una equivalencia directa por superficie. Es importante destacar que, a pesar de ello, se procuró mantener una comparación lo más

equilibrada posible, considerando que el colector Ultimate Trough presenta un área aproximadamente 6,85% mayor que el SunBeam.

Figura 22

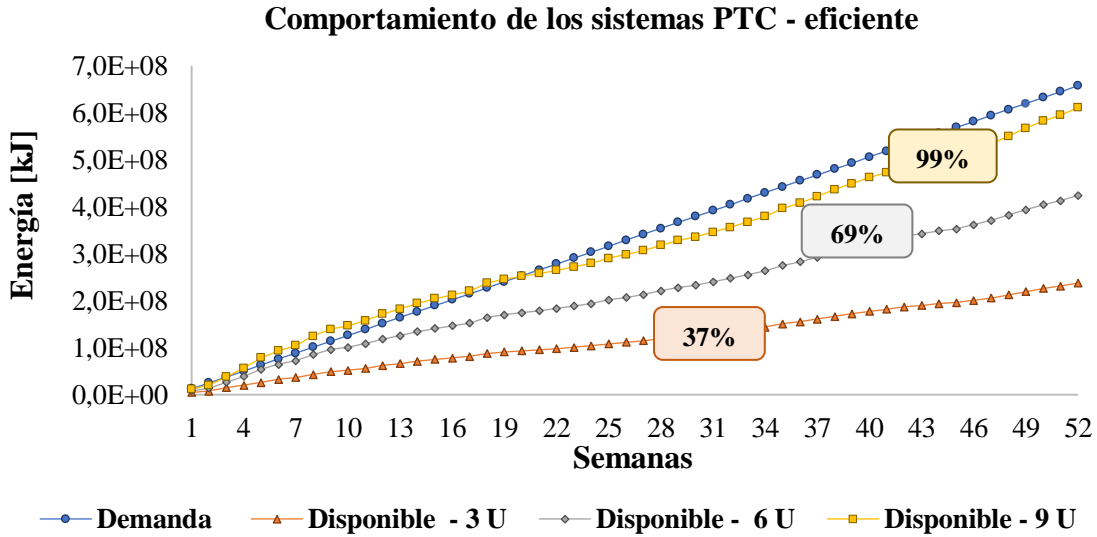
Demanda de energía vs energía disponible PTC económico - Caso 2



En la Figura 22 se presenta la relación acumulada entre la demanda energética del proceso de fabricación de mermelada y la energía térmica disponible generada a partir de fuentes renovables utilizando la variante económica de los colectores tipo PTC. Los resultados muestran que, para este caso de estudio, se alcanza un porcentaje de reemplazo del 32%, 63% y 94% empleando configuraciones de 3, 6 y 9 unidades, respectivamente. Es importante señalar que, debido a que la demanda térmica en este segundo caso de estudio es considerablemente mayor que en el caso previamente analizado, fue necesario incrementar el número de colectores instalados. Esta ampliación en la capacidad instalada obedece a la necesidad de aproximarse al cumplimiento de la demanda anual de energía del proceso.

Figura 23

Demanda de energía vs energía disponible PTC eficiente - Caso 2

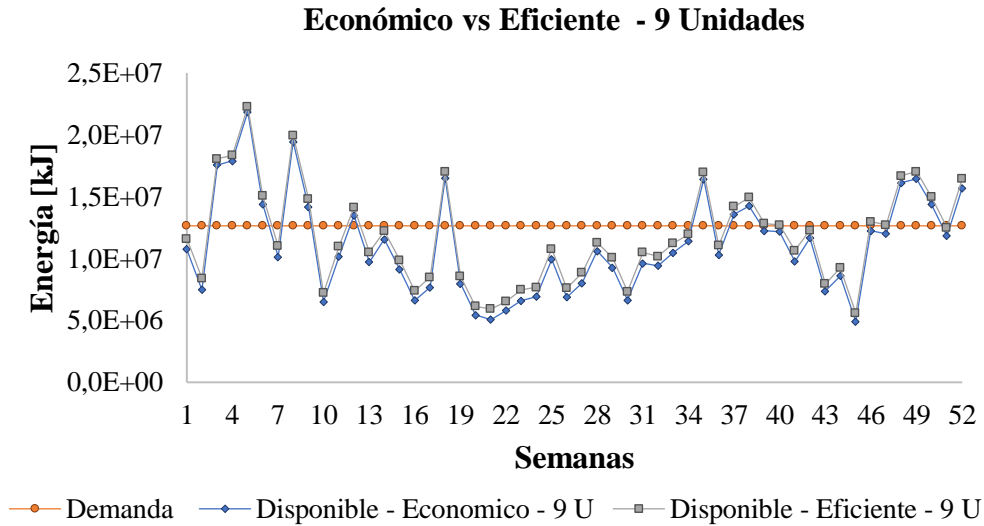


En la Figura 23 se presenta, por otro lado, el comportamiento acumulado de la demanda energética frente a la energía térmica disponible obtenida mediante la variante eficiente de los colectores PTC. En este caso, se observa que la configuración con 9 unidades del colector Ultimate Trough alcanza un reemplazo anual cercano al 99%, lo que evidencia el superior desempeño térmico de esta tecnología en comparación con la variante económica.

Finalmente, para concluir el análisis de esta tecnología en el presente caso de estudio, se establece la comparación del comportamiento entre los dos tipos de colectores PTC, considerando en ambos casos la configuración que obtuvo el mayor reemplazo acumulado entre las tres evaluadas en las Figura 22 y Figura 23.

Figura 24

Comparación semanal de la energía térmica disponible PTC - Caso 2



En la Figura 24 se presenta la comparación entre los dos tipos de colectores PTC utilizando la configuración de 9 unidades, la cual permitió alcanzar un reemplazo superior al 90% en ambos casos. A partir del análisis, se determinó que la diferencia promedio anual en el porcentaje de reemplazo entre las dos tecnologías es de 6,82%, evidenciando un desempeño superior del colector Ultimate Trough frente al SunBeam.

5.4.4 Caso 3: Industrial - Manufactura de manguera – Girón.

El tercer caso de estudio corresponde al análisis del proceso de manufactura de manguera mediante el aprovechamiento de energía solar térmica. Este proceso se desarrolla en industrias ubicadas en Girón, Santander, por lo cual se utilizaron los perfiles de temperatura ambiente y DNI específicos de esta localización. Para este caso, se definió un rango operativo entre 90 °C y 280 °C, donde 90 °C corresponde a la temperatura mínima a partir de la cual el recurso solar puede ser aprovechado de manera efectiva, y 280 °C representa la temperatura máxima de operación de la extrusora involucrada en el proceso. Es

importante resaltar que, debido a las elevadas temperaturas requeridas, en este caso particular solo se consideró el uso de colectores PTC, evaluando las dos variantes tecnológicas previamente establecidas.

5.4.4.1 Estudio De Colectores Cilindro Parabólico – PTC – Caso 3. La Tabla 29 presenta las configuraciones utilizadas para los colectores tipo PTC en sus dos variantes: la versión económica (SunBeam) y la versión eficiente (Ultimate Trough). Dado el diseño estructural característico de este tipo de tecnología, la determinación de un área equivalente entre modelos resulta compleja; por esta razón, el criterio de comparación empleado en este caso se basa en el número de unidades instaladas para cada tipo de colector.

Tabla 29

Configuraciones analizadas para los PTC en los distintos escenarios de simulación - Caso 3

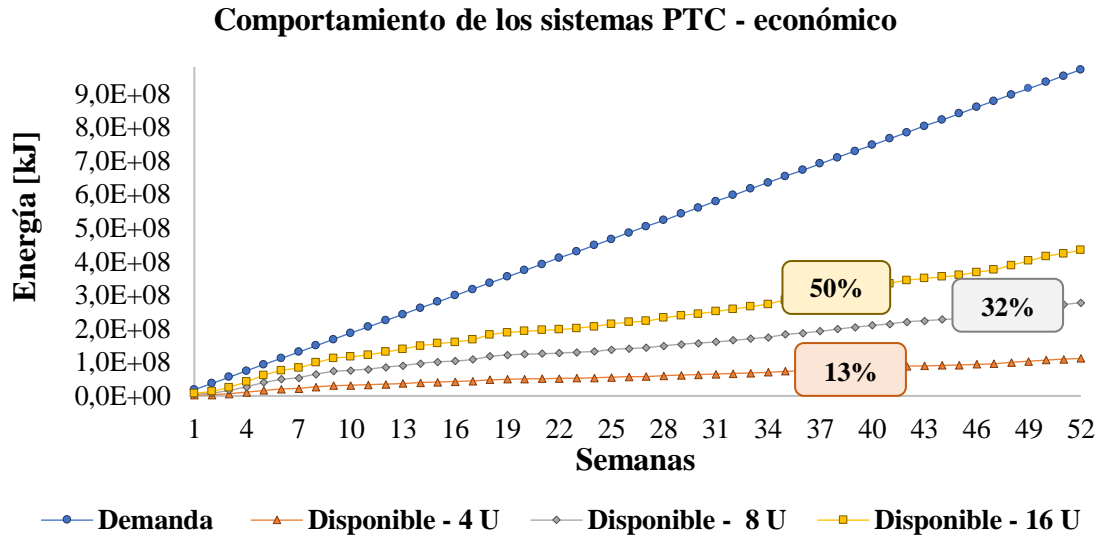
Variante del colector	Área total en estudio [m ²]	Unidades de colectores
SunBeam	688,8	4
	1377,6	8
	2755,2	16
Ultimate Trough	735,98	4
	1471,96	8
	2943,92	16

Es importante resaltar que existe una diferencia aproximada del 7% en el área efectiva entre los dos tipos de colectores utilizados. Adicionalmente, cabe señalar que, a diferencia de los casos de estudio anteriores, en este proceso no se emplean configuraciones alternadas en serie y paralelo. Esto se debe a que los rangos de temperatura requeridos son

considerablemente más altos, lo que permite que el sistema, dentro de los límites evaluados, opere adecuadamente utilizando exclusivamente una configuración en serie.

Figura 25

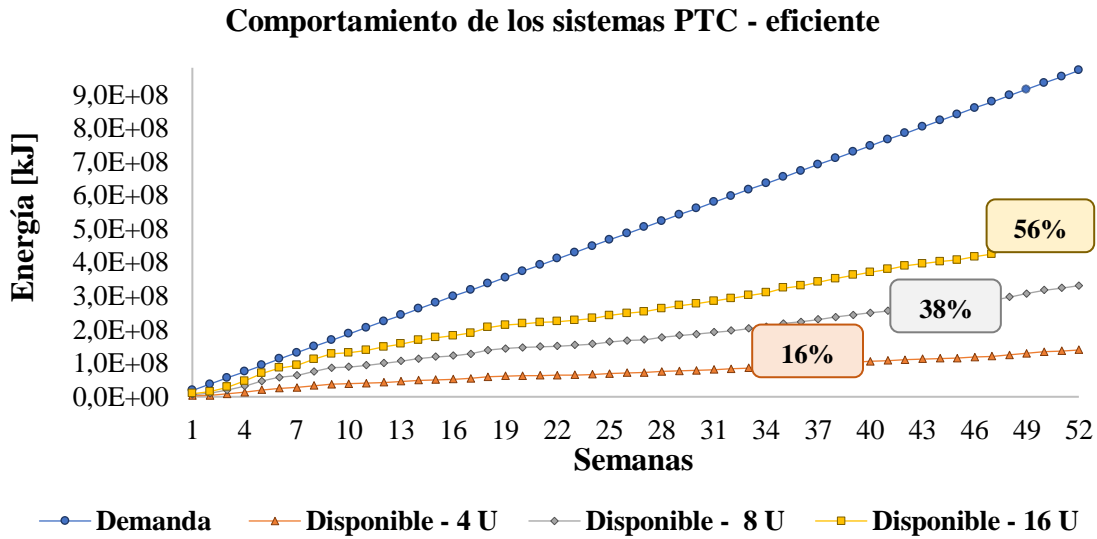
Demanda de energía vs energía disponible PTC económico - Caso 3



En la Figura 25 se presenta el comportamiento acumulado, a lo largo de todo el año, de la energía térmica disponible mediante colectores tipo PTC. Entre las tres configuraciones evaluadas, la que alcanza el mayor porcentaje de reemplazo corresponde a la instalación de 16 unidades, con un área aproximada de 2755,2 m². No obstante, aunque se evidencia que una fracción significativa de la demanda energética puede ser suplida de forma consistente mediante energía solar térmica, el reemplazo no supera el 50%. Por esta razón, resulta fundamental mantener en óptimas condiciones la fuente de energía convencional, de manera que se garantice la continuidad del proceso productivo y se maximice, simultáneamente, el aprovechamiento del recurso renovable.

