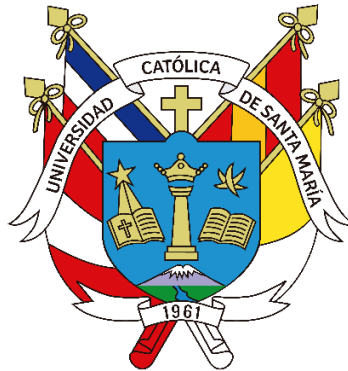


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y
Mecatrónica



**Optimización de consumo de combustible de una caldera de vapor
industrial de 60 BHP con un precalentamiento de agua mediante colectores
solares**

Tesis presentada por el Bachiller:

Mancilla Manrique, Jorge Manuel

ORCID: 0009-0006-6323-8173

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Asesor:

Dr. Arévalo Daza, Jorge Luis

ORCID: 0000-0001-5516-8642

Arequipa – Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 20 de Junio del 2025

Dictamen: 012354-C-EPIMMEM-2025

Visto el borrador del expediente 012354, presentado por:

2015101231 - MANCILLA MANRIQUE JORGE MANUEL

Titulado:

**OPTIMIZACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UNA CALDERA DE VAPOR
INDUSTRIAL DE 60 BHP CON UN PRECALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE
COLECTORES SOLARES**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO MECÁNICO

**29387211 - FERNANDEZ BARRIGA CAMILO GRIMALDO
DICTAMINADOR**



**29685318 - CASTRO VALDIVIA JORGE LUIS
DICTAMINADOR**



**29644724 - CARPIO RIVERA MARCO ANTONIO
DICTAMINADOR**



Optimización de consumo de combustible de una caldera de vapor industrial de 60 BHP con un precalentamiento de agua mediante colectores solares

INFORME DE ORIGINALIDAD

24%

INDICE DE SIMILITUD

23%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

tesis.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

11%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

2%

3

repositorio.comillas.edu

Fuente de Internet

1%

4

Submitted to Universidad Católica de Santa María

Trabajo del estudiante

1%

5

www.scribd.com

Fuente de Internet

1%

6

repositorio.unsa.edu.pe

Fuente de Internet

1%

7

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1%

8

rinacional.tecnm.mx

Fuente de Internet

<1%

9

dspace.ups.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

10

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

<1%

11

alicia.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

<1%

12

bibdigital.epn.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

13

repositorio.uss.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

DEDICATORIA

A todos aquellos que, en silencio y sin esperar nada a cambio, siembran semillas de bondad y sabiduría en los surcos más profundos de nuestras almas. A las incontables horas de esfuerzo y dedicación que, aunque invisibles a los ojos, han moldeado este camino. A cada instante de inspiración que brota de los rincones más inesperados del universo, dedicamos este trabajo como un humilde reflejo de la luz que nos han brindado.



AGRADECIMIENTOS

Antes de cruzar el umbral de este logro, me detengo un momento para mirar atrás y agradecer a cada paso dado, a cada obstáculo superado. Mi gratitud se extiende hacia el infinito: a mi familia, por su amor incondicional y su fe inquebrantable en mis sueños; a mis amigos, por su apoyo y compañía en los momentos más oscuros; a mis mentores, por su invaluable sabiduría y guía. A todos los que de alguna manera han contribuido a este viaje, su presencia ha sido el faro que me ha guiado a través de las tempestades hacia la orilla de la realización.



EPÍGRAFE

"En el corazón de la noche, bajo el vasto cielo estrellado, recordamos que cada estrella es un faro de esperanza y cada sueño un universo por explorar. Que la luz de nuestro esfuerzo ilumine los caminos de quienes siguen nuestros pasos, como las estrellas guían a los viajeros en la inmensidad de la noche.



RESUMEN

La tesis aborda la necesidad de optimizar la eficiencia de combustible de una caldera industrial de vapor mediante la implementación de un sistema de precalentamiento solar. El objetivo principal es reducir el consumo de combustible y mejorar la eficiencia energética de la caldera utilizando colectores solares para calentar el agua de alimentación. Esta solución no solo busca reducir los costos operativos sino también contribuir a la sostenibilidad y al cuidado del medio ambiente, alineándose con los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el uso de energías renovables.

La metodología utilizada en el estudio se centró en un análisis detallado de la demanda actual de vapor y las necesidades energéticas de la caldera de 60 BHP. Se realizaron cálculos para estimar la eficiencia del sistema de calderas y se utilizó software especializado para diseñar el sistema de precalentamiento solar. Además, se llevó a cabo un análisis financiero para evaluar la rentabilidad del proyecto, incluyendo el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y el tiempo de recuperación de la inversión. Se consideraron diversos aspectos técnicos, económicos y medioambientales para desarrollar una propuesta sólida y viable.

El sistema de precalentamiento solar diseñado dirige el agua calentada desde los colectores solares hacia el tanque de condensado, donde se integra con el circuito de alimentación de la caldera. Esta configuración permite una adaptación funcional sin comprometer la operación del sistema existente. Se determinó que el sistema puede cubrir entre el 91 % de la demanda energética mensual, logrando un ahorro anual total de 165,640.52 kWh y elevando la temperatura del agua desde 7.80 °C hasta un rango de 65.97°C (julio) a 102.67°C (noviembre). El sistema fue validado mediante el software System Advisor Model (SAM), demostrando su viabilidad técnica y económica, al alcanzar un Valor Actual Neto (VAN) de USD 115,256.47, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 65 %, y una recuperación de la inversión en aproximadamente 5 años. Estos resultados confirman que el sistema no solo optimiza el uso energético, sino que también reduce considerablemente los costos operativos de la caldera industrial.

Palabras claves: Optimización de la caldera, Eficiencia, Precalentamiento solar.

ABSTRACT

The thesis addresses the need to optimize the efficiency of an industrial steam boiler by implementing a solar preheating system. The main objective is to reduce fuel consumption and improve the energy efficiency of the boiler by using solar collectors to heat the feed water. This solution not only seeks to reduce operating costs but also to contribute to sustainability and environmental care, aligning with the objectives of reducing greenhouse gas emissions and the use of renewable energy.

The methodology used in the study focused on a detailed analysis of the current steam demand and energy needs of the 60 BHP boiler. Calculations were performed to estimate the efficiency of the boiler system and specialized software was used to design the solar preheating system. In addition, a financial analysis was conducted to assess the profitability of the project, including the calculation of the Net Present Value (NPV) and the payback time of the investment. Various technical, economic, and environmental aspects were considered to develop a solid and viable proposal.

The conclusions of the study demonstrate that the implementation of the solar preheating system for the industrial steam boiler is highly effective and profitable. It was determined that the system can cover 91% of monthly energy demand, achieving total annual savings of 165,640.52 kWh and raising the water temperature from 7.80°C to a range of 65.97°C (July) to 102.67°C (November). The system was validated using the System Advisor Model (SAM) software, demonstrating its technical and economic feasibility by achieving a Net Present Value (NPV) of USD 115,256.47, an Internal Rate of Return (IRR) of 65%, and a payback of the investment in approximately 5 years. These results confirm that the system not only optimizes energy use, but also considerably reduces the operating costs of the industrial boiler.

Keywords: Boiler optimization, Efficiency, Solar preheating.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
EPÍGRAFE	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1. Marco Metodológico	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Problema Principal.....	3
1.3. Justificación	3
1.4. Alcances.....	4
1.5. Limitaciones.....	4
1.6. Hipótesis	4
1.7. Antecedentes	5
1.8. Objetivos.....	7
1.8.1. Objetivos General.....	7
1.8.2. Objetivos Específicos	7
1.9. Operacionalización de variables	8
CAPÍTULO II.....	9
2. Marco teórico.....	9
2.1. Bases teóricas.....	9
2.1.1. Aspectos de transferencia de calor	9
2.1.2. Energía solar térmica.....	10
2.1.3. Precalentamiento solar.....	10
2.1.4. Caldera.....	11
Tipos de Caldera.....	11
2.1.5. Colectores solares	12
2.1.5.1. Tipos de colectores solares.....	13
2.1.6. Radiación instantánea sobre superficies horizontales	20
2.1.7. Radiación diaria promedio sobre superficies inclinadas	22
CAPÍTULO III	26
3. Diseño del sistema de calentamiento de agua mediante colectores solares	26
3.1. Evaluación de la demanda requerida	26

3.2.	Parámetros por utilizar	26
3.3.	Generación de vapor	26
3.4.	Especificaciones del sistema solar	26
3.4.1.	Estimación de la necesidad energética	26
3.4.2.	Parámetros meteorológicos del lugar de instalación	28
3.4.3.	Cálculo de la declinación.....	29
3.4.4.	Cálculo del ángulo de horas de asoleamiento.....	30
3.4.5.	Cálculo de la radiación en el exterior de la atmósfera.....	31
3.4.6.	Radiación solar promedio sobre una superficie horizontal	32
3.4.7.	Estimación de la radiación solar sobre una superficie horizontal	33
3.4.8.	Fracción de irradiación promedio mensual	34
3.4.9.	Componentes de la radiación total sobre una superficie horizontal	35
3.4.10.	Radiación solar promedio sobre una superficie inclinada	36
3.4.11.	Coefficiente de conversión de radiación directa	37
3.4.12.	Radiación global promedio sobre una superficie inclinada	39
3.4.13.	Selección del colector solar	42
3.4.14.	Selección del colector solar	43
3.4.15.	Dimensionamiento del área colectora.....	44
3.4.16.	Energía útil acumulada del colector solar.....	45
3.4.17.	Número de colectores requeridos.....	46
3.4.18.	Cálculo de áreas de implementación del sistema.....	47
3.4.19.	Análisis de funcionamiento del sistema solar	48
3.5.	Cálculo de ahorro de combustible	51
3.6.	Simulación en System Advisor Model (SAM).....	52
3.7.	Recolección de datos de la investigación	52
3.8.	Configuración en SAM.....	55
3.9.	Simulación y análisis	57
3.9.1.	Energía ahorrada mensual por el sistema solar	58
CAPÍTULO IV		60
4.	Análisis comparativo detallado de los tres sistemas de colectores solares.....	60
4.1.	Análisis de costos.....	68
4.1.1.	Costo de la inversión inicial para el sistema de precalentamiento solar	68
4.2.	Valor Actual Neto (VAN).....	70
4.2.1.	Cálculo del Valor Actual Neto (VAN).....	70
CONCLUSIONES.....		75
RECOMENDACIONES		77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		78

ANEXOS.....	81
Ficha técnica.....	83
APENDICES	88



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Tipos de colectores</i>	14
Tabla 2 <i>Valores de los coeficientes del modelo Bristow - Campbell</i>	15
Tabla 3 <i>Día promedio recomendado para cada mes</i>	16
Tabla 4 <i>Albedo de distintas superficies</i>	25
Tabla 5 <i>Características de la caldera</i>	26
Tabla 6 <i>Temperatura de inicio</i>	27
Tabla 7 <i>Energía requerida (kW)</i>	28
Tabla 8 <i>Datos de la estación meteorológica “La Pampilla”</i>	28
Tabla 9 <i>Declinación para cada día promedio del año</i>	30
Tabla 10 <i>Angulo de horas de asoleamiento para cada día promedio del año</i>	31
Tabla 11 <i>Radiación en el exterior de la atmósfera</i>	32
Tabla 12 <i>Coeficientes del modelo Bristow - Campbell</i>	33
Tabla 13 <i>Radiación solar sobre una superficie horizontal</i>	33
Tabla 14 <i>Fracción de irradiación promedio mensual</i>	34
Tabla 15 <i>Componentes de la radiación total sobre una superficie horizontal</i>	35
Tabla 16 <i>Ángulo de horas de asoleamiento</i>	37
Tabla 17 <i>Coeficiente de conversión de radiación directa</i>	37
Tabla 18 <i>Radiación global promedio sobre una superficie inclinada</i>	39
Tabla 19 <i>Tipos de colectores</i>	42
Tabla 20 <i>Energía útil acumulada del colector solar (kWh /m² /Día)</i>	45
Tabla 21 <i>Numero de colectores</i>	46
Tabla 22 <i>Energía entregada por el sistema solar</i>	48
Tabla 23 <i>Temperatura pronosticada entregada por el sistema</i>	50
Tabla 24 <i>Cálculo de ahorro de combustible al calentar el agua</i>	51
Tabla 25 <i>Comparación entre el Software SAM y datos calculados</i>	59
Tabla 26 <i>30 colectores</i>	60
Tabla 27 <i>50 colectores</i>	61
Tabla 28 <i>70 Colectores</i>	62
Tabla 29 <i>Cantidad de componentes en la inversión inicial</i>	68
Tabla 30 <i>Costos en dólares</i>	69
Tabla 31 <i>Tabla resumen</i>	71
Tabla 32 <i>Evaluación económica del sistema solar: VAN y TIR a 10 años</i>	73

Tabla 33 <i>Factor rd</i>	89
Tabla 34 <i>Factor de conversión rG</i>	91
Tabla 35 <i>Factor rg</i>	92
Tabla 36 <i>Radiación global Instantánea sobre una superficie horizontal (G - W/m²)</i>	94
Tabla 37 <i>Radiación difusa Instantánea sobre una superficie horizontal (D - W/m²)</i>	96
Tabla 38 <i>Radiación directa instantánea sobre una superficie horizontal (Ih - W/m²)</i>	98
Tabla 39 <i>Cos (θ)</i>	102
Tabla 40 <i>Seno (h)</i>	104
Tabla 41 <i>Factor Rb</i>	106
Tabla 42 <i>Radiación global instantánea sobre una superficie inclinada</i>	108
Tabla 43 <i>Temperatura ambiente en la estación meteorológica de “La Pampilla”</i>	110
Tabla 44 <i>Velocidad viento en la estación meteorológica de “La Pampilla”</i>	111



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Tipos de calderas</i>	11
Figura 2 <i>Colector solar plano</i>	13
Figura 3 <i>Colector de tubos de vacío</i>	13
Figura 4 <i>Diagrama de propuesta</i>	41
Figura 5 <i>Colectores de placa plana de cubierta simple</i>	42
Figura 6 <i>Ficha técnica del colector solar Prisma Solar</i>	43
Figura 7 <i>Plano referencial del sistema de precalentamiento solar</i>	47
Figura 8 <i>Datos a llenar en el software</i>	53
Figura 9 <i>Cuadro de dialogo del software SAM</i>	55
Figura 10 <i>Diferentes parámetros evaluados en el software</i>	57
Figura 11 <i>Energía ahorrada mensual por el sistema solar</i>	58
Figura 12 <i>Ahorro de consumo de gas por día</i>	65
Figura 13 <i>Ahorro económico mensual (Soles)</i>	66
Figura 14 <i>Consumo mensual de gas</i>	67

LISTA DE ACRÓNIMOS

1. **BHP** - Brake Horse Power (Potencia de Freno).
2. **CO₂** – Dióxido de Carbono
3. **GLP** – Gas Licuado de Petróleo
4. **USD** – Dólares Estadounidenses
5. **VAN** – Valor Actual Neto
6. **VAN acumulado** – Valor Actual Neto acumulado
7. **TIR** – Tasa Interna de Retorno
8. **NPV** – Net Present Value (Valor Presente Neto en inglés)
9. **IRR** – Internal Rate of Return (Tasa Interna de Retorno en inglés)
10. **SAM** – System Advisor Model (Modelo Asesor del Sistema)
11. **NSRDB** – National Solar Radiation Database (Base Nacional de Datos de Radiación Solar)
12. **IDAE** – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (España)
13. **FR_{ta}** – Factor de rendimiento óptico del colector
14. **FR_{UL}** – Coeficiente de pérdida térmica del colector
15. **IAM** – Incidence Angle Modifier (Modificador del ángulo de incidencia)
16. **Q transmitida** – Energía térmica transmitida (kW)
17. **T ambiente** – Temperatura ambiente (°C)
18. **T caliente** – Temperatura del agua caliente (°C)
19. **SAM CSV** – Formato de entrada de datos para SAM (.csv)

INTRODUCCIÓN

Se planteó la necesidad de optimizar la eficiencia de las calderas industriales mediante el aprovechamiento de fuentes renovables. Se propuso implementar un sistema de precalentamiento solar que utilizara la energía solar para calentar el agua suministrada a la caldera, con el fin de reducir el consumo de combustible y mejorar la eficiencia general del sistema.