Figura 26

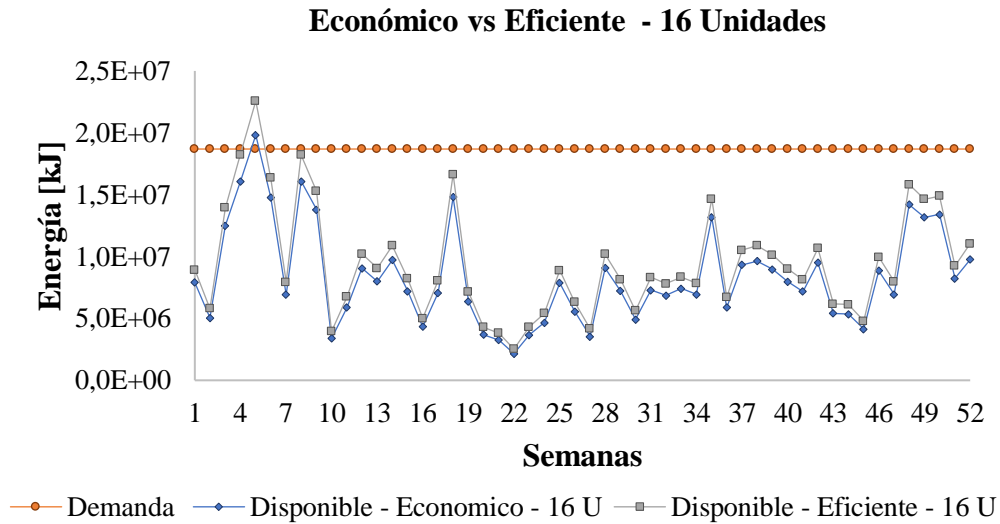
Demanda de energía vs energía disponible PTC eficiente - Caso 3



De igual manera, en la Figura 26 se presenta el análisis comparativo entre la demanda de energía acumulada durante las 52 semanas del año y el porcentaje de reemplazo obtenido mediante la tecnología más eficiente de los colectores tipo PTC (Ultimate Trough). En este caso, se observa nuevamente que la configuración con 16 unidades ofrece el mejor desempeño, alcanzando un reemplazo del 56%, es decir, aproximadamente 6% más que la configuración equivalente mostrada en la Figura 25, donde se evaluó la variante económica de esta tecnología. Estos resultados evidencian el impacto positivo de la mayor eficiencia del colector Ultimate Trough en la cobertura de la demanda térmica anual del proceso.

Figura 27

Comparación semanal de la energía térmica disponible PTC - Caso 3



En la Figura 27 se presenta el comportamiento semanal de las configuraciones con 16 unidades instaladas de colectores tipo PTC en sus variantes económica y eficiente. A partir de estos resultados se evidencia que, en ambos casos, únicamente durante la semana 5 se alcanza un reemplazo superior al 100% de la demanda energética requerida. En particular, la variante eficiente entrega un 21% más energía de la necesaria, mientras que la variante económica supera la demanda en aproximadamente 6%. Exceptuando esta semana, a lo largo del año se requiere apoyo permanente de la fuente convencional de energía para garantizar el cumplimiento de los requerimientos de producción y la continuidad del proceso.

Finalmente, el desarrollo de los tres escenarios estudiados (residencial, agroindustrial e industrial) permitió evaluar el desempeño técnico de los colectores solares ETC y PTC en diferentes condiciones operativas y climáticas. Los resultados obtenidos demostraron que las variaciones en la demanda energética, las características climáticas y la ubicación geográfica

influyen de manera significativa en el potencial de aprovechamiento de la energía solar térmica en cada caso de estudio.

Adicionalmente, el análisis evidenció que el porcentaje de reemplazo de energía convencional no depende exclusivamente de la cantidad de energía generada, sino de la capacidad del sistema para gestionar dicha energía en el tiempo. En particular, se identificó que en ciertos periodos la producción térmica puede superar la demanda energética; sin embargo, en configuraciones sin almacenamiento térmico, estos excedentes no pueden ser aprovechados posteriormente, lo que limita el porcentaje efectivo de cobertura.

En contraste, las configuraciones que incorporan almacenamiento mediante materiales de cambio de fase (PCM) permiten acumular la energía excedente y liberarla en periodos de baja generación, mejorando el acoplamiento entre la oferta y la demanda. Este comportamiento resalta la importancia del almacenamiento térmico como elemento clave en la optimización del aprovechamiento energético.

De esta manera, los porcentajes de reemplazo anual de energía convencional determinados para cada escenario se sustentan en una base comparativa sólida, considerando no solo la capacidad de generación de los sistemas, sino también su desempeño en la gestión temporal de la energía, lo cual sirve como fundamento para el análisis económico preliminar a desarrollar en el siguiente objetivo.

5.5 Análisis Económico

Una vez realizado el análisis técnico de los tres escenarios planteados y con base en los resultados obtenidos, este objetivo se centró en desarrollar un análisis económico simple para evaluar la viabilidad de la implementación de los STS en cada caso de estudio. Para ello, se estimó inicialmente el costo asociado a la demanda de energía convencional en cada escenario. Posteriormente, se calculó el CAPEX correspondiente a los sistemas solares propuestos y, finalmente, se determinaron indicadores económicos clave, como el periodo de recuperación de la inversión (Payback) y el retorno de la inversión (ROI). De esta manera, fue posible complementar la comparación técnica con un análisis económico integral, permitiendo valorar la conveniencia de cada escenario desde ambas perspectivas.

5.5.1 Costo Asociado A La Demanda De Energía

La demanda de energía asociada a cada caso de estudio fue establecida en el segundo objetivo del presente proyecto. Como se evidenció anteriormente, dichas demandas presentan variaciones significativas entre los escenarios, consecuencia directa de las diferencias en los procesos y aplicaciones propias de cada sector económico.

A continuación, en la Tabla 30, se presenta una recopilación del costo por kWh determinado según la Electrificadora de Santander (ESSA) para cada caso de estudio. Esta información permite observar las variaciones tarifarias aplicables a cada escenario y constituye la base para el análisis económico desarrollado en este objetivo (Empresa Electrificadora de Santander (ESSA), 2025).

Tabla 30

Tabla de tarifas de energía por tipo de caso de estudio

Caso de estudio	Clasificación	Valor [USD/kWh]
Residencial	Comercial	0,20
Agroindustrial	No residencial	0,20
Industrial	Industrial	0,19

Nota. Los valores económicos fueron expresados en dólares estadounidenses (USD) utilizando un tipo de cambio fijo, adoptado con fines de consistencia y comparación entre escenarios. La conversión se realizó a partir de las tarifas reportadas por la empresa Electrificadora de Santander (ESSA), sin considerar variaciones temporales del tipo de cambio.

Teniendo en cuenta la tabla anterior y los datos obtenidos en el Objetivo 2 del presente estudio, se establece el valor de la demanda de energía para cada uno de los casos de estudio previamente analizados. En la Tabla 31 se presenta el valor anual de la demanda de energía obtenida de forma convencional para cada escenario, información que servirá como referencia para el análisis económico desarrollado a continuación.

Tabla 31

Demanda anual de energía convencional y costo asociado para los casos de estudio

Caso de estudio	Demanda de energía [kJ/anual]	Demanda de energía [kWh/anual]	Valor [USD/anual]
Residencial	340922400	94700,7	\$ 18940,133
Agroindustrial	657512745	182642,4	\$ 36528,486
Industrial	971792640	269942,4	\$ 51289,056

Teniendo en cuenta la tabla anterior y la demanda energética establecida previamente, se confirma que el valor de la energía requerida para el caso industrial es, como era de esperarse, significativamente superior al de los otros dos escenarios analizados. Esta diferencia obedece a la naturaleza de sus procesos y al mayor nivel de consumo característico de este tipo de aplicación.

Es importante señalar que las tarifas de energía empleadas en el presente análisis corresponden a valores de referencia reportados por la Electrificadora de Santander (ESSA) para el año 2025. En la práctica, dichas tarifas pueden presentar variaciones asociadas a factores regulatorios, subsidios, comportamiento del mercado energético y fluctuaciones del tipo de cambio. En consecuencia, los resultados económicos obtenidos deben interpretarse como una aproximación preliminar bajo condiciones tarifarias estables y no como una proyección financiera absoluta a largo plazo. No obstante, los valores empleados permiten establecer una base comparativa coherente entre los distintos escenarios analizados.

5.5.2 Gasto Capital (CAPEX)

Una de las diferencias más relevantes entre la energía convencional y la energía proveniente de fuentes renovables radica en la estructura de sus costos. En el primer caso, los gastos están asociados principalmente al consumo continuo de combustible requerido para el proceso en estudio. En contraste, la generación de energía mediante tecnologías renovables se caracteriza por una inversión de capital inicial (CAPEX) considerablemente alta, mientras que sus costos operativos posteriores suelen ser significativamente menores (The International Renewable Energy Agency (IRENA), 2024).

Para el desarrollo de este objetivo se consideraron los parámetros más relevantes para la puesta en marcha de los STS, previamente establecidos en el Objetivo 3. Dado que cada

caso de estudio presentó condiciones operativas diferenciadas, se elaboraron tablas independientes para los dos tipos de colectores analizados (ETC y PTC), tanto en sus configuraciones económicas como eficientes. Con base en esta información, se procedió a determinar la inversión inicial requerida en cada escenario, mediante la estimación del costo de capital (CAPEX) asociado a la implementación de los sistemas solares térmicos propuestos.

En la

Tabla 32 se presentan los parámetros generales considerados para la construcción del análisis económico en los distintos escenarios. Estos elementos corresponden a componentes comunes necesarios para la puesta en marcha de los sistemas solares térmicos y permiten estructurar el CAPEX con base en las diferencias técnicas de cada caso de estudio. Adicionalmente, es importante considerar que los valores estimados en esta investigación corresponden a una aproximación basada en precios comerciales de referencia y no incluyen posibles variaciones asociadas a costos logísticos, transporte, instalación especializada, importación de equipos, adecuaciones civiles o variaciones del mercado tecnológico. Por esta razón, los costos reales de implementación podrían diferir dependiendo de las condiciones particulares de cada proyecto, la ubicación geográfica, la disponibilidad tecnológica y las dinámicas económicas presentes al momento de la ejecución.

Tabla 32

Parámetros generales considerados para la estimación del CAPEX

Equipo	Precio - USD
Bomba para líquidos calientes	1296,98
3500 kg PCM	166,65
100 m Tubería en acero inoxidable	1141,00
5 galones Fluido Caloportador	123,00
Aislamiento térmico	119,00

Es importante resaltar que, en cada caso de estudio, las variaciones más significativas se presentan en la cantidad de fluido caloportador requerida, así como en el área y/o número de unidades de colectores solares instalados. Asimismo, cabe mencionar que únicamente el escenario residencial incorpora material de cambio de fase (PCM), mientras que los escenarios agroindustrial e industrial operan exclusivamente con fluido caloportador.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 33 se presenta el comportamiento de los dos tipos de colectores solares, ETC y PTC, en los tres escenarios analizados, considerando los diferentes porcentajes de reemplazo anual. En esta tabla se incluye tanto la cantidad de colectores ETC como el área (m²) correspondiente a los colectores PTC, distinción que obedece a la forma en que cada tecnología es comercializada: mientras que los colectores ETC se venden por unidad, los colectores PTC se adquieren según el área instalada. Adicionalmente, se muestra la variación en el flujo de fluido caloportador requerido, asociada a la relación indirecta existente entre el caudal de operación y la temperatura final suministrada por el sistema.

Tabla 33

Desempeño y requerimientos de colectores ETC y PTC en los escenarios de estudio

		ETC - Económico			ETC - Eficiente		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Caso 1	% de reemplazo	31%	50%	63%	34%	58%	65%
	Unidad de colectores	100	120	180	147	176	264
	Flujo caloportador	600	600	1000	700	800	1200
Caso 2	% de reemplazo	42%	56%	91%	44%	64%	97%
	Unidad de colectores	150	200	400	220	293	586
	Flujo caloportador	800	1200	2000	800	1200	1200
		PTC - Económico			PTC - Eficiente		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Caso 1	% de reemplazo	31%	59%	80%	42%	69%	94%
	m ² de colectores	517	861	1205	552	920	1288
	Flujo caloportador	800	1200	1200	800	1200	1200
Caso 2	% de reemplazo	32%	63%	94%	37%	69%	99%
	m ² de colectores	517	1033	1550	552	1104	1656
	Flujo caloportador	800	1200	2000	800	1200	1500
Caso 3	% de reemplazo	13%	32%	50%	16%	38%	56%
	m ² de colectores	689	1378	2755	736	1472	2944
	Flujo caloportador	800	1500	2000	800	1500	2000

Teniendo en cuenta la Tabla 23, en la cual se presentan los tipos de colectores solares y sus precios comerciales, así como la Tabla 32, que reúne los costos de los equipos principales asociados a la puesta en marcha de los STS, y la Tabla 33, que consolida la información técnica específica de cada escenario, se procede a realizar la suma correspondiente de cada componente. Con ello, se obtiene en la Tabla 34, la estimación final de los costos totales asociados a cada caso de estudio.

Tabla 34

CAPEX estimado para sistemas solares térmicos según tipo de colector y caso de estudio

		ETC - Económico			ETC - Eficiente		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Caso 1	CAPEX [USD]	\$ 89.744	\$ 106.744	\$ 159.091	\$ 180.026	\$ 214.875	\$ 320.951
Caso 2		\$ 132.751	\$ 176.598	\$ 349.292	\$ 267.073	\$ 355.297	\$ 703.997
		PTC - Económico			PTC - Eficiente		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Caso 1		\$ 67.410	\$ 110.085	\$ 151.413	\$ 103.671	\$ 170.520	\$ 236.022
Caso 2	CAPEX [USD]	\$ 67.243	\$ 130.582	\$ 195.268	\$ 103.504	\$ 203.105	\$ 302.368
Caso 3		\$ 87.907	\$ 172.920	\$ 339.916	\$ 135.285	\$ 268.647	\$ 532.339

Nota. Los valores de CAPEX incluyen equipos principales, área o unidades de colectores y fluido caloportador correspondiente a cada escenario. En este documento se usa coma (,) para decimales y punto (.) para miles.

5.5.3 Formulación Y Criterios De Evaluación Económica

A continuación, se presentan los criterios fundamentales para la evaluación económica del proyecto, considerando los resultados obtenidos previamente, donde se determinó el ahorro neto anual para cada escenario según sus características principales, incluido el CAPEX y el porcentaje de reemplazo anual alcanzado según el Objetivo 3. Con base en esta información, se definen posteriormente los indicadores clave que permiten analizar la viabilidad económica de las alternativas evaluadas, tales como el promedio de ahorro neto anual, el periodo de recuperación de la inversión (Payback) y el retorno de la inversión (ROI).

Es relevante destacar que los costos de operación y mantenimiento (O&M) asociados a los sistemas solares térmicos (STS) suelen ser superiores a los correspondientes a otras tecnologías de generación de energía renovable, como la energía solar fotovoltaica o la energía eólica. Sin embargo, dichos costos pueden variar de manera significativa, pues están influenciados por factores como la localización geográfica, la naturaleza de la tecnología implementada y el desempeño operativo del sistema.

La literatura reporta que, en instalaciones con altos niveles de eficiencia, los costos de O&M pueden ser inferiores al 1% del CAPEX (Khan et al., 2024). De manera complementaria, informes emitidos por IRENA indican que los gastos relacionados con seguros se encuentran entre el 0,5% y el 1% del CAPEX (The International Renewable Energy Agency (IRENA), 2024).

Finalmente, para el propósito de esta investigación se adopta un rango de costos de O&M comprendido entre el 0,5% y el 3% del CAPEX, ampliando dicho intervalo con el fin de reflejar las variaciones asociadas a las condiciones específicas de los casos de estudio

analizados. En consecuencia, se selecciona un valor promedio equivalente al 1,75% del CAPEX como un criterio representativo y conservador para los distintos escenarios evaluados. No obstante, se reconoce que los costos de operación y mantenimiento pueden variar considerablemente dependiendo del tipo de tecnología implementada, las condiciones ambientales, la frecuencia de mantenimiento preventivo y la vida útil de los componentes. En este sentido, el valor adoptado en el presente estudio corresponde a una aproximación con fines comparativos y metodológicos, mas no a un costo absoluto aplicable de manera universal a todos los contextos operativos.

Para llevar a cabo el análisis económico en este tipo de proyectos, es fundamental determinar el ahorro anual promedio, el cual, en el presente estudio, depende directamente del porcentaje de reemplazo alcanzado por la tecnología solar térmica en cada caso de estudio (Ecuación (6)). Este valor constituye un insumo esencial para la estimación de los indicadores económicos posteriores, al reflejar el grado de sustitución de la energía convencional y, por ende, el nivel de ahorro asociado a cada escenario.

$$AP = CEC * \% \text{ reemplazo} \quad (6)$$

Donde AP es el ahorro anual promedio USD/año, CEC es el costo de la energía convencional USD y % de reemplazo corresponde al porcentaje de sustitución de la energía convencional.

Una vez determinado el ahorro anual promedio, se procede a calcular el ahorro neto anual promedio, definido como la diferencia entre dicho ahorro y los costos de operación y mantenimiento (O&M) estimados para cada escenario (Ecuación (7)). Este valor neto representa de manera más realista el beneficio económico anual atribuible a la

implementación de los sistemas solares térmicos, al descontar los gastos recurrentes necesarios para su funcionamiento adecuado.

$$ANP = AP - O\&M \quad (7)$$

Donde ANP es el ahorro neto anual promedio expresado en USD/año, mientras que O&M corresponde a los costos asociados a la operación y mantenimiento del sistema solar térmico.

Otro parámetro fundamental en la evaluación económica es el tiempo de recuperación de la inversión o Payback, el cual se define como el período requerido para que un proyecto recupere la totalidad de su inversión inicial a partir de los flujos netos de ahorro (Aponte, Muñoz, & Álzate, 2017). En la Ecuación (8) se presenta la expresión empleada para el cálculo de este indicador, cuyo resultado se expresa en unidades de tiempo, generalmente años.

$$Payback = \frac{CAPEX}{ANP} \quad (8)$$

Finalmente, se analiza el Retorno de la Inversión (ROI), el cual, en el contexto de proyectos de energías renovables, se define como la relación entre el ahorro promedio anual en costos de energía y la inversión inicial (CAPEX). Este indicador, al igual que el Payback, se considera una métrica preliminar de evaluación económica, dado que permite obtener una aproximación inicial de la viabilidad del proyecto. Para los fines de esta investigación, se emplea el ahorro promedio anual como base para estimar un ROI coherente y comparable entre los distintos escenarios evaluados, tal como se presenta en la Ecuación (9).

$$ROI = \frac{ANP}{CAPEX} \quad (9)$$

Teniendo en cuenta los parámetros definidos en las Ecuaciones (8) y (9), así como los costos de O&M (1.75% del CAPEX) previamente establecidos para los proyectos, se procedió a aplicar las fórmulas correspondientes para cada uno de los escenarios planteados. Como resultado de este proceso, se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 35, los cuales permiten evaluar de manera preliminar la viabilidad económica de los sistemas solares térmicos analizados.

Tabla 35

Indicadores económicos de los STS por escenario y tipo de colector

		ETC - Económico			ETC - Eficiente		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Caso 1	O&M	\$ 1.570,52	\$ 1.868,02	\$ 2.784,10	\$ 3.150,45	\$ 3.760,32	\$ 5.616,64
	Promedio de Ahorro Anual	\$ 5.871,44	\$ 9.470,07	\$ 11.932,28	\$ 6.439,65	\$ 10.985,28	\$ 12.311,09
	Promedio Ahorro Neto Anual	\$ 4.300,92	\$ 7.602,04	\$ 9.148,19	\$ 3.289,20	\$ 7.224,96	\$ 6.694,44
	Payback [años]	20,9	14,04	17,4	54,7	29,7	47,9
	ROI	4,8%	7,1%	5,8%	1,8%	3,4%	2,1%
Caso 2	O&M	\$ 2.323,14	\$ 3.090,47	\$ 6.112,61	\$ 4.673,78	\$ 6.217,70	\$ 12.319,94
	Promedio de Ahorro Anual	\$ 15.341,96	\$ 20.455,95	\$ 33.240,92	\$ 16.072,53	\$ 23.378,23	\$ 35.432,63
	Promedio Ahorro Neto Anual	\$ 13.018,82	\$ 17.365,49	\$ 27.128,31	\$ 11.398,76	\$ 17.160,53	\$ 23.112,69
	Payback	10,2	10,2	12,9	23,4	20,7	30,5
	ROI	9,8%	9,8%	7,8%	4,3%	4,8%	3,3%
		PTC - Económico			PTC - Eficiente		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Caso 1	O&M	\$ 1.179,67	\$ 1.926,48	\$ 2.649,72	\$ 2.323,14	\$ 3.090,47	\$ 6.112,61
	Promedio de Ahorro Anual	\$ 5.871,44	\$ 11.174,68	\$ 15.152,11	\$ 15.341,96	\$ 20.455,95	\$ 33.240,92
	Promedio Ahorro Neto Anual	\$ 4.691,77	\$ 9.248,20	\$ 12.502,38	\$ 13.018,82	\$ 17.365,49	\$ 27.128,31

	Payback	14,4	11,9	12,1	10,2	10,2	12,9
	ROI	7,0%	8,4%	8,3%	9,8%	9,8%	7,8%
	O&M	\$ 1.176,75	\$ 2.285,19	\$ 3.417,19	\$ 1.811,33	\$ 3.554,33	\$ 5.291,44
	Promedio de Ahorro Anual	\$ 11.689,12	\$ 23.012,95	\$ 34.336,78	\$ 13.515,54	\$ 25.204,66	\$ 36.163,20
Caso 2	Promedio Ahorro Neto Anual	\$ 10.512,36	\$ 20.727,76	\$ 30.919,59	\$ 11.704,21	\$ 21.650,32	\$ 30.871,76
	Payback	6,4	6,3	6,3	8,8	9,4	9,8
	ROI	15,6%	15,9%	15,8%	11,3%	10,7%	10,2%
	O&M	\$ 1.538,37	\$ 3.026,10	\$ 5.948,53	\$ 2.367,49	\$ 4.701,32	\$ 9.315,94
	Promedio de Ahorro Anual	\$ 6.667,58	\$ 16.412,50	\$ 25.644,53	\$ 10.797,70	\$ 25.644,53	\$ 37.791,94
Caso 3	Promedio Ahorro Neto Anual	\$ 5.129,20	\$ 13.386,39	\$ 19.696,00	\$ 8.430,21	\$ 20.943,21	\$ 28.476,00
	Payback	17,1	12,9	17,3	16,0	12,8	18,7
	ROI	5,8%	7,7%	5,8%	6,2%	7,8%	5,3%

A partir de la tabla anterior, fue posible realizar un análisis económico preliminar orientado a evaluar la viabilidad de la implementación de sistemas solares térmicos (STS) en cada uno de los tres casos de estudio y sus respectivos escenarios. Este análisis permitió identificar aquellos escenarios que presentan el mejor desempeño económico en términos del retorno de la inversión (ROI) y el periodo de recuperación de la inversión (Payback), considerando las configuraciones técnicas definidas para cada escenario. Asimismo, los resultados obtenidos proporcionan una base de comparación con otras tecnologías de energías renovables ampliamente utilizadas, facilitando la contextualización del desempeño económico de los STS dentro del panorama energético actual.

Teniendo en cuenta que en la presente investigación se consideraron dos criterios de evaluación económica, el retorno de la inversión (ROI) y el periodo de recuperación de la inversión (Payback), este último se establece como el indicador principal para la selección del escenario más conveniente. Esto se debe a su carácter práctico y a su utilidad en evaluaciones económicas preliminares, como la desarrollada en este estudio. Por su parte, el ROI permite comparar la rentabilidad relativa entre los distintos escenarios analizados, razón por la cual se adopta como un indicador complementario. En conjunto, la aplicación de ambos criterios proporciona una visión más integral del desempeño económico de los sistemas solares térmicos (STS) evaluados.

En este contexto, con el fin de establecer un criterio de selección para el presente estudio, se adoptó un enfoque de evaluación multicriterio, en el cual se asignaron pesos relativos a los indicadores económicos analizados. Dado que el periodo de recuperación de la inversión (Payback) tiene un impacto directo sobre el riesgo financiero y la liquidez del proyecto en sus etapas iniciales, se le otorgó una mayor importancia relativa frente al retorno de la inversión (ROI), el cual refleja la rentabilidad del proyecto en el mediano plazo. En consecuencia, se estableció una ponderación del 60% para el Payback y del 40% para el ROI, permitiendo una evaluación integrada del desempeño económico de los escenarios estudiados.