La implementación de este sistema ofrecía ventajas significativas, como la reducción de costos operativos y el uso de energía renovable, lo cual contribuía a la sostenibilidad y al cuidado del medio ambiente. Además, se consideró que esta solución promovía la competitividad de la empresa al mejorar su eficiencia energética.

En este estudio, se abordaron diferentes aspectos relacionados con el diseño y la implementación del sistema de precalentamiento solar. Se analizó la demanda actual del servicio de vapor, se propuso una solución al problema identificado, se diseñó el sistema de precalentamiento solar y se evaluó el costo beneficio de las propuestas de solución.

Se utilizaron métodos de análisis, cálculos y evaluación financiera para respaldar las decisiones y recomendaciones planteadas. Se consideraron aspectos técnicos, económicos y medioambientales para obtener resultados sólidos y una propuesta viable para la empresa.

CAPÍTULO I

1. Marco Metodológico

1.1. Planteamiento del problema

En un mundo cada vez más consciente de la sostenibilidad y la eficiencia energética, la optimización del consumo de combustible en procesos industriales ha adquirido una relevancia crucial. La creciente demanda global de energía, junto con la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ha impulsado el desarrollo y la implementación de tecnologías que minimicen el uso de combustibles fósiles en la generación de calor y energía. Dentro de este contexto, la industria busca constantemente soluciones que no solo reduzcan el impacto ambiental, sino que también resulten económicamente viables y eficientes.

A nivel global, las calderas industriales juegan un papel fundamental en la producción de vapor para una variedad de procesos industriales, desde la generación de electricidad hasta la producción de alimentos y productos químicos. Estas calderas, que a menudo operan con combustibles fósiles como el gas natural, el carbón o el petróleo, representan una fuente significativa de consumo energético y emisiones de carbono. La optimización de su eficiencia es, por lo tanto, una prioridad para muchas industrias que buscan reducir costos operativos y cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas (Acosta, 2024)

El uso de energías renovables, como la solar, para el precalentamiento del agua en sistemas de calderas, ha surgido como una solución prometedora para mejorar la eficiencia energética de estas instalaciones. Los colectores solares térmicos, que capturan la energía del sol para calentar el agua antes de su ingreso a la caldera, pueden reducir significativamente el consumo de combustible, ya que disminuyen la cantidad de energía requerida para alcanzar la temperatura de operación deseada. Esta tecnología no solo contribuye a la reducción de costos de operación, sino que también mitiga las emisiones de CO₂, alineándose con las metas globales de sostenibilidad.

En América Latina, y particularmente en Perú, la adopción de tecnologías para la optimización energética en la industria ha ido ganando terreno en los últimos años. Perú, con una economía en crecimiento y un sector industrial en expansión, enfrenta desafíos significativos en términos de eficiencia energética y sostenibilidad. El país ha experimentado

un incremento en la demanda de energía, lo que ha llevado a un mayor consumo de combustibles fósiles y, consecuentemente, a un aumento en las emisiones de gases contaminantes. La necesidad de adoptar tecnologías que optimicen el uso de energía en el sector industrial es, por tanto, un tema de gran relevancia para Perú.

Es por ello por lo que la presente investigación se centra en la optimización consumo de combustible de la caldera de vapor industrial de 60 BHP con un precalentamiento de agua mediante colectores solares. Este modelo, que se utiliza ampliamente en la industria nacional, puede beneficiarse enormemente de la integración de un sistema de precalentamiento solar. Al reducir la cantidad de combustible necesario para calentar el agua, no solo se disminuyen los costos operativos, sino que también se reduce la dependencia de combustibles fósiles y se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2. Problema Principal

¿Será posible que mediante un precalentamiento de agua mediante colectores solares Optimizar el consumo de combustible de una caldera de vapor industrial?

1.3. Justificación

Aprovechando que energía la solar representa un recurso abundante, limpio y disponible en zonas con alta radiación solar como Arequipa, Perú. Su aprovechamiento mediante colectores solares térmicos permite precalentar el agua que alimenta calderas industriales, disminuyendo la energía requerida para alcanzar la temperatura de operación y, por ende, reduciendo el consumo de combustibles fósiles. Esta medida no solo mitiga el impacto ambiental generado por las emisiones de CO₂, sino que también incrementa la eficiencia energética del proceso y reduce los costos operativos.

La presente investigación tiene como propósito desarrollar y evaluar un sistema de precalentamiento solar aplicado a una caldera pirotubular de 60 BHP, ampliamente utilizada en la industria nacional. A través del diseño, dimensionamiento, simulación y análisis económico de este sistema, se busca cuantificar los beneficios energéticos, económicos y ambientales de su implementación. Además, este estudio busca generar un modelo replicable que sirva como referencia técnica para la integración de tecnologías renovables en procesos industriales. De este modo, se contribuye a la transición energética del sector, fortaleciendo la sostenibilidad de las operaciones industriales en el país.

1.4. Alcances

- Se evaluará la disminución de emisiones de CO₂ y otros contaminantes derivados del uso de combustibles fósiles, calculando los beneficios ambientales de la implementación.
- Se definirán recomendaciones y lineamientos para replicar el modelo en otras industrias y localidades, adaptando el diseño a diferentes condiciones climáticas y tipos de calderas.
- Se estimará el impacto del sistema en la reducción de costos de combustible y se analizará la viabilidad económica de la implementación a largo plazo, considerando el retorno de inversión y el mantenimiento.

1.5. Limitaciones

- La instalación inicial de colectores solares y la integración con el sistema de caldera pueden representar una inversión significativa, lo que podría limitar la adopción en algunas industrias.
- El sistema diseñado puede estar limitado a ciertos tipos y tamaños de calderas, y su implementación en otros modelos o capacidades podría requerir ajustes adicionales en el diseño y en la simulación.
- La eficiencia del sistema de precalentamiento solar dependerá de las condiciones climáticas de la región, lo que puede limitar su rendimiento en días nublados o en épocas del año con menor irradiación solar.
- La falta de datos experimentales previos sobre el rendimiento de sistemas similares en Arequipa puede restringir la precisión de las proyecciones de ahorro y eficiencia.

1.6. Hipótesis

La implementación de un sistema de precalentamiento de agua mediante colectores solares en una caldera de vapor industrial reducirá significativamente el consumo de combustible fósil y las emisiones de CO₂, optimizando la eficiencia energética del proceso y generando ahorros económicos en el largo plazo.

Esta hipótesis se basa en la premisa de que la energía solar puede suplir parte del calor necesario para el funcionamiento de la caldera, reduciendo la demanda de combustible.

1.7. Antecedentes

Cambronero Espinoza, Andrés (2019), Diseño de un Sistema de Energía Solar para Agua de Reposición de Calderas. El presente trabajo detalla el diseño de un sistema de agua de reposición a la sala de calderas de una industria de bebidas mediante el uso de colectores solares para aprovechar la energía térmica solar mediante concentración parabólica. La energía solar térmica obtenida de los colectores solares puede ser usada para precalentar el agua o para generar vapor. Esto se valoró en el diseño dependiendo de la viabilidad técnicoenergética determinada en el análisis previo al diseño. La razón por la que se efectuó un análisis previo es para tomar en consideración las condiciones del sistema actual. La empresa facilitó los datos nominales de los equipos y condiciones básicas del proceso con el fin de dimensionar los colectores solares y su integración al sistema actual. El diseño expuesto se basa en un análisis técnico-económico que permitió seleccionar una alternativa de transferencia de calor indirecta mediante un fluido térmico con concentradores solares de la marca SkyFuel para sustituir parcialmente la energía de combustión de la caldera pirotubular. Para el agua de reposición de la caldera se utilizó en el diseño, agua de un proceso de lavado de botellas que cuenta con características físico-químicas favorables para su uso en el proceso de generación de vapor del caldero. Se determinó una disminución promedio en el consumo de agua de 150 m³ semanales y una sustitución del 12% de la energía térmica de la caldera. Al valorar la viabilidad económica del proyecto se determina que se tiene una TIR del 9,4%, un VAN de \$ (69.645,31) y un periodo de recuperación de la inversión de 8,9 años. (Cambronero Espinoza, 2019)

Arcos-Adame (2018) Dimensionamiento de sistemas de precalentamiento de agua para calderas utilizando energía solar y almacenamiento térmico. En este trabajo de tesis se presenta el diseño de un sistema de captación solar de mediana temperatura para el precalentamiento de agua de reposición para calderas, que puede cumplir una demanda de 25 m³ /día de agua tratada a una temperatura de 90°C. En el estudio se estimó el recurso solar disponible en varias ciudades de la república con potencial industrial existente en el país. Con base a un sistema de referencia reportado por la Agencia Internacional de Energía, se realizaron simulaciones en el software TRNSYS, con datos de recurso solar de la ciudad de Graz, Austria. Con estas salidas, se verificó el desempeño de la simulación con balances de energía y comparándolos con datos de referencia. La desviación de los datos de fracción solar obtenidos respecto a los datos de referencia fue menor al 1.0%. La razón de flujo óptima se encontró buscando la mayor fracción solar para diferentes flujos utilizando el

simulador. En los resultados se observó que la fracción solar del sistema se puede incrementar un 2.0%, en el caso estudiado la razón de flujo pasó de 30 a 13 kg/h-m² con una disminución considerable de energía para el bombeo. En los resultados se muestra la construcción de tablas gráficas de diseño para Ciudad de México, Toluca de Lerdo y Monterrey, ciudades con gran desarrollo industrial en México. Con ayuda de estas tablas gráficas, se observó que un sistema conveniente para cumplir una demanda de 25 m³ /día a 90°C tiene un área de colección de 420 m², un volumen de tanque de 8.4 m³, una razón volumétrica de 20 l/m² -año y una razón de uso de 62 l/m² -día. (Arcos Adame, 2018)

Aguaisa Nogales, Dany Enrique, Valdez Barragan, John Jairo (2024) Análisis de la eficiencia energética del sistema de calentamiento de agua, mediante integración solar en la Quesera Artesanal “San Sebastián”. la Quesera Artesanal “San Sebastián” utiliza un caldero que quema diésel para generar vapor a una temperatura de 105 °C. Por tal motivo, se ha propuesto un diseño para la implementación del sistema de precalentamiento de agua usando colector parabólico, de 6 m de longitud y un tanque de almacenamiento de 2.5 m³. Mediante la obtención de resultados en el proceso de simulación, se estableció que el sistema integrado con un colector solar parabólico es capaz de suministrar un calor de 770.3 W, en promedio. Este calor se convirtió en energía térmica permitiendo al agua la capacidad de incrementar su temperatura, donde se llegó a alcanzar un valor máximo de 43.31 °C. El caldero con el consumo de diésel requiere 3.95 kW para realizar este proceso de calentamiento, por lo que se puede disminuir este consumo en 19.51 % mediante la implementación de esta etapa de precalentamiento utilizando energía solar. La inversión inicial para la adquisición de los materiales ronda los USD 1230, por lo que se estableció un análisis económico para definir el costo actual para el calentamiento del agua y definir la viabilidad de esta implementación. El costo de calentamiento para cada m³ es de USD 3.36, asumiendo un gasto mensual de USD 80.64 y el ahorro mensual correspondería a USD 15.74. Con el análisis económico desarrollado, se obtuvo un V.A.N. superior a uno (1), por lo que el proyecto es rentable para iniciar con su implementación. Para la TIR se alcanzó un valor de 15 % estableciendo una recuperación en 13.13 años. (Aguaisa Nogales, 2024)

Jurado Mallo, Isabel (2018) Climatización y producción de agua caliente sanitaria por energía solar térmica de una nave industrial. El objetivo de este proyecto consiste en la creación de una solución alternativa de apoyo al sistema de climatización y producción de ACS de una instalación industrial actual, basándose en el empleo de energías renovables que permitan la consecución de los siguientes beneficios: Beneficio Económico: optimizará la

producción de agua caliente que tiene lugar en las calderas de a.c.s y calefacción, buscando minimizar su necesidad de uso, esta reducción en el uso supondrá un ahorro en el consumo de gas natural tan grande como el porcentaje de energía ahorrado sea. • Beneficios Ambientales: se persigue la reducción en el consumo de gas natural, lo que permitirá la reducción de los contaminantes producidos por el mismo, los cuales son directamente proporcionales a la cantidad de combustible consumido en la climatización de la instalación industrial objeto del proyecto. La instalación principal que se propone en este proyecto es la instalación solar, realizando además un estudio complementario secundario de la posible incorporación de un sistema de energía geotérmica para un mayor aporte energético. En primer lugar, se ha realizado el estudio y cálculo de la instalación solar, siguiendo el criterio del Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura de la IDAE. Mediante el cual se ha calculado el área de captación solar y volumen de acumulación necesaria para una aportación solar de entorno al 30% de la energía demandada por la calefacción y producción de a.c.s. Los resultados obtenidos determinan la necesidad de instalar 54 paneles solares con un volumen de acumulación de 8.000 litros, consiguiendo un ahorro solar del 36,7% de la energía demandada anualmente. (Jurado Mallo, 2018)

1.8. Objetivos

1.8.1. Objetivos General

Optimizar el consumo de combustible de una caldera de vapor industrial con un precalentamiento de agua mediante colectores solares.