Es importante resaltar que, previo a la aplicación del procedimiento de ponderación, se establece un principio de comparabilidad, el cual hace referencia a la necesidad de normalizar los criterios con el fin de permitir su comparación en una escala común. Este paso es fundamental en evaluaciones multicriterio, especialmente cuando los indicadores analizados presentan diferentes unidades, magnitudes y direcciones de optimización (Wang, Jing, Zhang, & Zhao, 2009). En el presente estudio, dicha normalización resulta

indispensable, dado que el periodo de recuperación de la inversión (Payback) corresponde a un criterio a minimizar, mientras que el retorno de la inversión (ROI) representa un criterio a maximizar. La normalización de ambos indicadores garantiza una evaluación coherente y evita sesgos en el proceso de agregación ponderada. Teniendo en cuenta lo anterior, se establecen a continuación las expresiones matemáticas empleadas para la normalización de los criterios económicos, diferenciando entre aquellos que deben minimizarse (Payback) y los que deben maximizarse (ROI), así como la formulación correspondiente para la ponderación de los indicadores dentro del enfoque de evaluación multicriterio adoptado en este estudio.

$$Payback_{normalizado} = \frac{Payback_{min}}{Payback_i} \quad (10)$$

$$ROI_{normalizado} = \frac{ROI_i}{ROI_{max}} \quad (11)$$

$$Ponderado = 0,60 * Payback_{normalizado} + 0,40 * ROI_{normalizado} \quad (12)$$

A partir de la aplicación de las ecuaciones anteriormente descritas, se realizaron los cálculos correspondientes, obteniéndose la Tabla 36, en la cual se presentan los valores ponderados calculados para cada escenario, organizados según su respectivo caso de estudio. Estos resultados permiten comparar de manera integrada el desempeño económico de las diferentes configuraciones analizadas.

Tabla 36

Índice económico ponderado final para la selección de escenarios en cada caso de estudio

		ETC - Económico			ETC - Eficiente			
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	
		Ponderado Final	Caso 1	0,67	1,00	0,81	0,54	1,00
Caso 2	0,997		1,00	0,79	0,88	1,00	0,68	
			PTC - Económico			PTC - Eficiente		
Escenario 1	Escenario 2		Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3		
Caso 1	0,83		1,00	0,98	0,997	1,00	0,79	
Caso 2	0,98		1,00	0,998	1,00	0,94	0,90	
Caso 3	0,75		1,00	0,75	0,80	1,00	0,69	

Teniendo en cuenta la Tabla 36, se presentan los índices económicos ponderados finales correspondientes a los valores de Payback y ROI obtenidos para cada escenario. Dichos indicadores fueron previamente normalizados según lo establecido en las Ecuaciones (10) y (11), y ponderados de acuerdo con los pesos relativos asignados a cada criterio, tal como se muestra en la Ecuación (12).

Una vez aplicados los procedimientos matemáticos, se observa que varios de los escenarios analizados alcanzan un valor ponderado igual a uno (1), lo cual indica un desempeño económico favorable dentro del conjunto de alternativas evaluadas. De manera

general, el Escenario 2 se identifica como la opción más conveniente en la mayoría de los casos de estudio. No obstante, en el caso de estudio 2, bajo la configuración de colector PTC eficiente, el Escenario 1 presenta un valor ponderado superior al de los demás escenarios analizados.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, para cada tipo de colector se establecieron dos variaciones tecnológicas; por esta razón, se realiza posteriormente una comparación adicional entre los escenarios con mejor desempeño económico identificados en la tabla anterior y el CAPEX asociado a cada uno de ellos, con el fin de complementar el proceso de selección del escenario más conveniente.

Tabla 37

Comparación del CAPEX asociado a los escenarios con mejor desempeño económico (ponderado final = 1,00)

	ETC - Económico			ETC - Eficiente			
	CAPEX	Ponderado Final Económico	% reemplazo	CAPEX	Ponderado Final Económico	% reemplazo	
Caso 1	\$ 106.744,15	1,00	50	Caso 1 \$ 214.875,26	1,00	58	
Caso 2	\$ 176.598,02	1,00	56	Caso 2 \$ 355.297,32	1,00	64	
	PTC - Económico			PTC - Eficiente			
	CAPEX	Ponderado Final Económico	% reemplazo	CAPEX	Ponderado Final Económico	% reemplazo	
Caso 1	\$ 110.084,67	1,00	59	Caso 1 \$ 170.520	-	1,00	69
Caso 2	\$ 130.582,02	1,00	63	Caso 2 \$ 103.504	1,00	-	37
Caso 3	\$ 172.920,28	1,00	32	Caso 3 \$ 268.647	-	1,00	38

A partir de la tabla anterior se realiza una comparación orientada a la selección del escenario más conveniente, integrando el desempeño económico, representado por los indicadores de Payback y ROI, con el CAPEX asociado a cada configuración. Adicionalmente, se evidencia una relación directa entre los resultados económicos y el desempeño técnico, particularmente con el porcentaje de reemplazo de energía convencional alcanzado en cada escenario y tipo de colector.

En el caso de la tecnología ETC, se observa que, si bien la configuración eficiente presenta un mayor porcentaje de reemplazo energético, la inversión requerida es aproximadamente un 101 % superior respecto a la configuración económica, mientras que el incremento en el porcentaje de reemplazo es cercano al 8 %. En este contexto, la mejora técnica obtenida no compensa el incremento significativo en la inversión inicial, razón por la cual se prioriza la configuración ETC–Económico como la alternativa más conveniente desde una perspectiva técnico-económica.

Por otro lado, en el caso de la tecnología PTC, se identifica que la configuración eficiente presenta una inversión inicial aproximadamente un 55 % superior respecto a la configuración económica para los casos de estudio 1 y 3, con incrementos en el porcentaje de reemplazo del 10 % y 6 %, respectivamente. En estos casos, el aumento en el desempeño técnico resulta limitado frente al incremento del CAPEX, lo que reduce su conveniencia económica.

No obstante, para el caso de estudio 2, se observa que la configuración PTC–Económico alcanza un porcentaje de reemplazo energético aproximadamente un 26 % superior respecto a la configuración PTC–Eficiente. Aunque esta alternativa presenta una inversión inicial ligeramente mayor, el incremento significativo en el nivel de sustitución de energía convencional compensa el aumento del CAPEX. En este contexto, la configuración

PTC–Económico se perfila como una alternativa técnicamente atractiva, ya que una inversión adicional moderada permite alcanzar un mayor impacto energético, lo cual resulta especialmente relevante en proyectos orientados a maximizar la reducción del consumo de energía convencional y las emisiones asociadas.

Finalmente, el análisis económico desarrollado permitió realizar una evaluación preliminar de la viabilidad de la implementación de sistemas solares térmicos (STS) en los sectores residencial, agroindustrial e industrial. Mediante la normalización y ponderación de los indicadores económicos Payback y ROI, en conjunto con la comparación del CAPEX y el porcentaje de reemplazo anual alcanzado por cada tecnología, fue posible identificar las configuraciones que presentan el mejor equilibrio entre desempeño técnico y viabilidad financiera para cada caso de estudio.

Los resultados evidencian que, si bien las configuraciones de mayor eficiencia logran porcentajes de reemplazo superiores, estas no siempre resultan económicamente favorables frente a alternativas de menor costo inicial, las cuales ofrecen una relación más equilibrada entre inversión y aprovechamiento energético. De esta manera, se da cumplimiento al objetivo económico del proyecto, al establecer una base objetiva y comparativa para la selección de las alternativas más adecuadas de sustitución parcial de energía convencional bajo condiciones específicas de operación.

Con el fin de complementar este análisis, en los Apéndice B, Apéndice C y Apéndice D se presentan los perfiles horarios de producción térmica y su comparación con la demanda para las configuraciones seleccionadas en cada caso de estudio (residencial, agroindustrial e industrial, respectivamente), lo que permite visualizar el comportamiento dinámico de los sistemas y su capacidad de respuesta bajo condiciones reales de operación.

6. Conclusiones

La integración del análisis del recurso solar, la demanda energética, el diseño técnico y la evaluación económica, junto con el uso del software TRNSYS, permitió una evaluación integral del desempeño de los sistemas solares térmicos.

La validación del modelo mediante datos experimentales mostró diferencias térmicas entre 1,5 °C y 5,2 °C, con tendencias consistentes, confirmando la confiabilidad de TRNSYS como herramienta para el análisis y dimensionamiento de estos sistemas en aplicaciones reales.

La caracterización conjunta de la disponibilidad de DNI, la temperatura ambiente y la demanda energética permitió establecer una base sólida para el análisis técnico de los sistemas solares térmicos, evidenciando que las diferencias en los requerimientos energéticos entre los sectores industrial, agroindustrial y residencial influyen directamente en el dimensionamiento de los sistemas y en su desempeño técnico y económico.

El diseño de la topología de los sistemas solares térmicos, considerando tecnologías ETC y PTC y configuraciones orientadas a criterios económicos y de eficiencia, permitió comparar su desempeño bajo diferentes condiciones de operación.

Los resultados evidenciaron que el porcentaje de reemplazo de energía convencional depende directamente de la topología del sistema, las condiciones climáticas y la demanda energética de cada aplicación.

El estudio demuestra que la integración de sistemas solares térmicos puede contribuir de manera significativa a la reducción del consumo de energía convencional en los sectores residencial, agroindustrial e industrial, fortaleciendo su viabilidad como alternativa tecnológica en escenarios de transición energética.

El análisis económico permitió establecer una base objetiva para la evaluación preliminar de la viabilidad de proyectos de sistemas solares térmicos mediante indicadores como el Payback y el retorno de la inversión (ROI).

El análisis del Payback evidenció su relevancia en las etapas tempranas de decisión de inversión, con tiempos de repago estimados entre 10 y 30 años, según la aplicación y la tecnología considerada, sin incluir posibles incentivos o bonos gubernamentales.

El análisis del ROI mostró que las configuraciones de carácter económico presentan mayor viabilidad frente a las versiones eficientes, dado que el mayor porcentaje de reemplazo energético no compensa la inversión inicial adicional, resultando en retornos menos favorables.

7. Recomendaciones

Para futuros trabajos, se recomienda evaluar distintos escenarios de precios de la energía convencional y de costos de inversión, incorporando análisis de sensibilidad que consideren la variabilidad del mercado energético y la posible incidencia de incentivos, subsidios o políticas de apoyo a las energías renovables en el contexto colombiano, con el fin de fortalecer la solidez del análisis económico.

Adicionalmente, se sugiere incorporar estrategias de almacenamiento térmico mediante PCM orgánicos y gestión dinámica de excedentes energéticos, con el propósito de mejorar el aprovechamiento de la energía térmica generada

Referencias Bibliográficas

Ahamed, M., Guo, H., & Tanino, K. (November de 2016). Modeling of Heating Requirement in Chinese Solar Greenhouse. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE*.
doi:<https://doi.org/10.13031/aim.20162455669>

Alkilan, M. M., Sopian, K., Alghou, M. A., Sohif, M., & Ruslan, M. H. (2011). Review of solar air collectors with thermal storage units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*, 1476-1490. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.019>

Anuar Shari, M. K., Al-Abidi, A. A., Mat, S., Sopian, K., Ruslan, M. H., Sulaiman, M. Y., & Rosli, M. (February de 2015). Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42*, 557 - 568. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.034>

Aponte, R., Muñoz, F., & Álzate, L. (2017). La evaluación financiera de proyectos y su aporte en la generación de valor corporativo. *Ciencia y poder aéreo*, 144-155. doi:<http://dx.doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.567>

Arancibia Bulnes, C., & Best, R. (2010). *Energía del sol*. Ciencia.

Barón González, J. S. (2022). *Mermeladas caseras evaluación del mercado para proyección de negocio*. Bogotá.

Barragán Escandón, E., Zalamea León, E., Terrados Cepeda, J., & Vanegas Peralta, P. (2019). Factores que influyen en la selección de energías renovables en la ciudad. *EURE, Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales, 45(134)*, 259-277.

Obtenido

de

<https://www.proquest.com/docview/2166930502?parentSessionId=ykBnzEN4Ky02%2Fp%2BcKLuTnBqMaThRw0qJz0h33mLy0U8%3D>

Bertinat, P., & Navntoft, L. C. (2024). *El aporte solar térmico a la transición energética en Colombia*.

Buddhi, D., Sharma, S., & Sharma, A. (2003). Thermal performance evaluation of a latent heat storage unit for late evening cooking in a solar cooker having three reflectors. *Energy Conversion and Management*, 809 - 817.

Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). *Programa de apoyo agrícola y agroindustrial vicepresidencia de fortalecimiento empresarial cámara de comercio de Bogotá*. Bogotá.

Cano Pina , J. (2021). *Energía solar térmica* (Cano Pina ed.). Barcelona. Obtenido de <https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/a/103148>

Cardenas Acosta, Y. F. (2019). *Diseño e implementación de un colector solar para calentamiento de agua de ducha en el sector de deportes de la UTP*. Pereira .

Cárdenas Romero, L. A., & Pinto Cordero, E. (2023). *Simulación del comportamiento dinámico de un prototipo de deshumidificador para desalinización descentralizada*. Informe final de trabajo de grado en modalidad de proyecto de investigación, desarrollo tecnológico, monografía, emprendimiento y seminario., Unidades Tecnológicas de Santander, Santander, Bucaramanga.

Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 724 - 737.

doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.028>

Cargua, C., & Gustavo, J. (2018). *Simulación de un sistema de enfriamiento con rueda desecante, híbrido mediante el Software Trnsys 17*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Carrión Chamba, W., Murillo Torres, W., & Montero Izquierdo, A. (28 de Junio de 2021). Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria. (59-73, Ed.) *INGENIUS*.

Cortés, S., & Arango Londoño, A. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista Ciencias Estratégicas*.

Criz Tigse, D. A. (2021). *Repotenciación de un proceso de fabricación de manguera de polietileno en la empresa IP ELECTRIC de la ciudad de Latacunga*. Propuesta Tecnológica , Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga.

Cubillos, H. A. (2023). *Estudio de aprovechamiento de energía solar para la producción de electricidad y agua caliente en zona de alta montaña caso de estudio paramo de Santander*. Proyecto de investigación , Unidades Tecnológicas de Santander. , Santander , Bucaramanga.

De Miguel Gamo, M. T. (2019). *Estudio de nuevos fluidos caloportadores y de almacenamiento térmico y su compatibilidad con materiales de construcción en plantas termosolares*. Madrid .

Echevarría López, C. A. (2011). *Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua*.

Empresa Electrificadora de Santander (ESSA). (Noviembre de 2025). Obtenido de <https://www.essa.com.co/site/>

Figaj, R., Zoladek, M., & Goryl, W. (2020). Dynamic Simulation and Energy Economic Analysis of a Household Hybrid Ground-Solar-Wind System Using TRNSYS Software. *Energies*. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/en13143523>

Global Growth Insights. (2025). *Hydraulic Hose and Fittings Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Types, Applications and Regional Insights and Forecast to 2023*. Obtenido de <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/hydraulic-hose-and-fittings-market-116893>

Guerrero, Y. F. (2023). *Evaluación de las tecnologías existentes más adecuadas para el almacenamiento y conversión de energía renovable en electricidad y calor en zonas de alta montaña*. Monografía, Unidades Tecnológicas de Santander , Bucaramanga.

Guillén Ángel , J., & Julián , I. (25 de February de 2023). Evaluation of Technical Feasibility of Solar Heat Integration in Agri-Food Industries. *Processes*. doi:<https://doi.org/10.3390/pr11030696>

Haillot, D., Bauer, T., Kröner, U., & Tammé, R. (2011). Thermal analysis of phase change materials in the temperature range 120–150 °C. *Thermochimica Acta*, 49 - 59. doi:[10.1016/j.tca.2010.11.011](https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.11.011)

Hasan Nia , M., Abbas Nejad, A., Goudarzi, A., Valizadeh, M., & Samadian, P. (Agosti de 2014). Cogeneration solar system using thermoelectric module and fresnel lens. *Energy Conversion and Management*, 84, 305-310. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.041>

- Hasl, T., & Jiricek, I. (2018). The prediction of heat storage properties by the study of structural effect on organic phase change materials. *Energy Procedia*, 46, 301 - 309.
- Herrando, M., Wang, K., Huang, G., Otanicar, T., Mousa, O. B., Agathokleous, R., . . . Markides , C. (2023). A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors. *Progress in Energy and Combustion Science*.
- Imtiaz Hussain, M., Ménézo, C., & Kim, J.-T. (01 de Diciembre de 2018). Advances in solar thermal harvesting technology based on surface solar. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 187, 123-139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.027>
- Jankowski , N., & McCluskey, F. (2014). A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering. *Applied Energy*, 1525 - 1561. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.026>
- Jiménez, J. R. (19 de Abril de 2017). *Iluminet* . Obtenido de <https://iluminet.com/sistemas-fotovoltaicos-energia-solar/>
- Kalogirou, S. (2014). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (Third Edition ed.). doi:<https://doi.org/10.1016/C2011-0-07038-2>
- Kenisarin, M. M. (01 de July de 2014). Thermophysical properties of some organic phase change materials for latent heat storage. A review. *Solar Energy*, 553 - 575.
- Khan, M. I., Gutiérrez-Alvarez, R., Asfand, F., Bicer, Y., Sgouridis, S., Al-Ghamdi, S., . . . Farooq, M. (2024). The economics of concentrating solar power (CSP): Assessing cost competitiveness and deployment potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2000, 114551. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114551>

Laborde , L. (Mayo de 2024). Food for Profit: Commercial Production of Jams, Jellies, and Fruit Butters. *PennState Extension*.

Lamrani, B., Khouya, A., & Draoui, A. (2019). Energy and environmental analysis of an indirect hybrid solar dryer of wood using TRNSYS software. *Solar Energy*, 132-145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.014>

Larriva Arévalo, D., & Torres Jara, M. A. (2021). *Modelamiento en TRNSYS de un sistema de colectores solares, de placa plana y tubo al vacío, para la obtención de ACS en la ciudad de Cuenca, Ecuador*. Cuenca : Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca.

Li, L., & Dubowsky, S. (Octubre de 2011). A new design approach for solar concentrating parabolic dish based on optimized flexible petals. *Mechanism and Machine Theory*, 1536-1548. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.04.012>

Lizana, J., Chacartegui, R., Barrios-Padura, Á., & Valverde, J. (2017). Characterization of thermal energy storage materials for building applications. *Book of Proceedings of the 3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions* . Sevilla .

Lizcano-González, V. A. (2025). *Desarrollo de un sistema sostenible de almacenamiento de energía solar térmica en condiciones de alta montaña empleando el cambio de fase de materiales autóctonos*. Tesis de doctorado, Universidad Industrial de Santander , Bucaramanga. Obtenido de <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/e82b5a09-b6bc-4ee7-b4a1-4e13ad20ce89/content>

López Hurtado , O. (2020). *Energías Renovables Como Estrategia Para La Diversificación De La Matriz Energética De Colombia*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) , Barrancabermeja.

Ma, Y., Xi, J., Cai, J., & Gu, Z. (October de 2023). TRNSYS simulation study of the operational energy characteristics of a hot water supply system for the integrated design of solar coupled air source heat pumps. *Chemosphere*, 338, 139453. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139453>

Marulanda-Meza, S., & Burbano-Jaramillo, J. C. (2021). Evaluación energética de un deshidratador solar tipo túnel para frutas. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 31-44. doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021003>

Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Mhadhbi, M. (2018). *Phase Change Materials and Their Applications* . IntechOpen.

Moreno Valencia , D., & Morales Anaya , S. (2022). *Análisis de un prototipo concentrador lineal Fresnel mediante simulación de desempeño óptico para la elaboración de la propuesta de mejora*. Universidad Autónoma de Bucaramanga , Bucaramanga.

Naciones Unidas. (09 de Diciembre de 2020). Las emisiones de CO2 rompen otro récord: un calentamiento global catastrófico amenaza el planeta. *Noticias ONU*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2020/12/1485312>

Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

Orrego Alzate, C. E. (2003). *Procesamiento de alimentos*. Manizales.

Osornio-Cárdenas, J. I., Domínguez-Barreto, O., Miranda-Hernández, A., Reyes-Sandoval, F. A., & Vargas-Rosas, E. M. (2022). Energía Solar Térmica. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 9(18), 41- 43.

OVACEN . (2022). Energía solar térmica. *Periódico de Noticias de eficiencia energética y arquitectura*.

Pachacama Campaña, I. P. (2019). *Automatización de una máquina extrusora de plástico para incrementar la capacidad de producción de manguera de uso eléctrico*. Propuesta Tecnológica , Universidad Técnica de Cotopaxi , Latacunga.

Pereira da Cunha , J., & Eames, P. (23 de February de 2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. *Applied Energy*, 227 - 238. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>

Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (11 de March de 2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 67 - 123. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>

Rawlings , R. (2009). Chartered Institution of Building Services Engineers Content Provider. *Capturing solar energy*.

Rey Benavides, D. J. (2022). *Análisis térmico del sistema de evaporación-condensación para el tratamiento de aguas residuales avícolas*. Bucaramanga.

Rios Jimenez, D. F., & Sarmiento Martinez, E. F. (2023). *Simulación del comportamiento dinámico de un prototipo de colector lineal fresnel construido bajo el concepto de*

tecnología apropiada. Informe final de trabajo de grado en modalidad de proyecto de investigación, desarrollo tecnológico, monografía, emprendimiento y seminario., Unidades Tecnológicas de Santander , Santander , Bucaramanga.

Saettone Olschewski, E., Paredes Larroca, F., Quino Favero, J., Ponce Álvarez, S., & Eyzaquirre Pérez, R. (2017). Diseño, construcción y caracterización de un concentrador parabólico compuesto truncado con impresión 3D para desinfección de agua por fotocatalisis. *XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIV- SPES)*.

Sánchez-Barroso, G., González-Domínguez, J., & García-Sanz-Calcedo, J. (2020). Potential Savings in DHW Facilities through the Use of Solar Thermal Energy in the Hospitals of Extremadura (Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*.

Sari, A. (2006). Eutectic mixtures of some fatty acids for latent heat storage: Thermal properties and thermal reliability with respect to thermal cycling. *Energy Conversion and Management*, 1207 - 1221. doi:10.1016/j.enconman.2005.07.005

Sharma, S., Iwata, T., Kitano , H., & Sagara, K. (2005). Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit. *Solar Energy*, 416 - 426. doi:10.1016/j.solener.2004.08.001

Shobo, A., Mawire, A., & Aucamp, M. (July de 03 de 2018). Rapid thermal cycling of three phase change materials (PCMs) for cooking applications. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. doi:https://doi.org/10.1007/s40430-018-1253-y

- Shrivastava, R., Kumar, V., & Untawale, S. (January de 2017). Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 126-143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.005>
- Siddharth, S., Mohd., K. K., & Manabendra , P. (2015). Performance enhancement of solar collectors—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Solano Rincón , J. D. (2022). *Evaluación del potencial energético undimotriz en el Norte de la costa Caribe colombiana*. Tesis de Investigación , Universidad del Norte, Barranquilla.
- Suman, S., Kaleem Khan, M., & Pathak, M. (2015). Performance enhancement of solar collectors—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.087>
- Tahmineh, S., Alibakhsh, K., Kiana, R., Ameneh Haji, H., Faezeh, A., & Omid, M. (2017). Thermoeconomic and environmental analysis of solar flat plate and evacuated tube collectors in cold climatic conditions. *Renewable Energy*.
- Tang, Y., Su, D., Huang, X., Alva, G., Liu, L., & Fang, G. (17 de July de 2016). Synthesis and thermal properties of the MA/HDPE composites with nano-additives as form-stable PCM with improved thermal conductivity. *Applied Energy*, 116 - 129. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.106>
- Tao, Y., & Ya-Ling, H. (2018). A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 245 - 259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.028>

- Tarazona-Romero, B., Arenas-Gracia, A., & Jaimes-Orostegui, J. (2022). Performance Evaluation of a Parabolic Trough Collector Applying SolTrace and TRNSYS. *Science and Technology Publications SCITEPRESS*. doi:10.5220/0011959700003612
- The International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). Renewable power generation costs in 2024. *IRENA* .
- Tobaja Vázquez, M. (2012). *Energía solar térmica para instaladores* (Cuarta ed.). Cano Pina .
- Ulloa Ariza, G., & Camacho Aza , M. (2023). *Evaluación del comportamiento dinámico de un prototipo de desalinización solar indirecto por concentración*. Informe final de trabajo de grado en modalidad de proyecto de investigación, desarrollo tecnológico, monografía, emprendimiento y seminario., Unidades Tecnológicas de Santander , Santander, Bucaramanga.
- Vargas Isaza, C. A., Posada Correa, J. C., Jaramillo Zapata, L. Y., & García, L. A. (2015). Consumos de energía en la industria del plástico: revisión de estudios realizados. *Revista CEA*, 93-107.
- Vera Alves, Í., Martínez Beltrán, P., & Molina González , J. (2025). Evaluation of ventilation systems as a cooling strategy in dwellings using a validated TRNSYS model. *Scientific Reports*. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-025-09939-3>
- Vidal G, E. A., & Fontalvo G, C. (2018). Alternativa para la generación de gas natural sintético a partir de una fuente de energía renovable mediante tecnología “Power to