1.8.2. Objetivos Específicos

- a. Determinar la demanda de energía requerida y la cantidad de energía que puede suplir los colectores solares
- b. Proponer un sistema de precalentamiento solar para el agua mediante colectores solares que cumpla con la demanda.
- c. Seleccionar el software para optimizar la demanda calculada y comparar resultados.
- d. Realizar un análisis de costos y beneficios.
- e. Evaluar el impacto energético

1.9. Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de Medición	Escala de Medición
<p>Variable Independiente: Precalentamiento de agua mediante colectores solares</p>	<p>Aplicación de energía solar térmica para aumentar la temperatura del agua de alimentación de calderas antes de su ingreso, reduciendo así la necesidad de combustibles fósiles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Captación de energía solar - Volumen de agua calentada - Cantidad de colectores instalados 	<ul style="list-style-type: none"> - Energía captada (kWh) - Litros o m³ de agua precalentada - Número total de colectores 	<ul style="list-style-type: none"> - Software SAM - Medidores de energía, temperatura y flujo - Inspección técnica 	<p>Razón</p>
<p>Variable Dependiente: Consumo de combustible</p>	<p>Cantidad de combustible utilizada para producir vapor en una caldera industrial.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción del uso de combustible - Eficiencia térmica del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> - Litros de combustible consumidos - kWh térmicos - Porcentaje de mejora en eficiencia 	<ul style="list-style-type: none"> - Registros de consumo - Software SAM - Medidores de presión y temperatura 	<p>Razón</p>

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

La optimización de consumo de combustible mediante un sistema de precalentamiento solar utilizando colectores de tubos de vacío para calderas a nivel industrial constituye en sí mismo un desafío técnico. Por un lado, las calderas, que han sido utilizadas durante décadas, representan una tecnología bien establecida y madura. Por otro lado, la energía solar térmica, aunque útil, no ha experimentado el mismo desarrollo que la energía fotovoltaica, y sus aplicaciones más comunes suelen estar relacionadas con el calentamiento de agua.

A continuación, se presenta la información organizada en secciones para facilitar su comprensión y estructurar claramente los conceptos necesarios.

2.1. Bases teóricas

2.1.1. Aspectos de transferencia de calor

Según López y García (2012) en su libro “Análisis dimensional discriminado en mecánica de fluidos y transferencia de calor”, el diseño de sistemas de precalentamiento solar se basa en los principios de **conducción, convección y radiación térmica**:

Conducción: Es la más sencilla de entender, consiste en la transferencia de calor entre dos puntos de un cuerpo que se encuentran a diferente temperatura sin que se produzca transferencia de materia entre ellos.

Convección: En este sistema de transferencia de calor interviene un fluido (gas o líquido) en movimiento que transporta la energía térmica entre dos zonas.

La transmisión de calor por convección puede ser:

Forzada: a través de un ventilador (aire) o bomba (agua) se mueve el fluido a través de una zona caliente y éste transporta el calor hacia la zona fría.

Natural: el propio fluido extrae calor de la zona caliente y cambia su densidad haciendo que se desplace hacia la zona más fría donde cede su calor.

Radiación: Es el calor emitido por un cuerpo debido a su temperatura, en este caso no existe contacto entre los cuerpos, ni fluidos intermedios que transporten el calor.

Simplemente por existir un cuerpo A (sólido o líquido) a una temperatura mayor que un cuerpo B existirá una transferencia de calor por radiación de “A” a “B”.

Para que este fenómeno se perciba es necesario un cuerpo a una temperatura bastante elevada ya que la transferencia térmica en este caso depende de la diferencia de temperaturas a la cuarta potencia: $T_a^4 - T_b^4$.

2.1.2. Energía solar térmica

La energía solar térmica, o energía termosolar, es el proceso de aprovechar la radiación solar para generar calor. Este calor puede ser utilizado para diversas aplicaciones, como calentar agua, cocinar o generar electricidad a través de sistemas que convierten el calor en energía (López y García, 2012).

Características de la Energía Solar Térmica

Principio de Funcionamiento: La energía solar térmica se basa en la captación de la radiación solar mediante colectores que transforman esta energía en calor. Este calor se puede utilizar directamente o almacenarse para su uso posterior (López y García, 2012).

Tipos de Colectores:

- Colectores de Placa Plana: Utilizados comúnmente para calentar agua en aplicaciones residenciales.
- Colectores de Tubos de Vacío: Más eficientes en la retención del calor, ideales para climas fríos.

2.1.3. Pre calentamiento solar

El objetivo del pre calentamiento solar es aumentar la temperatura del agua de alimentación antes de que entre a la caldera, utilizando energía solar, esto reduce el consumo de combustibles fósiles y mejora la eficiencia del sistema. El pre calentamiento solar en energía solar térmica se refiere al proceso de calentar un fluido, generalmente agua, utilizando la energía del sol antes de que este fluido sea utilizado en aplicaciones específicas, como calefacción. Este proceso se realiza a través de colectores solares que capturan la radiación solar y la convierten en calor (López y García, 2012).

Funcionamiento:

- Los colectores solares, como los de placa plana o tubos de vacío, absorben la radiación solar y calientan un fluido que circula a través de ellos.

- Este fluido caliente se almacena en un tanque o se utiliza directamente en el sistema de calefacción o agua caliente.

2.1.4. Caldera

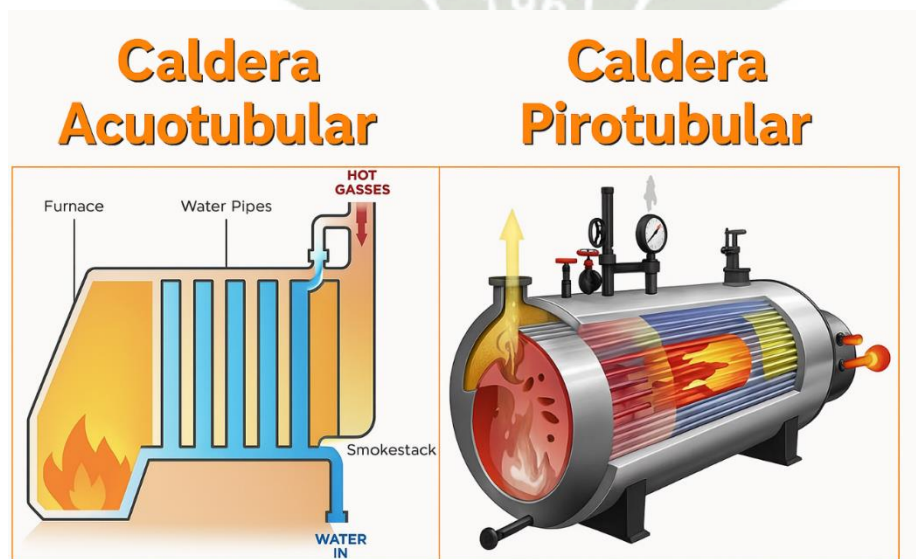
Un recipiente metálico cerrado diseñado para generar vapor o calentar agua a una presión superior a la atmosférica. La combinación de caldera y sobrecalentador se llama generador de vapor, funcionando mediante transferencia de calor en una cámara de combustión (Torres, 2020).

Tipos de Caldera

- Calderas pirotubulares: Son más comunes en instalaciones industriales de tamaño mediano. En este tipo de caldera, los gases calientes generados por la combustión pasan a través de tubos que están rodeados por agua. El agua se calienta indirectamente a medida que los gases de combustión circulan dentro de los tubos (Torres, 2020).
- Calderas acuotubulares: Son para grandes aplicaciones industriales. En esta, el agua circula a través de tubos que están expuestos directamente a los gases calientes de la combustión. Los tubos están dentro del espacio donde se producen los gases calientes, lo que permite calentar el agua de manera directa. Se utiliza para aplicaciones que requieren altas presiones de vapor (Torres, 2020).

Figura 1

Tipos de calderas



Nota. Tomado de (Ingelcia, 2024).

En el caso de esta investigación se eligió una caldera pirotubular de 60 BHP, debido a su amplia utilización en aplicaciones industriales de mediana escala, su operación sencilla, y su compatibilidad con sistemas de precalentamiento de agua. Este tipo de caldera permite una transferencia de calor eficiente mediante gases calientes que circulan a través de tubos rodeados por agua, lo que facilita su integración con fuentes de energía renovable como los colectores solares. Además, presenta un mantenimiento menos complejo en comparación con las calderas acuotubulares, y su costo de instalación y operación es más accesible para plantas con demandas térmicas moderadas (Torres, 2020).

Las especificaciones técnicas de la caldera seleccionada se detallan en el Anexo N.º 2, mientras que el diagrama de instalación y conexiones del sistema de caldera se encuentra en el Anexo N.º 3.

2.1.5. Colectores solares

Un colector solar es un dispositivo diseñado para capturar la radiación solar y convertirla en energía térmica, la cual puede ser utilizada para calentar fluidos, como agua o aire. Este tipo de tecnología es fundamental en sistemas de energía solar térmica, donde el calor generado es aprovechado para diferentes aplicaciones, como calefacción, producción de agua caliente sanitaria o procesos industriales (López y García, 2012).

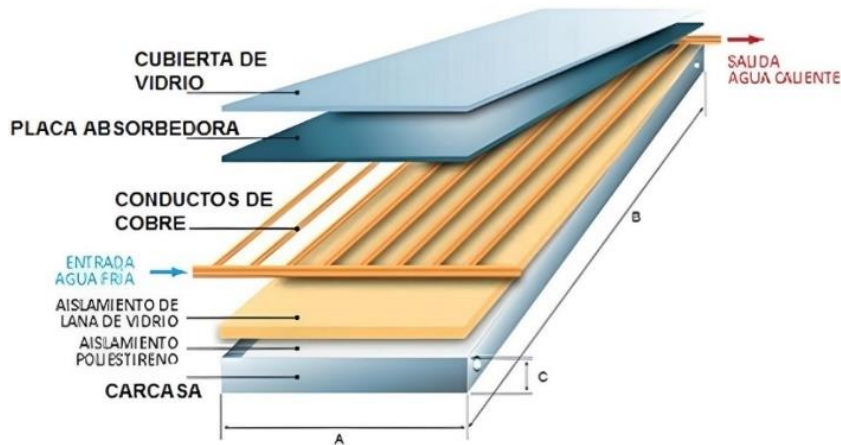
Ventajas:

- **Energía Renovable:** Aprovechan una fuente de energía limpia y abundante, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.
- **Eficiencia Energética:** Pueden ser muy eficientes en la conversión de energía solar en calor, especialmente en climas soleados.
- **Bajo Impacto Ambiental:** Contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

2.1.5.1. Tipos de colectores solares

Figura 2

Colector solar plano

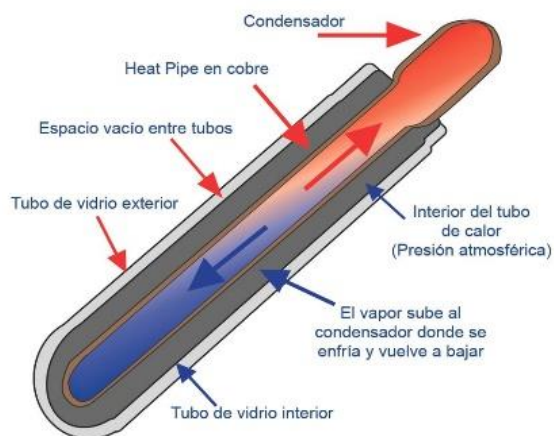


Nota. Tomado de (Torres, 2020).

Los captadores solares planos están compuestos por un acristalamiento, una placa metálica negra y los conductos por donde fluye el fluido caloportador. Se utilizará cristal que permitirá el acceso de las ondas de sol cortas y actuará de barrera contra las ondas de sol largas, esta capa de cristal logra un efecto invernadero dentro del captador solar, permitiendo al calor acceder el interior de la cavidad y quedar ahí atrapado, alcanzándose temperaturas en el colector mucho mayores que las obtenidas sin cristal (Torres, 2020).

Figura 3

Colector de tubos de vacío



Nota. Tomado de (Torres, 2020).

Están compuestos por dos tubos de cristal concéntricos entre los cuales se crea vacío, lo que permite una menor pérdida de calor por convección ya que no hay aire para transferirla y por tanto un mayor rendimiento. El tubo interior está recubierto por una lámina de material absorbente negro, cuya función es la misma que la de los captadores solares planos. La radiación solar es captada a través de estas láminas y transmitida al interior del tubo.

En la tabla se presentan valores habituales correspondientes a los parámetros que caracterizan la eficiencia óptica y el coeficiente global de pérdidas térmicas. Adicionalmente, se muestra el rango convencional de temperaturas de operación para diversos tipos de colectores:

Tabla 1*Tipos de colectores*

Colector	Rango (T°C)	FR (Ta)	FR UL (W/m² °C)
Sin cubierta	10 - 40	0.81	18
Cubierta simple	10 -60	0.72	6.3
Cubierta doble	10 - 80	0.585	4.5
Superficie selectiva	10 - 80	0.72	4.5
Tubos al vacío	10 - 130	0.72	1.8

Nota. Tomado de (Torres, 2020).

2.1.5.1.1. Modelo Bristow - Campbell

Modelo Bristow – Campbell De acuerdo de Bristow – Campbell (1984) la diferencia entre las temperaturas máximas y mínima en un día determinado depende de la relación de Bowen, esto es, la relación entre calor sensible y el calor latente. El calor sensible depende de la irradiación solar y es responsable de las temperaturas máximas. Durante la noche, el calor sensible es perdido hacia el espacio como radiación en onda larga, disminuyendo así la temperatura del aire hasta un valor mínimo, valor que normalmente se alcanza antes del amanecer. Esta explicación física justifica el hecho del uso de modelos para estimar la irradiación solar en función de la temperatura, pero con la ventaja de una gran red de estaciones que realizan este tipo de mediciones.

Dentro de los modelos existentes, Baigorria et al. (2003a) llegaron a la conclusión que el modelo Bristow- Campbell era el que mejor se adecuaba a las condiciones de Perú.

Este modelo sugiere la estimación de la diferencia entre temperaturas máxima y mínima (ΔT , °C):

$$\frac{H}{h_0} = aB \cdot [1 - \exp(-bB\Delta T \cdot cB)] \quad (1)$$

Dónde:

H = Radiación promedio sobre una superficie horizontal en un periodo o intervalo de tiempo (Un mes).

h_0 = Radiación en el exterior de la atmosfera para la misma localidad, en el periodo o intervalo de tiempo.

En Este caso, los valores empíricos (aB , bB y cB) tienen también un significado físico:

aB = Representa el máximo valor de T que es característico de cada área de estudio y además depende de la contaminación atmosférica y la altitud.

bB = (°C⁻¹).

cB = Determina el efecto del incremento de ΔT sobre la máxima T de la atmósfera.

La Tabla 1 muestra los valores de los coeficientes del modelo Bristow – Campbell encontrados para cada estación, así como su error promedio. Es necesario recalcar que le valor del coeficiente aB corresponde a la sumatoria de los coeficientes a y b encontrados para el modelo Angstrom-PreScott debido a que tienen exactamente el mismo significado físico.

Tabla 2

Valores de los coeficientes del modelo Bristow - Campbell

Estación meteorológica	aB	bB (°C ⁻¹)	cB	Número de datos	Error (%)
Costa					
Miraflores	0.75	0.04	1.49	3597	3.8
Von Humboldt	0.68	0.06	1.42	13712	14.1
San Camilo	0.79	0.09	1.05	2244	3.9
Sierra					
Bambamarca	0.66	0.23	0.80	2033	12.6

Weberbauer	0.75	0.04	1.28	1607	3.2
Cosmos	0.70	0.03	1.62	773	8.5
Huayao	0.78	0.11	0.97	5387	4.6
Granja Kcayra	0.74	0.11	0.92	1961	11.6
Chuquibambilla	0.78	0.19	0.76	1476	3.6
Puno	0.82	0.20	0.87	2156	7.2
Characato -La Pampilla	0.76	0.16	0.91	3134	7.5
Selva					
San Ramón SM	0.68	0.02	1.86	2864	7.5
El Porvenir	0.60	0.06	1.21	2346	4.1
Bellavista	0.70	0.06	1.22	1038	2.3

Nota. Tomado de Atlas de Energía Solar del Perú, Autor: SENAMHI, (2003).

Debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciados por la topografía, latitud y altitud, entre otros factores los coeficientes b_B y c_B propuestos pueden ser aplicados solo en áreas bajo similares condiciones de régimen térmico. Esto hace inadecuada una aplicación directa del modelo en áreas donde no existe este requisito. Es por esto por lo que se desarrollaron algunas ecuaciones empíricas para determinar el valor de estos dos coeficientes:

$$c_B = 2.116 - 0.072 \cdot \Delta T + 57.574 \cdot \exp(\varphi) \quad (2)$$

$$b_B = 0.107c_B^{-2.6485} \quad (3)$$

Para la estimación de la radiación mensual es necesario primero calcular las relaciones geométricas para la radiación solar. Cabe destacar la recomendación para la medición en día promedio del mes como en la Tabla 2.

Tabla 3

Día promedio recomendado para cada mes

Mes	Día en el año	Fecha	
		Mes	Día
Enero	17	Enero	17
Febrero	47	Febrero	16
Marzo	75	Marzo	16
Abril	105	Abril	15
Mayo	135	Mayo	15
Junio	162	Junio	11
Julio	198	Julio	17

Agosto	228	Agosto	16
Septiembre	258	Septiembre	15
Octubre	288	Octubre	15
Noviembre	318	Noviembre	14
Diciembre	344	Diciembre	10

Nota. Energía Solar (Fundamentos y Aplicaciones Fototérmico). Autor José A. Manrique. Editorial Harla S.A: de CV México, 1984.

Con la siguiente ecuación se puede calcular la longitud del día solar:

$$T_d = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1} (-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (4)$$

Donde:

T_d = Longitud del día solar.

φ = Latitud del lugar [grados].

δ = Declinación [grados].

Declinación (δ) Define la posición angular del Sol al mediodía solar, es decir, en el momento en que el Sol está más alto en el firmamento con respecto al plano del ecuador, también la declinación se puede definir como un índice del alejamiento que experimenta el Sol hacia el norte o hacia el sur del ecuador, este parámetro, que depende del día del año se puede calcular de las siguientes expresiones:

Ecuación de la declinación según Cooper (1969)

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (5)$$

Donde:

n = día del año.

Ecuación de la declinación según J. M. Chassériaux (1984)

$$\sin(\delta) = 0.3979 \cdot \sin(JD) \quad (6)$$

Donde:

$$JD = JD_0 + \frac{360}{2\pi} (0.007133 \cdot \sin(JD_0) + 0.032680 \cdot \cos(JD_0) - 0.000318 \cdot \sin(2 \cdot JD_0) + 0.000145 \cdot \cos(2 \cdot JD_0))$$

$$JD_o = (n - 81) \cdot 360/365$$

Ángulo horario (ω):

Obtiene el valor de cero al mediodía solar y adquiere un valor de 15° de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo por las tardes.

Ángulo de la altura solar (α ; h):

$$\text{sen}(\alpha) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) \quad (7)$$

Donde:

φ = Latitud del lugar [grados].

δ = Declinación [Grados].

ω = Ángulo horario [Grados].

Ángulo azimut del Sol (γ):

$$\text{sen}(\gamma) = \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(\omega)}{\cos(\alpha)} \quad (8)$$

Donde:

δ = Declinación [Grados].

ω = Ángulo horario [Grados].

α = Ángulo de la altura solar [Grados].

Ángulo de horas de asoleamiento (ω_s):

$$\cos \omega_s = -\frac{\text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta)}$$

$$\cos \omega_s = -\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta) \quad (9)$$

Donde:

φ = Latitud del lugar [grados].

δ = Declinación [grados].

Radiación en el exterior de la atmosfera para la misma localidad, en el periodo promedio. (H_o).

Ecuación de la radiación exterior de la atmosfera según Jhon A. Duffie (1974):

$$H_o = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot \left[\left(1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \cdot \left(\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \frac{2\pi \cdot \omega_s}{360} \cdot \sin(\varphi) \sin(\delta) \right) \right] \quad (10)$$

Donde:

I_{sc} = Constante solar (1353 W/m²).

n = Día del año.

ω_s = Ángulo de horas de asoleamiento; ángulo horario de puesta del sol durante el periodo considerado. [Grados].

φ = Latitud del lugar [Grados].

δ = Declinación [Grados].

Ecuación de la radiación exterior de la atmosfera según J. M. Chassériaux (1984):

$$H_o = \frac{24}{\pi} \cdot E \cdot \left(\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) \right) \quad (11)$$

Donde:

ω_s = Ángulo de horas de asoleamiento; ángulo horario de puesta del sol durante el periodo considerado. [Grados].

φ = Latitud del lugar [Grados].

δ = Declinación [Grados].

$$E = E_o \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{n \cdot 360}{365} \right) \right] \quad (12)$$

Estimación de las medias mensuales de irradiación (difusa y directa) Liu y Jordán (1960) han establecido una relación empírica entre la relación de la media mensual de irradiación difusa H_d y H , y la media mensual es la fracción de irradiación K_h :

$$\frac{H_d}{H} = 1.390 - 4.027 \cdot K_h + 5.531 \cdot K_h^2 - 3.018 \cdot K_h^3 \quad (13)$$

Este resultado ha sido frecuentemente utilizado, pero ha suscitado muchas críticas:

Teniendo en cuenta estos diversos factores Collares-Pereira y Rabl (1979) han propuesto la siguiente relación:

$$\frac{H_d}{H} = 0.775 + 0.347 \cdot \left(\omega_s - \frac{\pi}{2}\right) - \left[0.505 + 0.261 \cdot \left(\omega_s - \frac{\pi}{2}\right)\right] \cdot \cos(2K_h - 1.8) \quad (14)$$

Donde:

ω_s = Ángulo de horas de asoleamiento; ángulo horario de puesta del sol durante el periodo considerado. (radianes)

H_d = Irradiación difusa promedio mensual [W/m^2].

H = Radiación total promedio mensual [W/m^2].

K_h = Fracción de irradiación promedio mensual.

$$K_h = \frac{H}{H_o} \quad (15)$$

Donde:

H_o = Radiación promedio mensual fuera de la atmosfera.

Si se conoce H , es fácil deducir K_h y luego H_d y H_b

$$H_b = H - H_d \quad (16)$$

Donde:

H_b = Irradiación directa promedio mensual.

En primera aproximación puede igualmente suponerse que la relación de Collares-Pereira y Rabl es válida no sólo para los promedios mensuales, sino también para los valores diarios H_d , H , ω_s y K_h . correlaciones diarias han sido igualmente observadas directamente para esas magnitudes, pero los puntos de medición son evidentemente más dispersos y es difícil poner en evidencia un efecto estacional. El resultado siguiente ha sido obtenido por Collares – Pereira y Rabl (1979):

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99 & \rightarrow K_h \leq .17 \\ 1.188 - 2.272K_h + K_h^2 - 21.865K_h^3 + 14.648K_h^4 & \rightarrow 0.17 < K_h \leq 0.75 \\ -0.54 + 0.632K_h & \rightarrow 0.75 < K_h \leq 0.80 \\ 0.2 & \rightarrow K_h \geq 0.80 \end{cases}$$

2.1.6. Radiación instantánea sobre superficies horizontales

Para evaluar el comportamiento térmico a lo largo del día de un sistema de conversión de energía solar, se hace necesario conocer también los valores instantáneos de radiación total sobre cualquier superficie. Aun cuando obviamente estos valores pueden

determinarse experimentalmente, en muchas circunstancias no se dispone de la instrumentación necesaria; o más comúnmente, se desea que sean valores representativos de un día típico, evitándose así la irregularidad de las condiciones meteorológicas que puedan prevalecer en un día específico.

A la luz de los conceptos enunciados anteriormente defínanse ahora los siguientes factores de conversión:

$$r_d = \frac{I_{d,h}}{\bar{I}_{d,h}} \quad (17)$$

Donde:

$I_{d,h}$ = Es la componente de la radiación difusa sobre un plano horizontal en cualquier instante.

$\bar{I}_{d,h}$ = Componente promedio de la radiación difusa sobre un plano horizontal en cualquier instante.

$$r_G = \frac{H_G}{\bar{H}_G} \quad (18)$$

Donde:

H_G = Es la radiación global en cualquier instante [W/m^2].

\bar{H}_G = Es la radiación promedio global en cualquier instante [W/m^2].

Los factores r_d y r_G dependen fundamentalmente de dos variables: la hora del día, expresada por medio del ángulo horario ω ; y la hora crepúsculo expresada en términos del ángulo horario ω_s . Liu y Jordán han mostrado que r_d puede evaluarse mediante la relación.

$$r_d = \frac{\pi}{T} \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s - \omega) \cdot \cos(\omega_s)} \quad (19)$$

Donde:

T = Longitud del día = 24 horas [h].

ω_s = Ángulo de horas de asoleamiento; ángulo horario de puesta del sol durante el periodo considerado. [Grados].

ω = Ángulo horario [Grados].

Similarmente, el factor de conversión r_G puede calcularse mediante la relación:

$$r_G = \frac{\pi}{T} (a + b \cos(\omega)) \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s - \omega_s) \cdot \cos(\omega_s)} \quad (20)$$

De donde los parámetros a y b están dados por las expresiones

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 1.047) \quad (21)$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \sin(\omega_s - 1.047) \quad (22)$$

2.1.7. Radiación diaria promedio sobre superficies inclinadas

Existen varios modelos para calcular la radiación total diaria promedio sobre una superficie inclinada a partir de datos de radiación diaria promedio sobre un plano horizontal. Uno de ellos es el desarrollado por Liu y Jordán el cual considera que la radiación solar incidente en un plano inclinado, H_T , está formada por tres partes: la radiación directa del Sol, la difusa procedente de la bóveda celeste y la reflejada por el suelo sobre la superficie inclinada, es decir:

$$H_T = H_b \cdot R_b + H_d \cdot R_d + (H_b + H_d) \cdot R_\varphi$$

Donde:

H_T = Radiación promedio mensual sobre un plano inclinado [W/m^2].

H_b = Irradiación difusa promedio mensual [W/m^2].

H_d = Irradiación directa promedio mensual [W/m^2].

R_b = Coeficiente de conversión para la componente de radiación directa.

R_d = Coeficiente de conversión para la componente de radiación difusa.

R_φ = Coeficiente de conversión para la componente de radiación reflejada.

El factor R_b es una función de la tramitancia de la atmosfera y depende de la nubosidad atmosférica, la concentración de vapor de agua y otras partículas. Sin embargo, Liu y Jordán sugieren que R_b puede estimarse como el cociente de la radiación extraterrestre

sobre una superficie inclinada y la correspondiente a una superficie horizontal para el mes en cuestión, así:

$$R_b = \frac{\omega_s \cdot \text{sen}(\delta) \cdot [\text{sen}(\varphi) - S] + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot [\varphi - S] \cdot \text{sen}(\omega_s)}{\omega_s \cdot \text{sen}(\delta) \cdot [\text{sen}(\varphi)] + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot [\text{sen}(\omega_s)]} \quad (23)$$

$$\omega_s = \min \left\{ \frac{\omega_s}{\cos(\gamma)} - [\tan(\varphi - S) \cdot \tan(\gamma)] \right\} \quad (24)$$

S = ángulo de inclinación de la superficie [Grados].

ω_s = Ángulo de horas de asoleamiento; ángulo horario de puesta del sol durante el periodo considerado. (radianes).

φ = Latitud del lugar [Grados].

δ = Declinación [Grados].

Ecuación del factor R_b según J. M. Chassériaux (1984)

$$R_b = \frac{\cos(\delta)}{\text{sen}(\alpha)} \quad (25)$$

De donde el ángulo de incidencia θ de la radiación directa queda definido como el ángulo ente la normal a la superficie y el haz de radiación. La relación entre θ y los otros ángulos está dada por la expresión:

$$\begin{aligned} \cos(\delta) = & \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \cos(s) - \text{sen}(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \text{sen}(s) \\ & \cdot \cos(\gamma_s) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(s) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \\ & \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(s) \cdot \cos(\gamma_s) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi) \\ & \cdot \text{sen}(\gamma_s) \cdot \text{sen}(s) \cdot \text{sen}(\omega) \end{aligned} \quad (26)$$

Donde:

s = Ángulo de inclinación de la superficie [Grados].

ω = Ángulo de horas de asoleamiento; ángulo horario de puesta del sol durante el periodo considerado [Grados].

φ = Latitud del lugar [Grados].

δ = Declinación [Grados].

γ_s = Azimut de la superficie inclinada que forma un ángulo con respecto a la línea norte-sur [Grados].

Se puede dar ahora varios casos particulares a la anterior ecuación que son de interés:

a) Superficie horizontal. En este caso $s = 0^\circ$ y $\theta = \theta_z$.

$$\cos(\theta_z) = \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\omega) \quad (27)$$

b) Superficie inclinada hacia el norte.

$$\cos(\theta) = \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi - s) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi - s) \cdot \cos(\omega) \quad (28)$$

c) Superficie vertical orientada hacia el norte.

$$\cos(\theta) = -\text{sen}(\delta) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \cos(\omega) \quad (29)$$

Por otra parte, la radiación difusa no sólo varía en intensidad dependiendo de los contenidos atmosféricos de vapor, polvo, etc., sino que también varía en distribución angular con los cambios en las condiciones atmosféricas, esto es, si se supone que es uniforme en todas las direcciones, entonces puede demostrarse que el cociente de la radiación difusa incidente sobre una superficie inclinada un ángulo s , y la radiación difusa incidente sobre una superficie horizontal es igual a $\frac{1+\cos(s)}{2}$. Dado que este cociente es independiente de la posición del Sol en el firmamento.