- Gas” en Colombia. *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, 16. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revfue.v16n1-2018006>
- Wan, Y.-c., Chen, Y., Cui, Z.-x., Ding, H., Gao, S.-f., Han, Z., & Gao, J.-k. (08 de August de 2019). A promising form-stable phase change material prepared using cost effective pinecone biochar as the matrix of palmitic acid for thermal energy storage. *Nature Research*. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-47877-z>
- Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., & Zhao, J.-H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2263-2278. doi:<https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.rser.2009.06.021>
- Wang, Z., Roffey, A., Losantos, R., Lennartson, A., Jevric, M., Petersen, A., . . . Moth-Poulsen, K. (2019). Macroscopic heat release in a molecular solar thermal energy storage system. *Energy & Environmental Science*. doi:[10.1039/c8ee01011k](https://doi.org/10.1039/c8ee01011k)
- Zhao, Y., Zhao, C., Markides, C., Wang, H., & Li, W. (2020). Medium- and high-temperature latent and thermochemical heat storage using metals and metallic compounds as heat storage media: A technical review. *Applied Energy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115950>
- Ziyaei, M., Jalili, M., Chitsaz, A., & Alhuyi Nazari, M. (2021). Dynamic simulation and life cycle cost analysis of a MSF desalination system driven by solar parabolic trough collectors using TRNSYS software: A comparative study in different world regions. *Energy Conversion and Management*, 243, 114412. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114412>

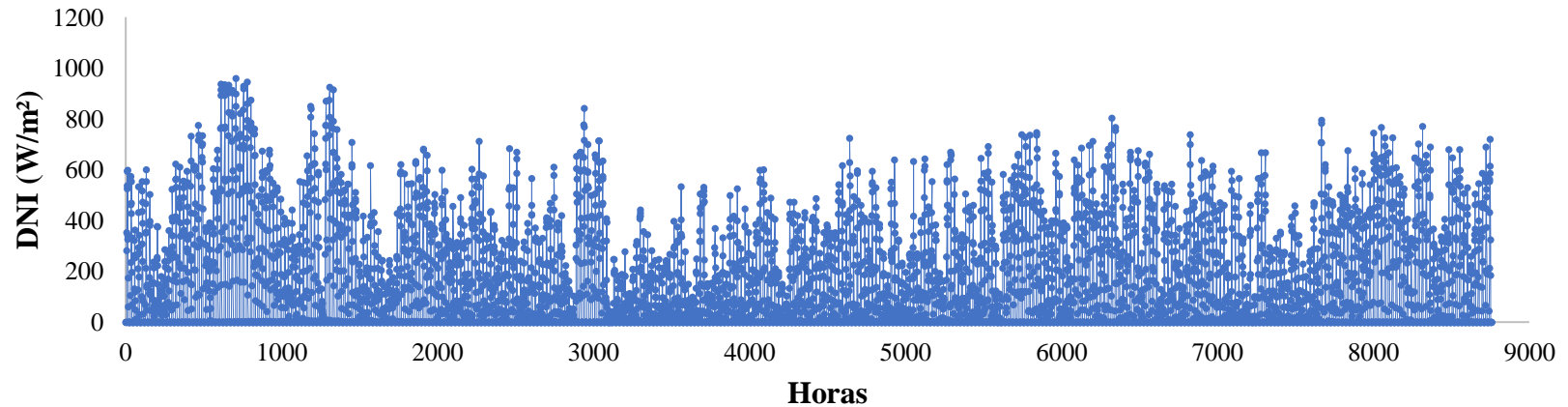
Apéndice A

Perfiles horarios de entrada para simulación en TRNSYS

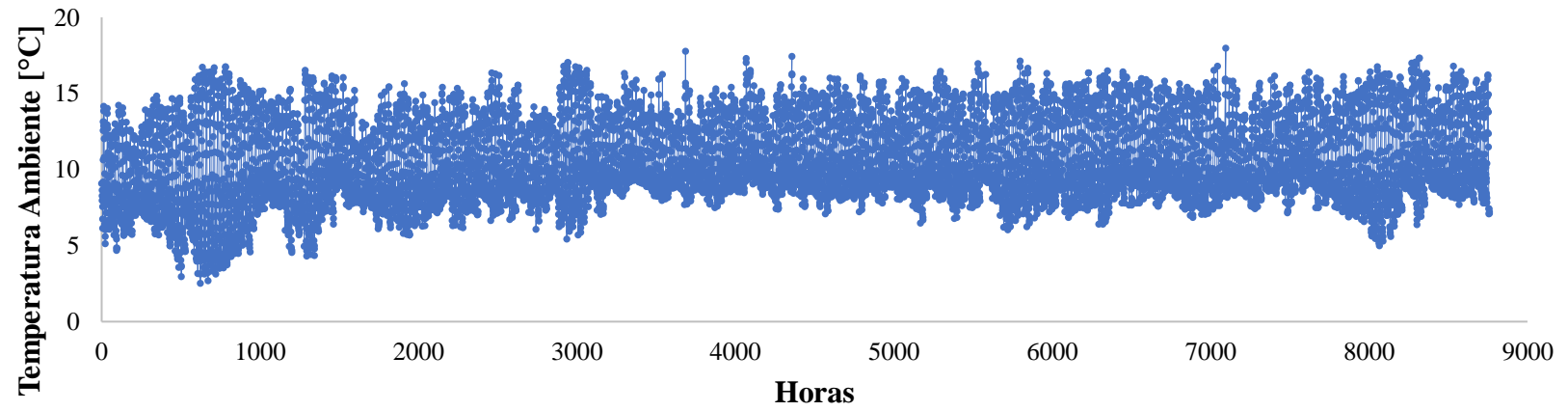
En este apéndice se presentan los perfiles horarios de irradiancia normal directa (DNI) y temperatura ambiente correspondientes al año 2023 para las tres ubicaciones analizadas: Hotel Piedra Parada, Pamplona y Girón.

Estos datos fueron obtenidos a partir de la plataforma PVGIS y constituyen la base de entrada para las simulaciones desarrolladas en el software TRNSYS. Los perfiles se presentan con resolución horaria (8760 datos) y permiten evidenciar la variabilidad temporal del recurso solar y de las condiciones térmicas a lo largo del año.

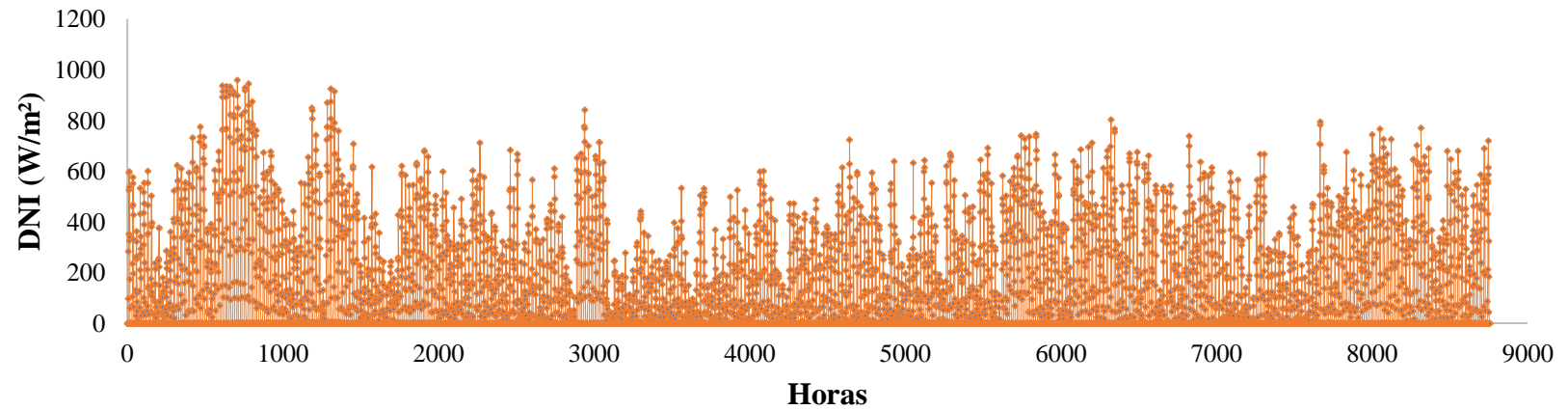
Piedra Parada - DNI Perfil Horario



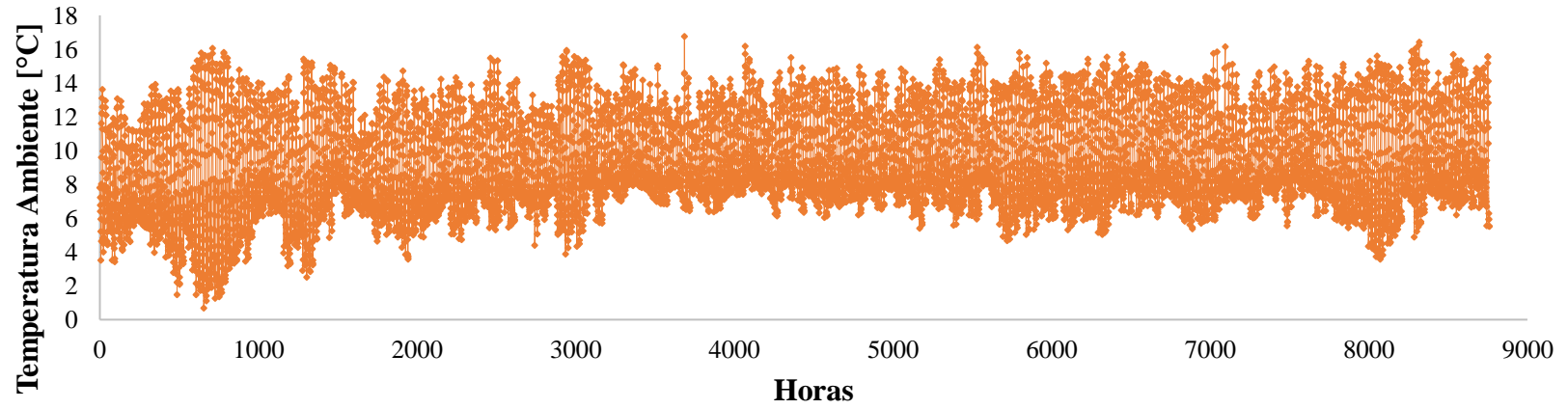
Piedra Parada - Temperatura Ambiente Perfil Horario