Donde:

$$R_b = \frac{1 + \cos(s)}{2} \quad (30)$$

s = Ángulo de la superficie inclinada [Grados].

Similarmente, dado que la mayoría de los materiales que constituyen el suelo (césped o pasto, arena, tierra, etc.) reflejan la radiación solar de una manera más o menos difusa, aquí se supondrá que la reflexión es perfectamente difusa. En consecuencia, considérese que el suelo localizado frente a la superficie inclinada es muy grande y tiene una reflectancia hemisférica uniforme (albedo) ρ ante la radiación solar. Si la radiación global diaria

promedio en el mes de H_T la radiación reflejada por el suelo es ρH_T , y la fracción de está que intercepta la superficie inclinada es:

$$R_p = \frac{1 + \cos(s)}{2} \quad (31)$$

Dónde:

ρ = Albedo [medida adimensional].

R_p = Distancia radial como función del ángulo. [m].

1 = Constante que desplaza la distancia radial.

$\cos(s)$ = Término que depende del ángulo y contribuye a la variación de R [Grados].

La tabla 3 muestra algunos valores de albedo para distintas superficies. En la práctica se emplea un valor de 0.20 para suelos comunes y de 0.70 cuando se encuentran cubiertos de nieve.

Tabla 4

Albedo de distintas superficies

Superficie	Albedo
Desierto	0.24 – 0.28
Campos, varios tipos	0.03 – 0.25
Bosques, verde	0.03 – 0.10
Pasto, varias condiciones	0.14 – 0.37
Suelo, común	0.07 – 0.20
Moho, negro	0.08 -0.14
Arena seca	0.18 – 0.40
Arena húmeda	0.09 – 0.18
Hielo o nieve	0.46 – 0.86
Agua (a =47°)	0.02
Agua (a =5,5°)	0.71

Nota. Tomado del libro J.R: Vaillant Utilisations et Promesses de t' Energie Solarie Edición Eyrolles 1978 - B. Y. H. ILiu, Jordán “Dailiy Insolation on Surfaces Tilted tparnd the Equator” ASHRAE

CAPÍTULO III

3. Diseño del sistema de calentamiento de agua mediante colectores solares

3.1. Evaluación de la demanda requerida

Para poder evaluar el consumo de combustible se analiza la cantidad de vapor que consume el sistema actual, así como los principales factores que influyen en esta demanda. Este análisis se efectúa para entender el consumo energético del sistema y poder realizar cálculos relacionados con la implementación del precalentamiento de agua mediante colectores solares.

3.2. Parámetros por utilizar

El presente estudio se enfoca en una caldera de 60 BHP, la cual presenta un consumo de combustible de 27.5 galones por hora y una producción de vapor de 800 kg/h a 100 °C. Además, su consumo de agua por hora es de 800 litros. Las características técnicas se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 5
Características de la caldera

Parámetro	Valor
Potencia (BHP)	60
Consumo de combustible - GLP (GALONES POR HORA)	27.5
Producción de vapor a 100°C (kg/h)	800
Consumo de agua por hora (l/h)	800

Nota. Elaboración Propia

3.3. Generación de vapor

Para la generación de 800 kg/h de vapor de agua serán necesarios 800 kg/h de agua, en términos de agua utilizada fue de 8000 litros al día.

3.4. Especificaciones del sistema solar

3.4.1. Estimación de la necesidad energética

Para calcular la necesidad energética, debemos primero identificar el volumen de agua que se necesita calentar, la temperatura deseada y la temperatura inicial del líquido.

Esta última se usará como referencia las temperaturas medias ofrecidas por SENAMHI, las cuales pueden verse en la Tabla 6. Para maximizar la eficiencia de los colectores solares, se establecerá una temperatura objetivo de 70°C, la cual es la temperatura mínima para agregar el agua a la caldera.

Tabla 6

Temperatura de inicio

Meses	Temperatura inicial del agua (°C)
Enero	14.5
Febrero	14.5
Marzo	12.75
Abril	12.33
Mayo	11.57
Junio	9.75
Julio	8.00
Agosto	7.80
Setiembre	9.63
Octubre	10.50
Noviembre	13.75
Diciembre	12.42

Nota. Datos tomados de SENAMHI

Con la información proporcionada en las tablas previas, se determina la energía inicial necesaria para los meses:

$$Q_{\text{req}} = m \cdot c_{\text{p agua}} \cdot (T_{\text{requerida}} - T_{\text{agua inicial}}) \quad (32)$$

Dónde:

Q_{req} = Cantidad de Calor Requerido por el proceso (kW)

m = Masa de agua en (Kg).

$c_{\text{p agua}}$ = Calor específico del agua 4.182 kJ/ kg °K.

$T_{\text{requerida}}$ = Temperatura Requerida por el proceso (°C).

$T_{\text{agua inicial}}$ = Temperatura inicial del agua (°C).

Empleando dicho enfoque y considerando las temperaturas del agua proveniente de la red para cada mes, se estima la demanda energética para cada periodo mensual.

Tabla 7

Energía requerida (kW)

Meses	Temperatura inicial del agua (°C)	Energía requerida (kW/día)	Energía requerida (kW/mes)
Enero	14.5	516.37	16,007.53
Febrero	14.15	519.63	14,549.60
Marzo	12.75	532.65	16,512.27
Abril	12.33	536.56	16,096.85
Mayo	11.57	543.63	16,852.61
Junio	9.75	560.57	16,816.98
Julio	8	576.85	17,882.29
Agosto	7.8	578.71	17,939.97
Setiembre	9.63	561.68	16,850.47
Octubre	10.5	553.59	17,161.23
Noviembre	13.75	523.35	15,700.50
Diciembre	12.42	535.72	16,607.45

Nota. Elaboración Propia

3.4.2. Parámetros meteorológicos del lugar de instalación

Estimación de la Radiación solar:

A fin de determinar los datos de radiación del sitio de instalación, se utilizará el modelo de Bristow - Campbell. A continuación, se describirá el modelo, comenzando con los datos iniciales proporcionados:

Tabla 8

Datos de la estación meteorológica "La Pampilla"

Tipo de estación	Convencional meteorológica
Ubicación	
Departamento	Arequipa
Provincia	Arequipa
Distrito	Arequipa
Latitud	16° 24' 12.2" - Sur
Longitud	71° 31' 0.6 " - Oeste
Altitud	2400 m.s.n.m.
Coefficientes del modelo Bristow - Campbell	
aB	0.76

bB	0.16
cB	0.91

Nota. Información tomada de SENAMHI.

3.4.3. Cálculo de la declinación

Para el cálculo de la declinación tomaremos como base los días propuestos en la tabla 2 del capítulo II. En este caso el día del año es 17 enero, por lo que $n=17$. Ahora bien,

Según Cooper:

$$\delta = 23.45 \cdot \text{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (33)$$

Reemplazando:

$$\begin{aligned} \delta &= 23.45 \cdot \text{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + 17}{365} \right) \\ &= -20.917^\circ \end{aligned} \quad (34)$$

Según J. M. Chassériaux:

$$\text{sen}(\delta) = 0.3979 \cdot \text{sen}(JD)$$

$$\begin{aligned} JD = JD_0 + \frac{360}{2\pi} & (0.007133 \cdot \text{sen}(JD_0) + 0.032680 \cdot \cos(JD_0) \\ & - 0.000318 \cdot \text{sen}(2 \cdot JD_0) + 0.000145 \cdot \cos(2 \cdot JD_0)) \end{aligned} \quad (35)$$

Donde:

$$JD_0 = (n - 81) \cdot 360/365$$

Reemplazando:

$$JD_0 = (17 - 81) \cdot \frac{360}{365} = -63.123^\circ$$

Reemplazando:

$$\begin{aligned} JD = -63.123^\circ + \frac{360}{2\pi} & (0.007133 \cdot \text{sen}(-63.123^\circ) + 0.032680 \cdot \cos(-63.123^\circ) \\ & - 0.000318 \cdot \text{sen}(2 \cdot -63.123^\circ) + 0.000145 \cdot \cos(2 \cdot -63.123^\circ)) \end{aligned}$$

$$JD = -62.63$$

$$\text{sen}(\delta) = 0.3979 \cdot \text{sen}(JD)$$

Reemplazando:

$$\text{sen}(\delta) = 0.3979 \cdot \text{sen}(-62.63) = -0.35336$$

$$(\delta) = \text{sen}^{-1}(-0.35336)$$

$$(\delta) = -20.69^\circ$$

Mismo procedimiento se reitera para cada promedio del año, por lo que en la Tabla 9 se resume los resultados obtenidos.

Tabla 9

Declinación para cada día promedio del año

Fecha		N	Cooper	J. M. Chasseriaux		
Mes	Día			JD _o	JD	δ
Enero	17	17	-20.92	-63.12	-62.63	-20.69
Febrero	16	47	-12.95	-33.53	-32.19	-12.24
Marzo	16	75	-2.42	-5.92	-4.09	-1.63
Abril	15	105	9.41	23.67	25.56	9.88
Mayo	15	135	18.79	53.26	54.72	18.95
Junio	11	162	23.09	79.89	80.63	23.12
Julio	17	198	21.18	115.40	114.97	21.14
Agosto	16	228	13.45	144.99	143.69	13.63
Septiembre	15	258	2.22	174.58	172.76	2.88
Octubre	15	288	-9.60	204.16	202.30	-8.68
Noviembre	14	318	-18.91	233.75	232.32	-18.36
Diciembre	10	344	-23.05	259.40	258.66	-22.96

Nota. Elaboración Propia

Con base en la literatura consultada, se ha determinado que la fórmula propuesta por J.M. Chasseriaux proporciona una mayor precisión en cuanto al ángulo de declinación. Por tanto, se optará por utilizar sus hallazgos en este estudio.

3.4.4. Cálculo del ángulo de horas de asoleamiento

Para determinar el ángulo horario del sol, se procederá empleando los datos obtenidos de la fórmula previamente mencionada.

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)$$

Día: 17 enero.

Latitud: $16^{\circ} 24' 12.2''$ - Sur = -16.40° .

Declinación: -20.69° .

$$\omega_s = -\cos^{-1} (\tan (-16.40) \cdot \tan (-20.69)) = 96.38^{\circ}$$

Reiterando el cálculo anterior para cada uno de los días promedio del año, se proporciona la Tabla 10.

Tabla 10

Angulo de horas de asoleamiento para cada día promedio del año

Fecha		Ws
Mes	Día	
Enero	17	96.38
Febrero	16	93.66
Marzo	16	90.48
Abril	15	87.06
Mayo	15	84.20
Junio	11	82.78
Julio	17	83.46
Agosto	16	85.91
Septiembre	15	89.15
Octubre	15	92.58
Noviembre	14	95.61
Diciembre	10	97.17

Nota. Elaboración Propia

3.4.5. Cálculo de la radiación en el exterior de la atmósfera

Para determinar la radiación en la superficie exterior de la atmósfera, existen dos métodos de cálculo que se describirán a continuación:

$$H_o = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot \left[\left(1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \cdot \left(\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_s) + \frac{2\pi \cdot \omega_s}{360} \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) \right) \right] \quad (36)$$

Día: 17 enero

n: 17

Latitud: $16^{\circ} 24' 12.2''$ - Sur = -16.40° [Grados].

Declinación: -20.69° [Grados].

I_{sc} : 1353 [W/m^2]

ω_s : 96.38° [Grados].

Reemplazando:

$$H_o = \frac{24}{\pi} \cdot 1353 \left[\left(1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot 17}{365} \right) \right) \left(\cos (-16.40) \cdot \cos (-20.69) \cdot \sin (96.38) + \frac{2\pi \cdot 96.38}{360} \cdot \sin (-16.40) \sin (-20.69) \right) \right] = 10776.37 \text{Whr/m}^2 \quad (37)$$

La Tabla 11 exhibe los valores promedios adquiridos para cada mes del calendario anual.

Tabla 11

Radiación en el exterior de la atmósfera

Fecha		n	Ho (Wh/m2)
Mes	Día		
Enero	17	17	10776.37
Febrero	16	47	10428.00
Marzo	16	75	10089.73
Abril	15	105	8699.63
Mayo	15	135	8031.41
Junio	11	162	7170.99
Julio	17	198	7874.70
Agosto	16	228	8652.01
Septiembre	15	258	9354.94
Octubre	15	288	10592.44
Noviembre	14	318	11212.56
Diciembre	10	344	11352.24

Nota. Elaboración Propia

3.4.6. Radiación solar promedio sobre una superficie horizontal

Para calcular la radiación sobre una superficie horizontal, se aplicará el modelo de Bristow-Campbell, cuya fórmula es la siguiente:

$$\frac{H}{H_o} = bB[1 - \exp(-cB\Delta T^{cB})] \quad (38)$$

Se calcula la radiación solar con los datos de la tabla 10:

Tabla 12

Coefficientes del modelo Bristow - Campbell

Coefficientes del modelo Bristow - Campbell	
aB	0.76
bB	0.16
cB	0.91
Datos del mes de Enero	
H_o (W-Hr/m ²)	11299.45
Temperatura mínima (°C)	11.06
Temperatura máxima (°C)	23.61
Diferencial de temperatura (°C)	12.55

Nota. Elaboración Propia

3.4.7. Estimación de la radiación solar sobre una superficie horizontal

A partir de la información anterior, se puede determinar la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal.

$$H = 0.76[1 - \exp(-0.16 \cdot 12.55^{0.91})] \cdot 11299.45 = 6852.62 \text{ W-Hr/m}^2 \quad (39)$$

De forma análoga, se puede calcular la radiación para los meses subsiguientes y los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

Radiación solar sobre una superficie horizontal

Mes	Temperatura		H_o (W-Hr/m ²)
	Máxima	Mínima	
Enero	23.61	11.06	6535.08
Febrero	24.14	12.90	6059.72
Marzo	23.92	11.06	6173.33
Abril	23.73	10.16	5424.22
Mayo	22.91	8.41	5118.59
Junio	22.67	7.48	4636.89
Julio	22.17	5.57	5223.99
Agosto	23.16	7.60	5635.02
Septiembre	22.83	7.67	6045.44
Octubre	22.81	7.79	6825.76

Noviembre	21.96	7.05	7360.93
Diciembre	21.38	9.50	6729.33

Nota. Elaboración Propia

3.4.8. Fracción de irradiación promedio mensual

Para determinar los componentes de la radiación total, es esencial calcular primero la fracción de irradiación promedio mensual. Este cálculo se efectúa empleando la ecuación que se describirá a continuación:

$$K_h = \frac{H}{H_0} \quad (40)$$

Para el mes de enero, aplicando la fórmula previamente mencionada, se obtiene el resultado que se presenta a continuación:

$$K_h = \frac{6535.08 \text{ W-Hr/m}^2}{10776.37 \text{ W-Hr/m}^2} = 0.61 \quad (41)$$

Al replicar este cálculo para los demás meses, se genera **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 14

Fracción de irradiación promedio mensual

Mes	K_h
Enero	0.61
Febrero	0.58
Marzo	0.61
Abril	0.62
Mayo	0.64
Junio	0.65
Julio	0.66
Agosto	0.65
Septiembre	0.65
Octubre	0.64
Noviembre	0.64
Diciembre	0.65

Nota. Elaboración Propia

3.4.9. Componentes de la radiación total sobre una superficie horizontal

Utilizando la ecuación propuesta por Collares-Pereira y Rabl, es posible determinar la radiación difusa.

$$\frac{H_d}{H} = 0.775 + 0.347 \cdot \left(\omega_s - \frac{\pi}{2} \right) - \left[0.505 + 0.261 \cdot \left(\omega_s - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdot \cos(2K_h - 1.8) \quad (42)$$

Al aplicar la ecuación mencionada para el mes de enero y utilizando los datos proporcionados, la resolución de la ecuación se desarrolla de la siguiente forma:

$$\omega_{s_{\text{enero}}} = 96.38^\circ = 1.68 \text{ radianes}^\circ$$

$$K_{\text{enero}} = 0.61$$

Reemplazando esos datos se puede obtener:

$$\frac{H_d}{H} = 0.775 + 0.347 \cdot \left(1.68 - \frac{\pi}{2} \right) - \left[0.505 + 0.261 \cdot \left(1.68 - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdot \cos(2 \cdot 0.61 - 1.8) = 0.37 \quad (43)$$

Tras multiplicar el resultado obtenido por la radiación total, se calcula una radiación difusa de 2411.63 W-Hr/m² para el mes de enero. Posteriormente, al sustraer esta cantidad de la radiación total, se obtiene una radiación directa de 4123.45 W-Hr/m². A través de este procedimiento, se logra desglosar los componentes de la radiación incidente sobre una superficie horizontal. Los resultados detallados se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15

Componentes de la radiación total sobre una superficie horizontal

Mes	H _d /H	H _d (W-Hr/m ²)	H _b (W-Hr/m ²)
Enero	0.37	2411.63	4123.45
Febrero	0.38	2290.87	3768.85
Marzo	0.35	2176.96	3996.37
Abril	0.34	1838.07	3586.15
Mayo	0.33	1667.81	3450.79
Junio	0.32	1476.86	3160.04
Julio	0.31	1632.04	3591.94
Agosto	0.32	1818.96	3816.05
Septiembre	0.33	2006.49	4038.95

Octubre	0.34	2320.25	4505.51
Noviembre	0.35	2501.48	4707.51
Diciembre	0.31	2557.12	4803.81

Nota. Elaboración Propia

3.4.10. Radiación solar promedio sobre una superficie inclinada

Para determinar la cantidad de energía que incide sobre un colector solar, es esencial calcular la radiación solar sobre una superficie inclinada. De acuerdo con la literatura revisada, el ángulo de inclinación óptimo de esta superficie respecto a la horizontal es equivalente a la latitud del lugar más 10°. En el caso específico en estudio, este ángulo de inclinación, denotado como (s), es de 26°. Con esta información, se procede a calcular la radiación incidente en una superficie con dicha inclinación.

Un paso fundamental en este cálculo es determinar el coeficiente de conversión de la radiación directa. Para ello, se emplea la ecuación que se detalla a continuación:

$$R_b = \frac{\omega_s \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi - S) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi - S) \cdot \text{sen}(\omega_s)}{\omega_s \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \text{sen}(\omega_s)} \quad (44)$$

Donde:

$$\omega_s = \{ \cos^{-1} [- \tan(\varphi - S) \tan(\delta)] \omega_s \} \quad (45)$$

Al solucionar la ecuación propuesta para el mes de enero, se obtienen los datos que se presentarán a continuación:

$$\begin{aligned} S &= 26^\circ \\ \varphi &= -16.4^\circ \\ \delta &= -20.69^\circ \\ \omega_s &= 96.38^\circ \end{aligned}$$

Ahora se tiene que escoger el mínimo valor para ω_s

$$\begin{aligned} \omega_s &= \min\{ \omega_s = 96.38^\circ \cdot \cos^{-1} [- \tan(-16.4^\circ - 26) \cdot \tan(-20.69)] \\ &= 110.18^\circ \} \end{aligned} \quad (46)$$

Con este resultado se escoge $\omega_s = 96.38^\circ$, repitiendo este procedimiento se obtiene la Tabla 16.

Tabla 16

Ángulo de horas de asoleamiento

Mes	min ω_s
Enero	96.38
Febrero	93.66
Marzo	90.48
Abril	80.84
Mayo	71.72
Junio	67.06
Julio	69.32
Agosto	77.21
Septiembre	87.37
Octubre	92.58
Noviembre	95.61
Diciembre	97.17

Nota. Elaboración Propia

3.4.11. Coeficiente de conversión de radiación directa

Una vez establecidas todas las constantes, es posible proceder al cálculo del coeficiente de conversión de la radiación directa utilizando la ecuación previamente mencionada. Empezando con la información correspondiente al mes de enero, se desarrolla el cálculo de la siguiente forma:

$$R_d = \frac{96.38 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \text{sen}(-26.69) \cdot \text{sen}(-16.4^\circ - 26) + \cos(-26.69) \cdot \cos(-16.4 - 26) \cdot \text{sen}(96.83)}{96.38 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \text{sen}(-26.69) \cdot \text{sen}(-16.4) + \cos(-26.69) \cdot \cos(-16.4) \cdot \text{sen}(96.83)} \quad (47)$$

$$R_d = 1.02$$

Al replicar el procedimiento anterior y utilizando la información previamente detallada, es posible determinar el factor Rb para cada uno de los meses del año. Los resultados obtenidos de esta evaluación se exhiben en la Tabla 17.

Tabla 17

Coeficiente de conversión de radiación directa

Mes	Rb
Enero	1.02

Febrero	0.92
Marzo	0.79
Abril	0.64
Mayo	0.51
Junio	0.44
Julio	0.47
Agosto	0.59
Septiembre	0.73
Octubre	0.88
Noviembre	1.00
Diciembre	1.05

Nota. Elaboración Propia

Para determinar el coeficiente de conversión de la radiación difusa, se emplea la ecuación que se detallará a continuación:

$$R_d = \frac{1 + \cos(s)}{2} \quad (48)$$

Dónde

s = 26. y reemplazando:

$$R_d = \frac{1 + \cos(26)}{2} = 0.949 \quad (49)$$

Para calcular el coeficiente de conversión de la radiación reflejada, se hace uso de la ecuación que se presentará a continuación:

$$R_\rho = \frac{1 + \cos(s)}{2} \rho \quad (50)$$

Dónde:

s: 26° [Grados].

ρ : 0.20 (Tabla 3) [Grados].

Reemplazando se tiene:

$$R_\rho = \frac{1 + \cos(26)}{2} 0.20 = 0.189 \quad (51)$$

3.4.12. Radiación global promedio sobre una superficie inclinada

Con la información previamente establecida, es posible determinar la radiación global incidente en una superficie inclinada utilizando la ecuación que se describirá a continuación:

$$H_T = H_b \cdot R_b + H_d \cdot R_d + (H_b + H_d) \cdot R_p \quad (52)$$

Al introducir los datos correspondientes al mes de enero en la ecuación proporcionada, se obtiene el resultado que se detalla a continuación:

$$\begin{aligned} H_T &= 4123.45 \cdot 1.03 + 2411.63 \cdot 0.949 + (4123.45 + 2411.63) \cdot 0.189 \\ &= 7761.45 \text{ W-Hr/m}^2 \end{aligned} \quad (53)$$

Al replicar el proceso descrito, es posible determinar las componentes de la Radiación Global incidente en una superficie inclinada para los demás meses del año.

Tabla 18

Radiación global promedio sobre una superficie inclinada

Mes	Radiación			
	Directa H_b \cdot (W-Hr/m^2)	Difusa H_d (W-Hr/m ²)	Reflejada H_d (W-Hr/m ²)	Global H_T (W-Hr/m ²)
Enero	4230.98	2289.59	1240.88	7761.45
Febrero	3478.35	2174.95	1150.62	6803.92
Marzo	3160.34	2066.80	1172.19	6399.33
Abril	2286.97	1745.06	1029.95	5061.97
Mayo	1748.40	1583.41	971.92	4303.73
Junio	1394.54	1402.12	880.45	3677.12
Julio	1697.93	1549.45	991.93	4239.31
Agosto	2233.03	1726.92	1069.97	5029.92
Septiembre	2956.67	1904.96	1147.90	6009.53
Octubre	3961.96	2202.84	1296.07	7460.87
Noviembre	4695.19	2374.90	1368.84	8438.92
Diciembre	5063.60	2427.72	1397.69	8889.01

Nota. Elaboración Propia

Teniendo en cuenta la cantidad de colectores que se emplearán, es necesario anticipar su rendimiento a lo largo de todo el año.

Para hacerlo, se contrastó la energía producida por los colectores solares con la demanda energética total del sistema. Para llevar a cabo esta comparación, se recurrirá a la ecuación que se presentará a continuación:

$$\text{Energía sistema solar} = \text{Producción de energía útil del colector} \cdot \text{área del colector} \cdot \text{cantidad de colectores.} \quad (54)$$

Ahora para poder pronosticar la temperatura a la que va a llevar el sistema solar se usó la siguiente formula:

$$T_{\text{promosticada}} = \frac{\text{Energía del sistema solar}}{m \cdot cp_{\text{agua}}} + T_i \quad (55)$$

Donde:

$T_{\text{promosticada}}$ = Temperatura pronosticada del agua en (°C).

Energía del sistema solar = Energía recolectada (kW).

m = Masa del agua (kg).

cp_{agua} = Calor específico del agua 4.182 kJ/ kg/ °K.

T_i = Temperatura inicial del agua en (°C).

Es importante destacar que el agua precalentada por los colectores solares **no ingresa directamente a la caldera**, sino que se incorpora al proceso mediante el **tanque de condensado**. Este tanque actúa como intermediario hidráulico y térmico, permitiendo la mezcla del agua calentada por energía solar con el retorno de condensado del sistema de vapor.

Este enfoque mejora la eficiencia térmica del proceso sin alterar el funcionamiento estándar de la caldera, ya que respeta los puntos de control y seguridad del sistema original. Además, permite una integración gradual y estable del sistema solar al ciclo térmico.

A continuación, se presenta un mapa conceptual que muestra gráficamente la conexión entre el sistema de colectores solares, el tanque de condensado y la caldera de vapor:

Figura 4

Diagrama de propuesta



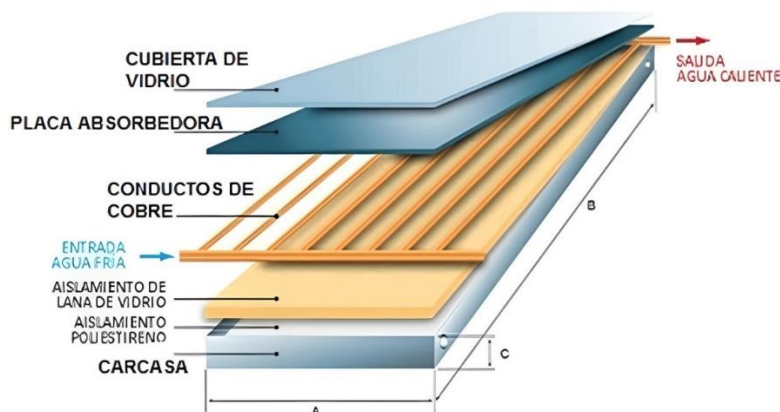
Nota. Elaboración Propia

3.4.13. Selección del colector solar

Dentro del mercado local, se identifica una amplia gama de marcas de termas solares. Sin embargo, únicamente se hallan dos categorías de colectores disponibles, los de placa plana y los de tubos de vacío cuya composición puede encontrarse en la Figura 5.

Figura 5

Colectores de placa plana de cubierta simple



Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 19 se presentan valores habituales correspondientes a los parámetros que caracterizan la eficiencia óptica y el coeficiente global de pérdidas térmicas. Adicionalmente, se muestra el rango convencional de temperaturas de operación para diversos tipos de colectores:

Tabla 19

Tipos de colectores

Colector	Rango (T°C)	FR (Ta)	FR UL (W/m ² - °C)
Sin cubierta	10 - 40	0.81	18
Cubierta simple	10 - 60	0.72	6.3
Cubierta doble	10 - 80	0.585	4.5
Superficie selectiva	10 - 80	0.72	4.5
Tubos al vacío	10 - 130	0.72	1.8

Nota. Elaboración Propia

Para nuestro estudio tomaremos estos dos modelos y haremos el dimensionamiento de la superficie colectora.

3.4.14. Selección del colector solar

Para nuestro estudio se usarán colectores solares de tubos al vacío tipo heat pipe, cuyas especificaciones técnicas se detallan en la siguiente ficha técnica:

Figura 6

Ficha técnica del colector solar Prisma Solar

Ficha Técnica
Colector Solar Presurizado
Heat Pipe

PRISMASOLAR

✓ ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL COLECTOR SOLAR

Número de tubos heat pipe	30 unid.
Dimensiones Tubo	58x1800 mm
Largo de Absorción Tubo	1715 mm
Porcentaje de Absorción	> 92 %
Porcentaje de Emisión	< 8 %
Largo / Ancho / Alto	2020x2655x155
Conexiones Manifold	38 mm/ 34 mm
Presión de Trabajo	0,6 MPa.
Temperatura de Estancamiento	200,3 °C.
Máxima temperatura de servicio	95 °C.
Peso Neto Colector	114 kg.
Área de Apertura	2,84 m ² .
Eficiencia Optica	71,4 %
Pérdida Lineal	1,08 W/m ² K

✓ DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El tubo tipo heat pipe está compuesto de una pipa hermética de cobre, que contiene fluido caloportador de alta eficiencia en su interior, ubicada dentro del tubo al vacío, el calor se transfiere a la pipa y ésta a su cabezal mediante films de aluminio que ayudan con la transferencia.

El cabezal se conecta al manifold del colector donde circula el fluido del circuito primario.