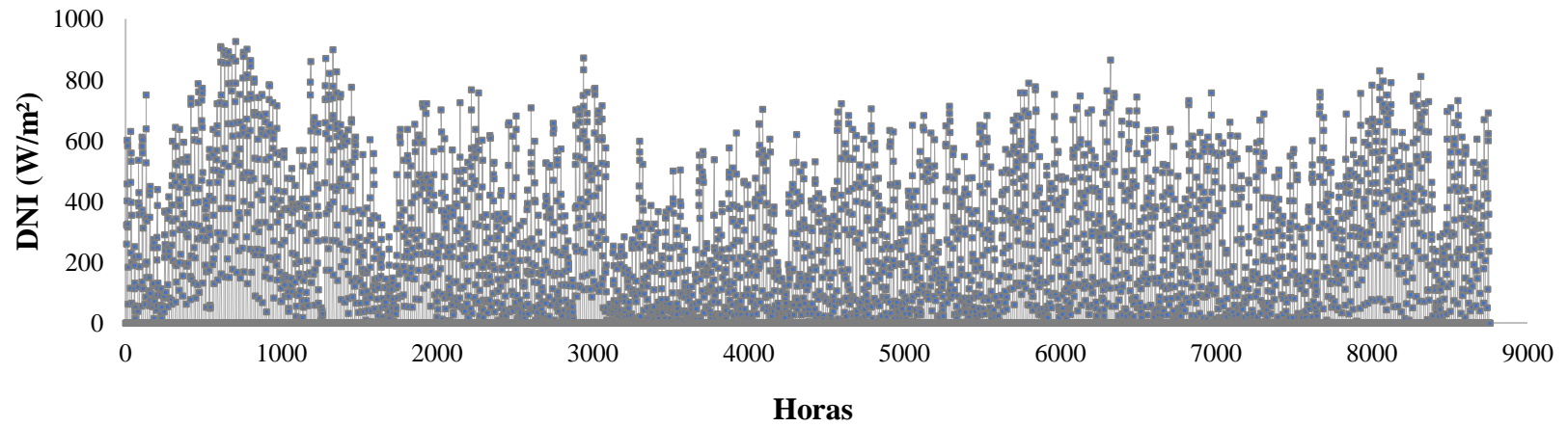
Pamplona - DNI Perfil Horario



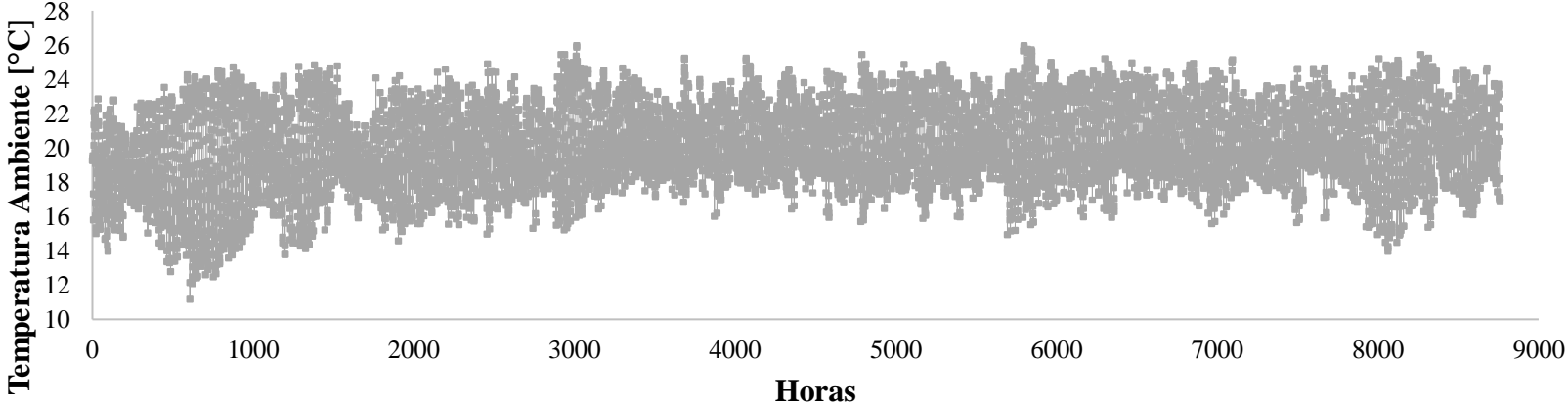
Pamplona - Temperatura Ambiente Perfil Horario



Girón - DNI Perfil Horario



Girón - Temperatura Ambiente Perfil Horario



Apéndice B

Perfiles horarios de producción y demanda térmica – Caso 1 – Estudio Residencial

En este apéndice se presentan los perfiles horarios de producción de energía térmica obtenidos mediante simulación en el software TRNSYS para el caso de estudio residencial, considerando las configuraciones tecnológicas seleccionadas a partir del análisis de prefactibilidad técnico-económica. Estas configuraciones corresponden a aquellas que presentan el mejor desempeño en términos de viabilidad financiera y aprovechamiento energético, de acuerdo con los resultados previamente discutidos.

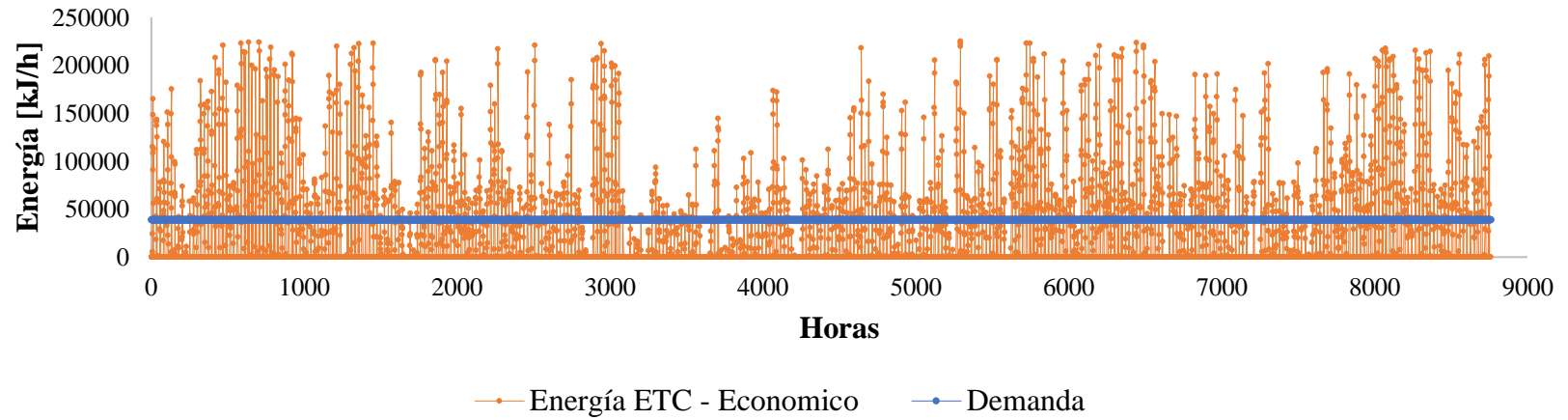
Las figuras incluidas muestran la variación de la energía térmica generada a lo largo del año (8760 horas), en comparación con la demanda térmica del sistema, lo que permite analizar el comportamiento dinámico de cada tecnología, así como identificar periodos de sobreproducción y déficit energético. Para este caso, caracterizado por una alta demanda operativa, se considera la integración de un sistema de almacenamiento térmico que contribuye a gestionar los excedentes de energía; sin embargo, se evidencia la necesidad de mantener una fuente de energía convencional de respaldo, dado que no se alcanza un reemplazo total del 100%.

La información aquí presentada complementa el análisis desarrollado en el capítulo de resultados, proporcionando un mayor nivel de detalle sobre la operación de los sistemas en condiciones reales. Apéndices posteriores presentan análisis equivalentes para los demás casos de estudio considerados.

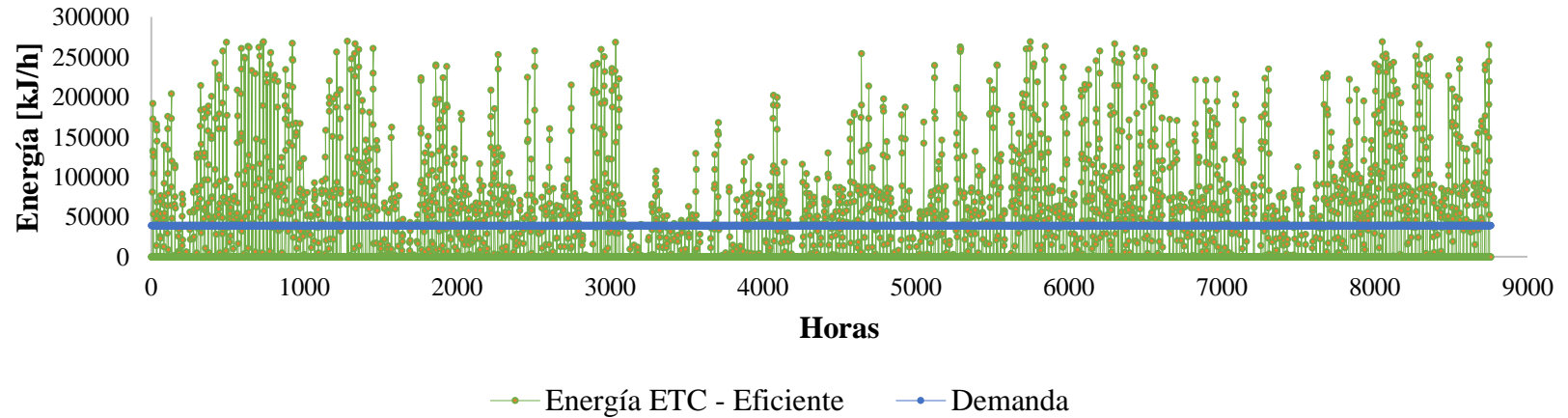
La información aquí presentada complementa el análisis desarrollado en el capítulo de resultados, proporcionando un mayor nivel de detalle sobre la operación de los sistemas

en condiciones reales. Apéndices posteriores presentan análisis equivalentes para los demás casos de estudio considerados.

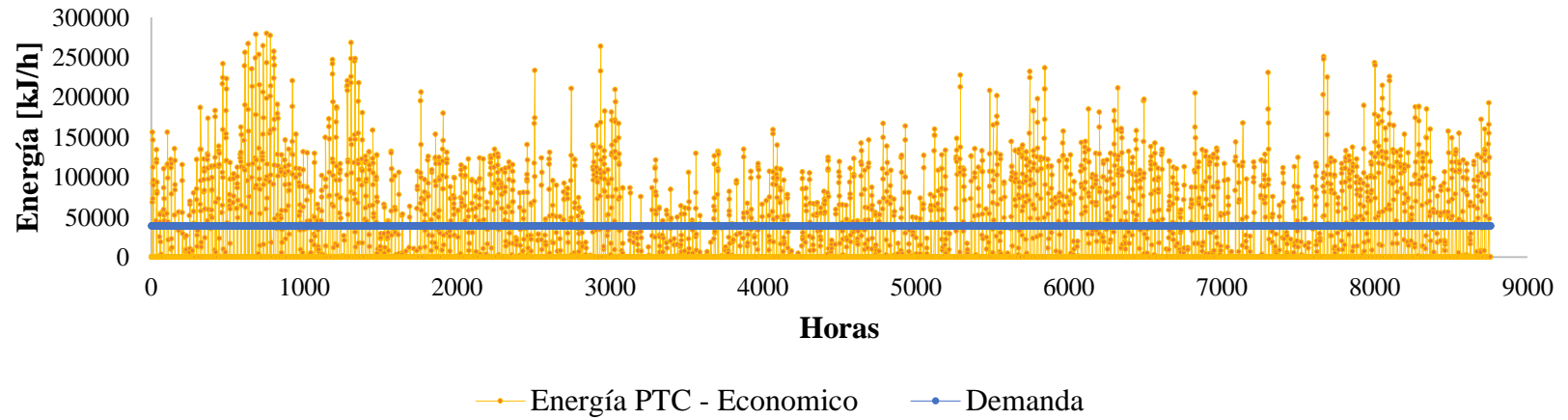
Caso 1 - ETC Económico - Escenario 2 - 120 U



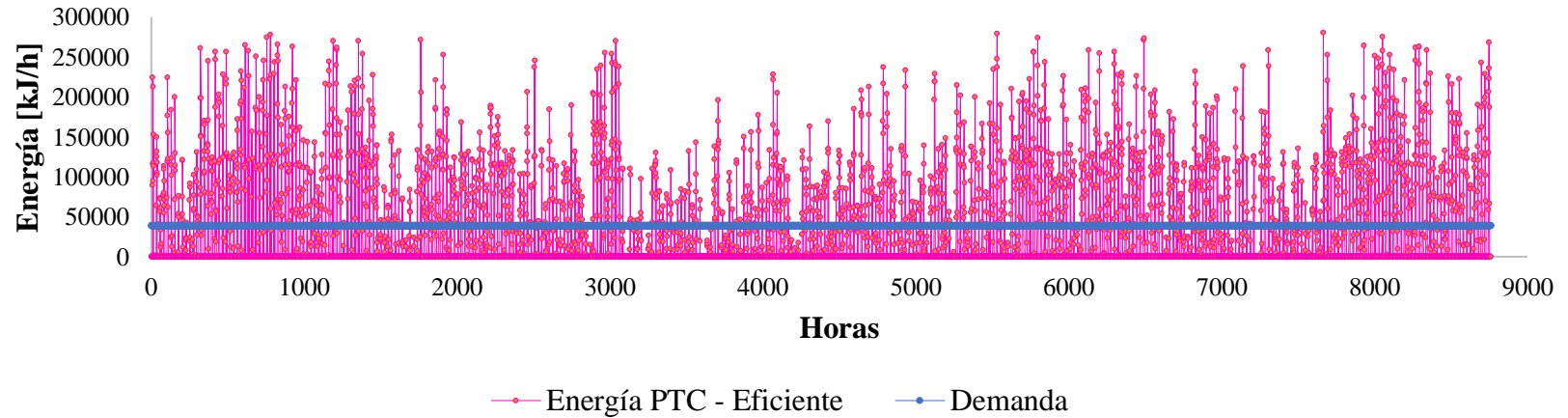
Caso 1 - ETC Eficiente - Escenario 2 - 176 U