El circuito primario es presurizado mediante una bomba de impulsión controlada por un termostato diferencial digital, que al censar la diferencia de temperaturas entre el colector y el estanque de acumulación activa la circulación del fluido del circuito primario.

El traspaso del calor del fluido del circuito primario se puede realizar en forma directa al estanque acumulador, o mediante un intercambiador de calor en forma de serpiente dentro del estanque, como ilustra la figura.

Santa Elvira 76, Santiago, Chile | Fonos: (+56) 2 556 4871 - (+56) 2 551 7092 | contacto@esol.cl | www.esol.cl

Nota. Tomado de la página web de Prisma Solar

Para este estudio, se ha seleccionado un colector solar de tipo heat pipe con tubos al vacío debido a su alta eficiencia térmica, adecuada capacidad de operación en condiciones de presión y temperatura elevadas, y desempeño superior en zonas con irradiación moderada, como es el caso de Arequipa. Este colector cuenta con 30 tubos de dimensiones 58×1800 mm, con un porcentaje de absorción superior al 92% y pérdidas térmicas bajas

(1,08 W/m²K). Además, presenta una eficiencia óptica del 71,4%, destacando frente a otros tipos de colectores.

En comparación con colectores planos, que operan eficientemente solo hasta 60 °C con eficiencias ópticas promedio entre 60–65% y mayores pérdidas térmicas (hasta 6,3 W/m²K), los tubos de vacío ofrecen una ventaja significativa en eficiencia a altas temperaturas (operación hasta 95 °C o más). Por otro lado, los colectores sin cubierta presentan menor absorción y mayores pérdidas, lo que los hace inadecuados para aplicaciones industriales exigentes como la generación de vapor. Asimismo, los tubos al vacío permiten un mejor desempeño en días parcialmente nublados o con baja radiación, gracias a su sistema de aislamiento por vacío, lo cual maximiza el aprovechamiento solar diario.

Por estas razones, y considerando las condiciones climáticas locales y la necesidad de alcanzar temperaturas óptimas con eficiencia sostenida, se optó por los colectores de tubos de vacío. Esta elección garantiza un rendimiento térmico más estable y una mejor relación costo-beneficio a largo plazo para el sistema de precalentamiento implementado.

3.4.15. Dimensionamiento del área colectora

Para el dimensionamiento del área colectora requerida por el sistema:

$$\frac{Q_u}{A_C} = [Ht \cdot F_R(\tau\alpha) - F_R \cdot U_L(T_{fi} - T_a)] \quad (56)$$

Dónde:

$$\frac{Q_u}{A_C} = \text{Energía útil del colector por metro cuadrado}^\circ [\text{KW/m}^2]$$

$$Ht = \text{Radiación total instantánea}^\circ [\text{W/m}^2]$$

$$F_R(\tau\alpha) = \text{Factor de remoción por producto transmitancia-absortancia}^\circ$$

$$F_R U_L = \text{Factor de remoción por la perdidas de calor global del colector (W/m2 - }^\circ\text{C)}$$

$$T_{fi} = \text{Temperatura de ingreso al colector solar aproximadamente será } 16^\circ [\text{ }^\circ\text{C}]$$

$$T_a = \text{Temperatura del medio ambiente } [^\circ\text{C}]$$

Teniendo ya todos los datos y reemplazándolo en la formula se procede primero a determinar la energía útil del colector solar.

Actualmente, se cuenta con información sobre la producción de energía de manera instantánea (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>). Sin embargo, para determinar la cantidad de energía que un colector genera a lo largo del día, es necesario calcular la energía útil acumulada. Para realizar este cálculo, se empleó la ecuación que se detallará a continuación:

3.4.16. Energía útil acumulada del colector solar

$$E_{\text{útil, diario}} = A \cdot G_{\text{diario}} \cdot \eta \quad (57)$$

Donde:

A = Es el área de apertura del colector en m^2 .

G_{diario} = Es la irradiación diaria media en $kWh/m^2/día$.

$\eta = 0.714$ es la eficiencia óptica del colector.

Tabla 20

Energía útil acumulada del colector solar ($kWh/m^2 /Día$)

Irradiación diaria media mensual (en $kWh/m^2/día$)	Energía útil diaria del colector ($kWh/m^2/día$)
6.27	12.71
5.45	11.05
5.65	11.46
5.69	11.54
5.60	11.36
5.19	10.52
5.32	10.79
5.89	11.94
6.73	13.65
7.63	15.47
8.16	16.55
7.42	15.05

Nota. Elaboración Propia

El análisis de la irradiación solar promedio y la energía útil diaria obtenida revela una disponibilidad relativamente constante de energía solar a lo largo del año. La irradiación diaria media mensual varía entre 5.19 y 8.16 $kWh/m^2/día$, lo que indica condiciones solares favorables en todas las estaciones. En correspondencia, la energía útil diaria generada por el colector se encuentra entre 10.52 y 16.55 $kWh/m^2/día$, superando ampliamente la irradiación

gracias a la eficiencia del sistema de captación y posibles mecanismos de concentración solar implementados.

3.4.17. Número de colectores requeridos

El cálculo del número de colectores solares es necesario para garantizar que el sistema pueda cubrir la demanda energética requerida en diferentes condiciones estacionales. Utilizando la siguiente fórmula se determina la cantidad de colectores necesarios para cada mes, teniendo en cuenta las variaciones en la irradiación solar y la eficiencia del sistema.

$$\text{N}^{\circ} \text{ de colectores} = \frac{\text{Área Requerida sistema}}{\text{Área del colector}} \quad (58)$$

Tabla 21

Numero de colectores

Mes	Numero de colectores (unidades)
Enero	40.61
Febrero	47.02
Marzo	46.49
Abril	46.50
Mayo	47.87
Junio	53.27
Julio	53.47
Agosto	48.45
Septiembre	41.16
Octubre	35.78
Noviembre	31.63
Diciembre	35.61
Colectores por usar	50.0

Nota. Elaboración Propia

La Tabla 21 presenta el número de colectores solares necesarios por mes para cubrir la demanda energética, con valores que fluctúan entre 31.63 y 53.47 unidades. Esta variación se debe a los cambios estacionales en la irradiación solar y en la eficiencia de conversión del sistema, afectando directamente la cantidad de colectores requeridos para mantener una producción energética constante. Se observa que los meses con menor irradiación como noviembre (31.63 colectores) y diciembre (35.61 colectores) requieren un menor número de colectores, mientras que los meses con menor eficiencia o mayor demanda energética como junio (53.27 colectores) y julio (53.47 colectores) exigen una mayor cantidad. Ante esta

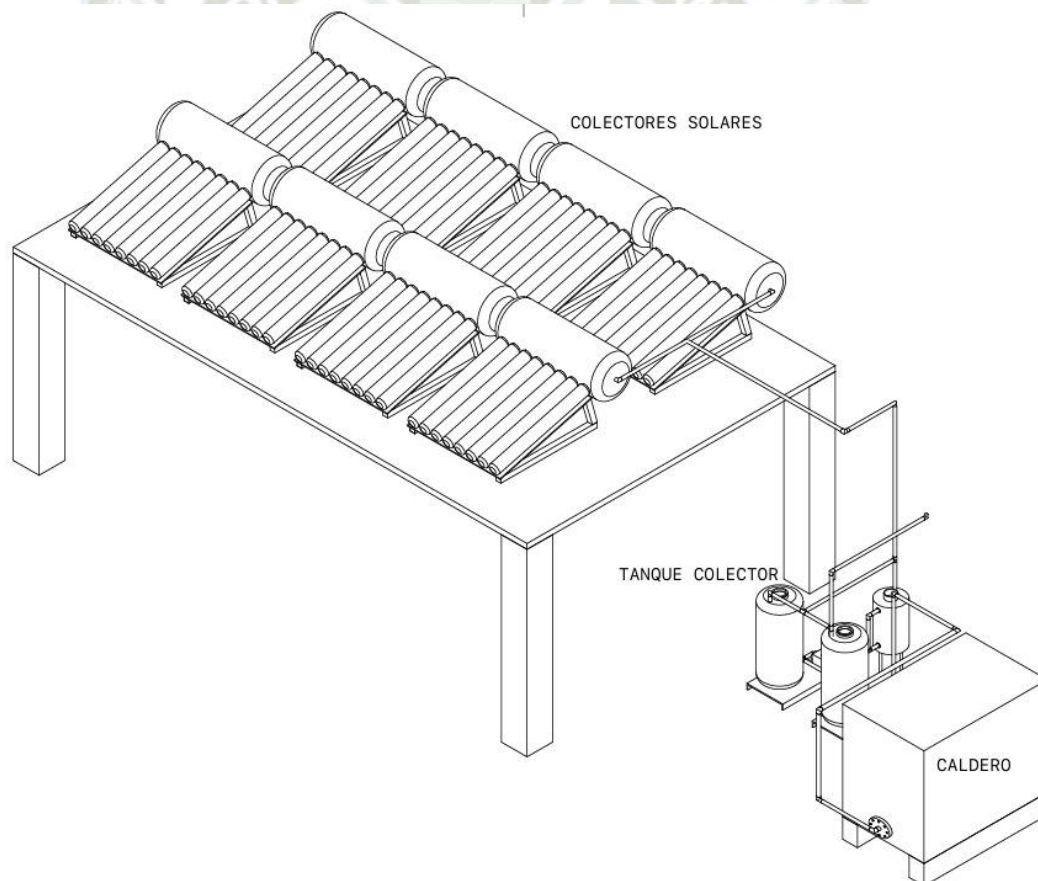
variabilidad, se ha optado por instalar un total de 50 colectores solares, decisión que proporciona un margen de seguridad operacional. Esta elección garantiza que incluso en los meses más críticos, el sistema será capaz de satisfacer la demanda energética sin comprometer su rendimiento, asegurando la estabilidad del suministro durante todo el año y optimizando el aprovechamiento del recurso solar.

3.4.18. Cálculo de áreas de implementación del sistema

A continuación, se presenta un plano referencial del área propuesta para la instalación del sistema de colectores solares.

Figura 7

Plano referencial del sistema de precalentamiento solar.



Nota. Elaboración Propia

$$A_{\text{total}} = N_{\text{colector}} \cdot A_{\text{colector}} \quad (59)$$

Donde:

N_{colector} = Número de colectores solares.

A_{colector} = Área del colector en (m^2).

Sustituyendo los valores, sabiendo que el área del colector considerando el modelo de elección (Ver Figura 4) es de $2.84 (\text{m}^2)$.

$$A_{\text{total}} = 50 \cdot 2.84$$

$$A_{\text{total}} = 142 \text{ m}^2.$$

3.4.19. Análisis de funcionamiento del sistema solar

Teniendo en cuenta la cantidad de colectores que se emplearán, es crucial anticipar su rendimiento a lo largo de todo el año.

Para hacerlo, se contrastó la energía producida por los colectores solares con la demanda energética total del sistema. Para llevar a cabo esta comparación, se recurrirá a la ecuación que se presentará a continuación:

$$\text{Energía sistema solar} = \text{Producción de energía útil del colector} \cdot \text{área del colector} \cdot \text{cantidad de colectores.} \quad (60)$$

Usando la anterior formula se obtiene los resultados de la tabla siguiente y graficando se obtiene en la figura:

Tabla 22

Energía entregada por el sistema solar

Mes	Energía útil diaria de los colectores ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$)	Energía requerida mensual ($\text{kWh/m}^2/\text{mes}$)	Energía útil mensual de 50 colectores ($\text{kWh/m}^2/\text{mes}$)
Enero	635.70	16,007.53	19,706.79
Febrero	552.56	14,549.60	15,471.81
Marzo	572.84	16,512.27	17,758.11
Abril	576.90	16,096.85	17,306.93
Mayo	567.77	16,852.61	17,600.96
Junio	526.20	16,816.98	15,786.11
Julio	539.38	17,882.29	16,720.91
Agosto	597.18	17,939.97	18,512.43
Septiembre	682.34	16,850.47	20,470.24
Octubre	773.59	17,161.23	23,981.30

Noviembre	827.33	15,700.50	24,819.78
Diciembre	752.30	16,607.45	23,321.27
Total			231,456.64

Nota. Elaboración Propia

La Tabla 22 muestra la energía útil entregada mensualmente por un sistema solar compuesto por 50 colectores, evidenciando variaciones vinculadas principalmente a los cambios en la irradiación solar disponible a lo largo del año. La energía útil diaria de los colectores varía entre 526.20 y 827.33 kWh/m²/día, siendo los valores más altos registrados en noviembre y octubre, meses caracterizados por una mayor intensidad solar. En cuanto a la energía útil mensual generada por el conjunto de colectores, se observa un rango entre 14,549.60 y 17,939.97 kWh/m², mientras que la energía total mensual entregada por los 50 colectores alcanza entre 15,471.81 y 24,819.78 kWh/m². Los meses de mayor producción corresponden a octubre, noviembre y diciembre, cuando el sistema aprovecha al máximo las condiciones solares óptimas, alcanzando su pico en noviembre con 24,819.78 kWh/m². Por otro lado, el valor más bajo de energía útil mensual se registra en febrero, con 15,471.81 kWh/m², lo cual sigue siendo suficiente para cubrir la demanda proyectada gracias al sobredimensionamiento del sistema. Este comportamiento estacional refleja que el sistema ha sido correctamente dimensionado para garantizar un suministro energético constante y eficiente, incluso en los meses con menor irradiación solar.

Ahora para poder pronosticar la temperatura a la que va a llevar el sistema solar se usó la siguiente fórmula:

$$T_{\text{pronosticada}} = \frac{\text{Energía del sistema solar}}{m \cdot c_{p_{\text{agua}}}} + T_i \quad (61)$$

Donde:

$T_{\text{pronosticada}}$ = Temperatura pronosticada del agua en (°C).

Energía del sistema solar = Energía recolectada (kW).

m = Masa del agua (kg).

$c_{p_{\text{agua}}}$ = Calor específico del agua 4.182 kJ/ kg/ °K.

T_i = Temperatura inicial del agua en (°C).

Tabla 23

Temperatura pronosticada entregada por el sistema

Mes	Temperatura pronosticada (°C)	ΔT (°C)	Temperatura final entregada por el sistema
Enero	70.00	55.50	82.83
Febrero	70.00	55.85	73.54
Marzo	70.00	57.25	74.32
Abril	70.00	57.67	74.34
Mayo	70.00	58.43	72.59
Junio	70.00	60.25	66.31
Julio	70.00	62.00	65.97
Agosto	70.00	62.20	71.98
Septiembre	70.00	60.37	82.97
Octubre	70.00	59.50	93.65
Noviembre	70.00	56.25	102.67
Diciembre	70.00	57.58	93.28

Nota. Elaboración Propia

La Tabla 23 presenta los valores mensuales de temperatura pronosticada, incremento térmico (ΔT) y temperatura final entregada por el sistema solar. Se observa que la temperatura pronosticada se mantiene constante en 70.00 °C a lo largo de todo el año. Sin embargo, el incremento térmico ΔT varía entre 55.50 °C en enero y 62.20 °C en agosto, lo que evidencia la influencia de factores operacionales y ambientales sobre el proceso de calentamiento.