Caso 1 - PTC Económico - Escenario 2 - 5 U



Caso 1 - PTC Eficiente - Escenario 2 - 5 U

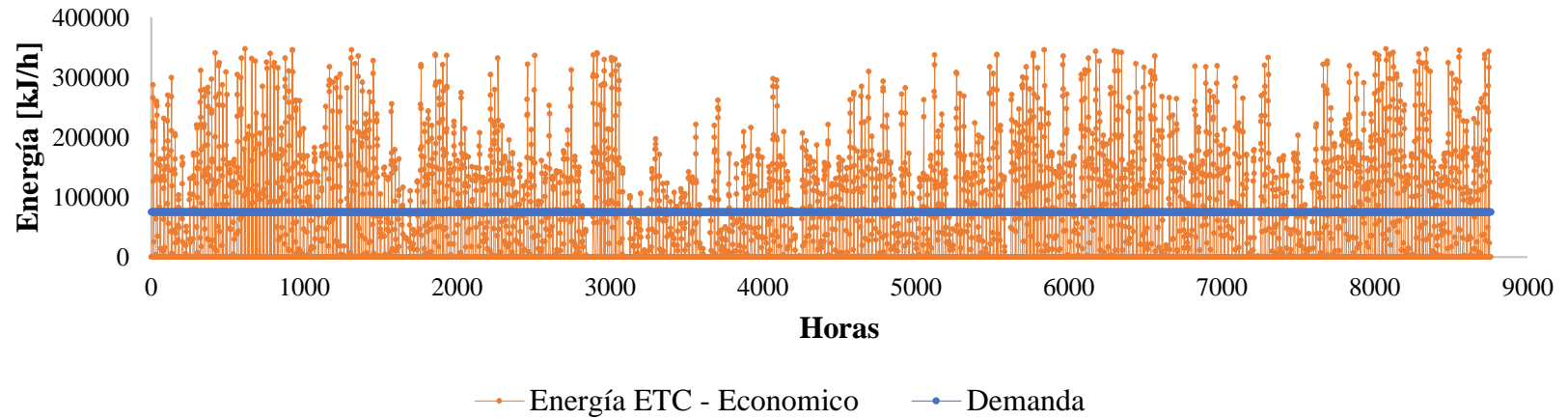


Apéndice C

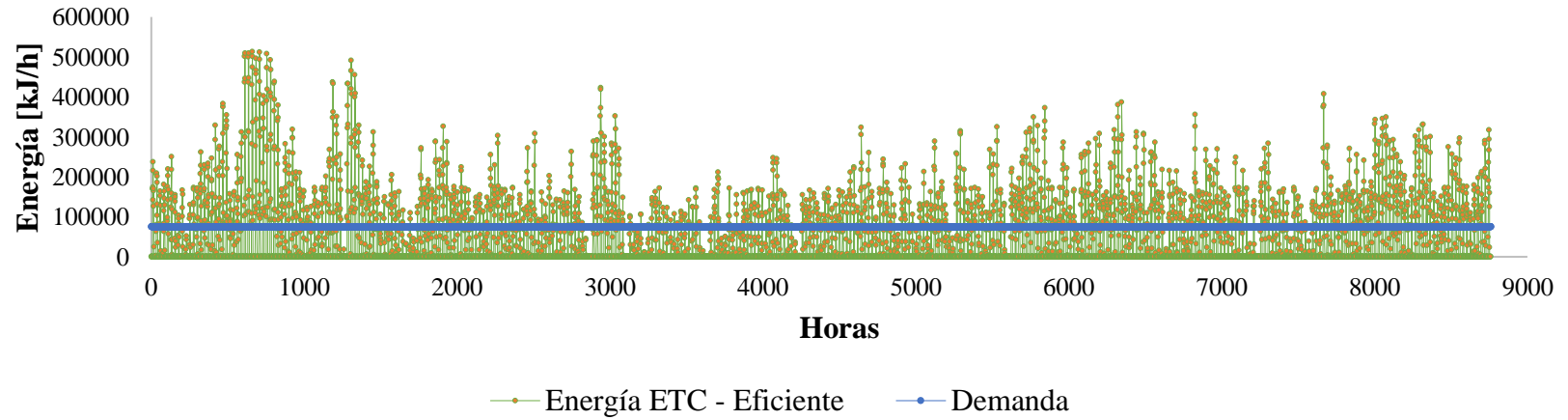
Perfiles horarios de producción y demanda térmica – Caso 2 – Estudio Agroindustrial

Las figuras incluidas muestran la variación de la energía térmica generada a lo largo del año (8760 horas), en comparación con la demanda térmica del sistema, permitiendo analizar el comportamiento dinámico de cada tecnología e identificar periodos de coincidencia o desajuste entre la generación y el consumo. A diferencia del caso residencial, en este escenario no se considera un sistema de almacenamiento térmico, empleándose un fluido de transferencia de calor (aceite térmico), lo que implica que la energía generada debe ser utilizada de forma inmediata. Adicionalmente, el sistema opera bajo un régimen de aproximadamente 8 horas diarias, lo cual condiciona el aprovechamiento del recurso solar y limita la utilización de la energía generada fuera de los periodos de operación.

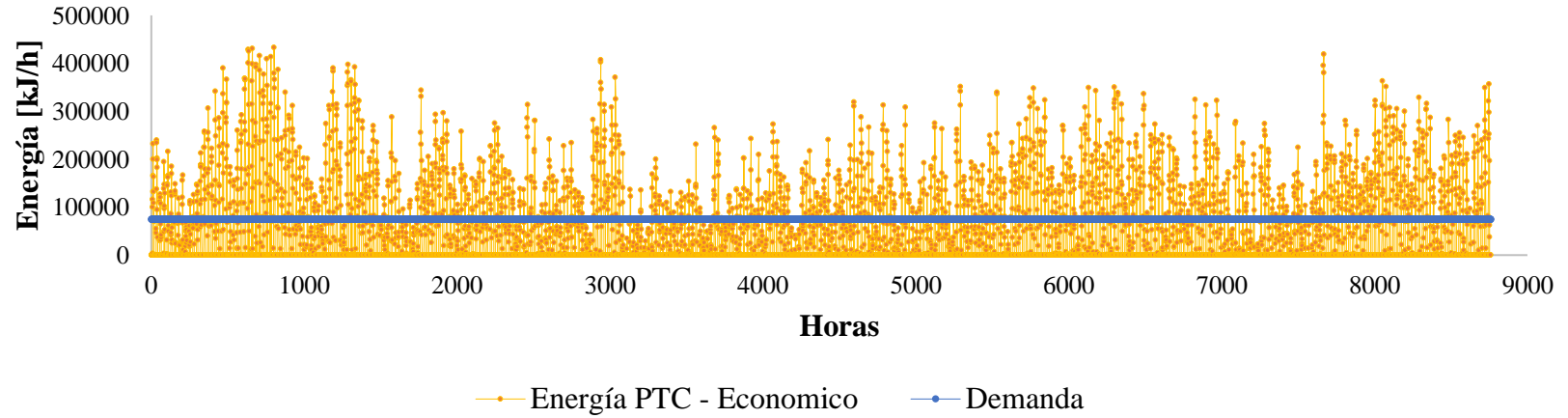
Caso 2 - ETC Económico - Escenario 2 - 200 U



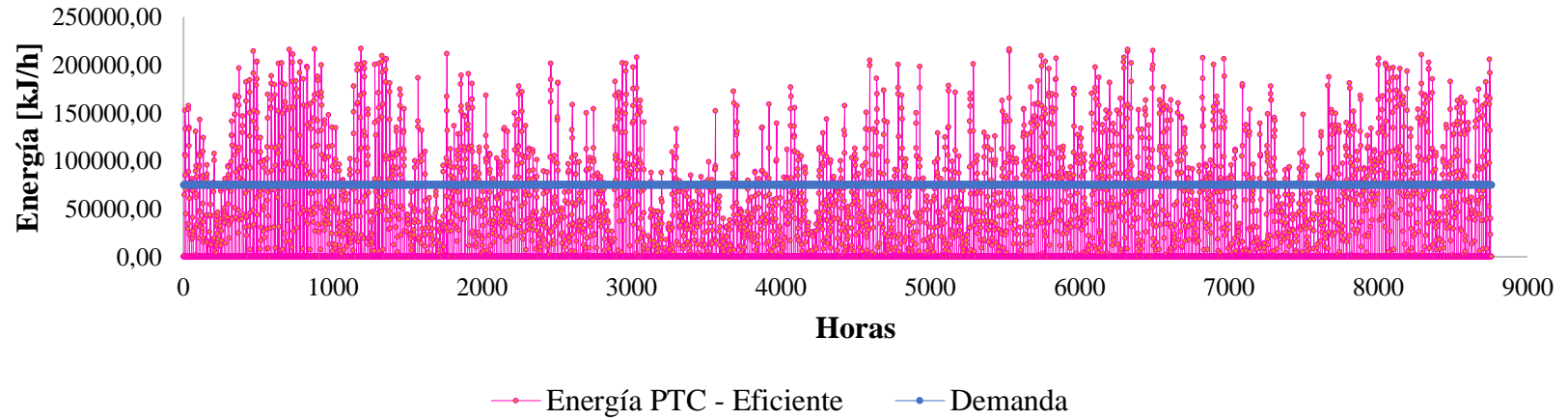
Caso 2 - ETC Eficiente - Escenario 2 - 293 U



Caso 2 - PTC Económico - Escenario 2 - 6 U



Caso 2 - PTC Eficiente - Escenario 2 - 3 U



Apéndice D

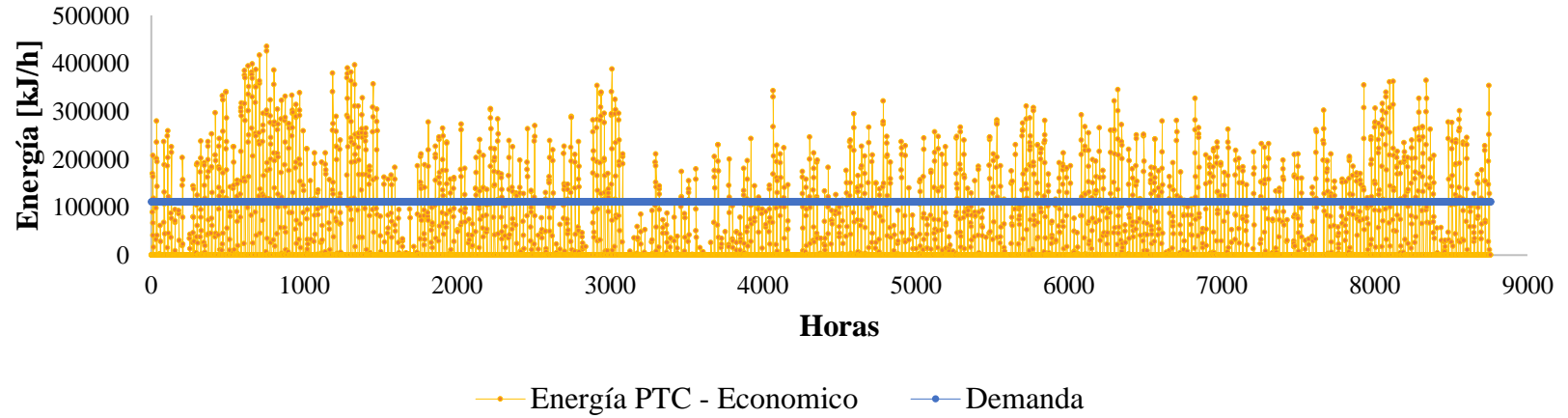
Perfiles horarios de producción y demanda térmica – Caso 3 – Estudio Industrial

Al igual que en el caso agroindustrial, este escenario opera bajo un régimen aproximado de 8 horas diarias y no contempla un sistema de almacenamiento térmico, empleándose un fluido de transferencia de calor (aceite térmico), lo que implica que la energía generada debe ser utilizada de manera inmediata.

Adicionalmente, debido a los requerimientos de temperatura propios del proceso industrial analizado, se emplean exclusivamente colectores cilindro-parabólicos (PTC), los cuales presentan un mejor desempeño en aplicaciones de media y alta temperatura en comparación con otras tecnologías.

La información aquí presentada complementa el análisis desarrollado en el capítulo de resultados, proporcionando un mayor nivel de detalle sobre la operación de los sistemas en condiciones reales.

Caso 3 - PTC Económico - Escenario 2 - 8 U



Caso 3 - PTC Económico - Escenario 2 - 8 U