Como resultado de estas variaciones en ΔT , la temperatura final entregada por el sistema presenta fluctuaciones significativas, con valores que van desde 65.97 °C en julio hasta un máximo de 102.67 °C en noviembre. Este comportamiento sugiere que, a pesar de contar con una temperatura pronosticada constante, el sistema responde dinámicamente a las condiciones reales de operación, como la radiación solar incidente, la eficiencia térmica y las pérdidas de calor. En particular, los meses de mayor ΔT como agosto y julio no coinciden necesariamente con las mayores temperaturas finales, lo que indica la presencia de otros factores moduladores en el rendimiento térmico del sistema. Por ejemplo, en noviembre, a pesar de tener un ΔT moderado (56.25 °C), se alcanza la temperatura final más alta del año (102.67 °C), lo que podría atribuirse a una mayor eficiencia térmica o acumulación energética.

3.5. Cálculo de ahorro de combustible

Tabla 24

Cálculo de ahorro de combustible al calentar el agua

Mes	ahorro Galones de GLP (por mes)	ahorro m3 de GN (por mes)	ahorro en soles de Galones de GLP (por mes)	ahorro en soles de m3 de GN (por mes)	ahorro en dólares de Galones de GLP (por mes)	ahorro en dólares de m3 de GN (por mes)	Emisiones de GLP provenientes del ahorro	Emisiones de GNV provenientes del ahorro
Enero	769.80	1,876.84	8,082.86	3,303.23	2,127.07	869.27	4,395.54	3,659.83
Febrero	604.37	1,473.51	6,345.86	2,593.37	1,669.96	682.47	3,450.94	2,873.34
Marzo	693.68	1,691.25	7,283.60	2,976.60	1,916.74	783.32	3,960.89	3,297.93
Abril	676.05	1,648.28	7,098.55	2,900.97	1,868.04	763.41	3,860.26	3,214.14
Mayo	687.54	1,676.28	7,219.14	2,950.26	1,899.77	776.38	3,925.84	3,268.75
Junio	616.64	1,503.44	6,474.77	2,646.05	1,703.89	696.33	3,521.04	2,931.71
Julio	653.16	1,592.47	6,858.19	2,802.74	1,804.79	737.56	3,729.55	3,105.31
Agosto	723.14	1,763.09	7,592.99	3,103.04	1,998.16	816.59	4,129.14	3,438.02
Septiembre	799.62	1,949.55	8,396.00	3,431.20	2,209.47	902.95	4,565.82	3,801.62
Octubre	936.77	2,283.93	9,836.08	4,019.72	2,588.44	1,057.82	5,348.95	4,453.67
Noviembre	969.52	2,363.79	10,179.99	4,160.27	2,678.94	1,094.81	5,535.97	4,609.39
Diciembre	910.99	2,221.07	9,565.36	3,909.09	2,517.20	1,028.71	5,201.74	4,331.09
	9,041.27	22,043.49	94,933.39	38,796.54	24,982.47	10,209.62	51,625.68	42,984.80

Nota. Elaboración Propia

El análisis del ahorro mensual por el uso del sistema solar para calentar agua revela una reducción significativa en el consumo de gas licuado de petróleo (GLP) y gas natural (GN) a lo largo del año. El ahorro mensual en GLP oscila entre 604.37 y 969.52 galones, mientras que en gas natural varía entre 1,473.51 y 2,363.79 m³, dependiendo de la estacionalidad y la eficiencia térmica alcanzada. En términos monetarios, los ahorros mensuales por el consumo evitado de GLP fluctúan entre S/ 6,345.86 (febrero) y S/ 10,179.99 (noviembre), mientras que el ahorro en GN alcanza desde S/ 2,593.37 hasta S/ 4,160.27. Esta reducción representa un ahorro mensual total, en dólares, que varía entre USD 1,669.96 y USD 2,678.94 para GLP, y entre USD 682.47 y USD 1,094.81 para GN.

A lo largo del año, el sistema permite acumular un ahorro total de S/ 94,933.39 en GLP y S/ 38,796.54 en GN, lo que equivale a un ahorro conjunto anual de aproximadamente USD 35,192.09. Además del beneficio económico, el ahorro en consumo de combustibles fósiles también contribuye a la reducción de emisiones. Se evita la emisión de 51,625.68 kg de CO₂ por GLP y 42,984.80 kg de CO₂ por GN, lo que representa una mejora significativa en el impacto ambiental del sistema.

3.6. Simulación en System Advisor Model (SAM)

El software System Advisor Model (SAM) es una herramienta avanzada diseñada para la evaluación de sistemas de energía renovable, incluidos los sistemas de calentamiento de agua solar. En un contexto más general, SAM permite a los usuarios modelar y analizar la viabilidad técnica y financiera de proyectos de calentamiento de agua solar.

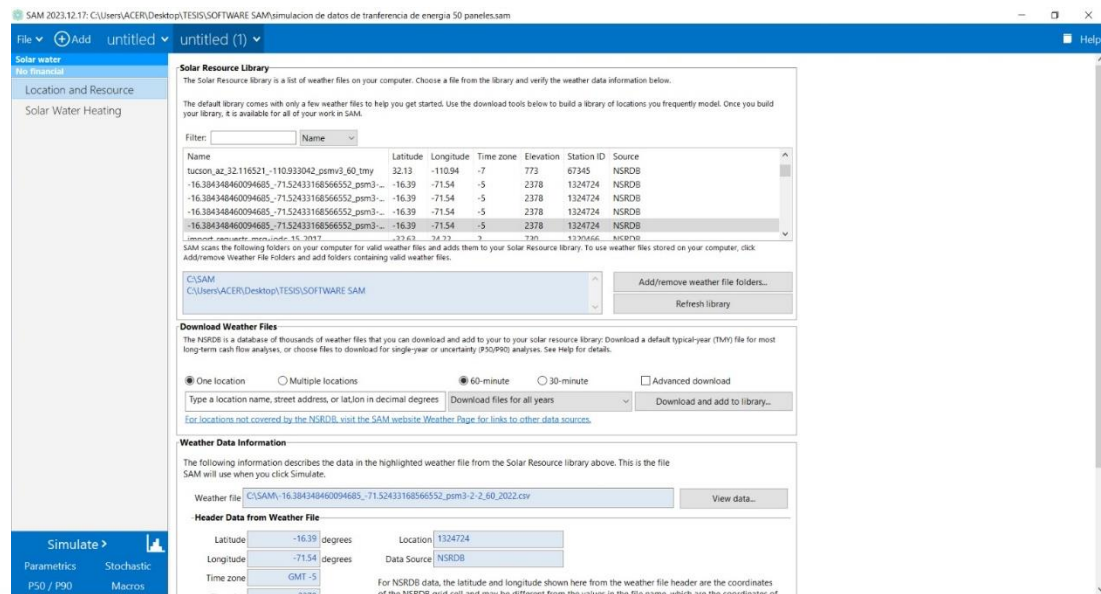
El proyecto se basó en el modelo de Calentamiento de Agua Solar y se utilizó el System Advisor Model (SAM) con datos de la investigación para evaluar la veracidad de los datos del sistema en un contexto específico. A continuación, se presenta una guía paso a paso sobre cómo se procedió:

3.7. Recolección de datos de la investigación

En la configuración de SAM para el sistema de calentamiento de agua solar, se está utilizando un archivo climático que contiene datos meteorológicos detallados para una ubicación específica, en este caso, Arequipa, Perú, con las

coordenadas -16.39° de latitud y -71.54° de longitud. Estos archivos provienen de la base de datos NSRDB (National Solar Radiation Database), la cual proporciona datos históricos y estimaciones sobre la irradiación solar y otras variables climáticas para realizar simulaciones precisas.

Figura 8
Datos a llenar en el software



Nota. Elaboración Propia

En la configuración de SAM para el sistema de calentamiento de agua solar, se está utilizando un archivo climático que contiene datos meteorológicos detallados para una ubicación específica, en este caso, Arequipa, Perú, con las coordenadas -16.39° de latitud y -71.54° de longitud. Estos archivos provienen de la base de datos NSRDB (National Solar Radiation Database), la cual proporciona datos históricos y estimaciones sobre la irradiación solar y otras variables climáticas para realizar simulaciones precisas.

Detalles de la configuración:

1. Datos de ubicación:

- **Latitud y Longitud:** Los valores -16.39° y -71.54° indican la posición geográfica de la ubicación seleccionada, lo que es fundamental para calcular la irradiación solar que incide sobre el sistema.

- **Zona horaria (GMT -5):** La simulación se ajusta a la zona horaria local para asegurar que los datos climáticos se alineen correctamente con las horas del día.
- **Elevación (2378 m):** La altitud sobre el nivel del mar afecta la cantidad de irradiación solar disponible, ya que, a mayor elevación, la atmósfera es más delgada y la radiación solar directa puede ser mayor.
- **Intervalo de tiempo (60 minutos):** Los datos climáticos están configurados para ser procesados en intervalos de una hora, lo cual es adecuado para estimaciones diarias y mensuales del rendimiento del sistema.

2. Promedios anuales calculados a partir del archivo climático:

- **Irradiación global horizontal (6.63 kWh/m²/día):** Representa la cantidad promedio de energía solar que llega a una superficie horizontal. Es una combinación de la irradiación directa y difusa, y es crucial para evaluar la energía solar captada por colectores planos.
- **Irradiación directa normal (7.66 kWh/m²/día):** Indica la energía solar que llega directamente en una trayectoria recta. Es fundamental para los colectores que siguen al sol, como los concentradores.
- **Irradiación difusa horizontal (1.28 kWh/m²/día):** Corresponde a la radiación solar que llega desde el cielo sin seguir una trayectoria directa, debido a la dispersión en la atmósfera. Es importante para días nublados o con alta nubosidad.
- **Temperatura media anual (16.8 °C):** La temperatura ambiente influye en la eficiencia del sistema solar térmico, ya que temperaturas más altas reducen las pérdidas térmicas.
- **Velocidad media del viento (2.3 m/s):** La velocidad del viento puede afectar la transferencia de calor y la pérdida térmica de los colectores. Un mayor viento generalmente aumenta las pérdidas por convección.

3.8. Configuración en SAM

Con todos los datos disponibles, se siguieron los siguientes pasos en el SAM para configurar el proyecto:

Selección del Modelo de Tecnología: Se inició un nuevo proyecto en SAM y se seleccionó “Calentamiento de Agua Solar” como el tipo de tecnología.

Ingreso de Datos de Ubicación: Se introdujeron los datos de la ubicación geográfica para obtener los parámetros climáticos relevantes.

Configuración del Sistema: Se ingresaron los detalles técnicos de los colectores solares y del sistema de almacenamiento de agua caliente, si aplicaba.

Agregar los valores usados en la ciudad de Arequipa.

Figura 9

Cuadro de dialogo del software SAM

Hot Water Draw

Hourly hot water draw profile kg/hr Scale draw profile to average daily usage

Total annual hot water draw kg/year Average daily hot water usage kg/day

System

Tilt deg Diffuse sky model

Azimuth deg Irradiance inputs

Working fluid

Number of collectors Albedo 0.1

Total system collector area m²

Rated system size kW

-Shading- **-System Availability-**

 Constant loss: 0.0 %

Time series losses not enabled

Custom periods not enabled

Collector

Enter user-defined parameters

Choose from library

User-defined collector

Collector area m²

FRta

FRUL W/m².C

IAM coefficient

Test fluid

Test flow kg/s

Filter: Name

Name	SRCC Number	Type	Area	IAM	FRta	FRUL	Test Fluid	Te ^
Jiangsu Sunrain Solar Energy Co. Ltd. Sunrain TZ58 1800-20R	2009042A	Tubular	3.48	-1....	0.398	0.62	0	0.0
KBB Kollektorbau K423-DH	2009121A	Glazed Flat-Plate	2.51	0.06	0.71	3.19	1	0.0
Kingspan Solar Inc. Thermomax DF100-20	2009049B	Tubular	2.85	0.14	0.6...	1.17	0	0.0
Kingspan Solar Inc. Thermomax DF100-30	2009049C	Tubular	4.27	0.14	0.6...	1.17	0	0.0
Kingspan Solar Inc. Thermomax DF100-10	2009049A	Tubular	1.43	0.14	0.601	1.17	0	0.0
Kingspan Solar Inc. Solamax AST80	2003004E	Tubular	11....	-0....	0.573	2.85	0	0.0
Kingspan Solar Inc. Solamax AST70	2003004D	Tubular	9.98	-0....	0.573	2.85	0	0.0
Kingspan Solar Inc. Solamax AST50	2003004C	Tubular	7.13	-0....	0.573	2.85	0	0.0
Kingspan Solar Inc. Solamax AST20	2003004A	Tubular	2.85	-0....	0.573	2.85	0	0.0

Nota. Elaboración Propia

La figura 9 muestra un cuadro de diálogo del software SAM (System Advisor Model) configurado para el análisis de un sistema solar térmico destinado a calentar agua. Los datos que se deben ingresar para realizar los cálculos son los siguientes:

1. Hot Water Draw (Consumo de agua caliente):

- Perfil horario del consumo de agua caliente (en kg/hr).
- Consumo total anual de agua caliente: 2920000 kg/año.
- Consumo promedio diario de agua caliente: 8000 kg/día.

2. System (Sistema):

- Ángulo de inclinación de los colectores (Tilt): 15 grados.
- Azimut: 0 grados (orientación sur en el hemisferio norte).
- Fluido de trabajo: Agua.
- Número de colectores: 50.
- Área total del sistema de colectores: 142.5 m².
- Tamaño del sistema (potencia nominal): 97.470 kW.
- Modelo de cielo difuso: Isotrópico.
- Albedo (reflexión del suelo): 0.2.

3. Shading (Sombreado):

- Pérdidas por sombreado constantes: 0%.

4. Collector (Colector):

- Parámetros definidos por el usuario:
 - Área del colector: 2.85 m².
 - Coeficiente de rendimiento óptico (FR_{ta}): 0.714.
 - Coeficiente de pérdidas térmicas (FR_{UL}): 1 W/m²·°C.
 - Coeficiente IAM (modificador de ángulo de incidencia): 0.15.
 - Fluido de prueba: Agua.
 - Flujo de prueba: 0.045528 kg/s.

Estos datos son esenciales para simular el rendimiento del sistema en el software SAM, permitiendo estimar la cantidad de energía térmica que el sistema puede generar y las eficiencias bajo diferentes condiciones operativas y climáticas.

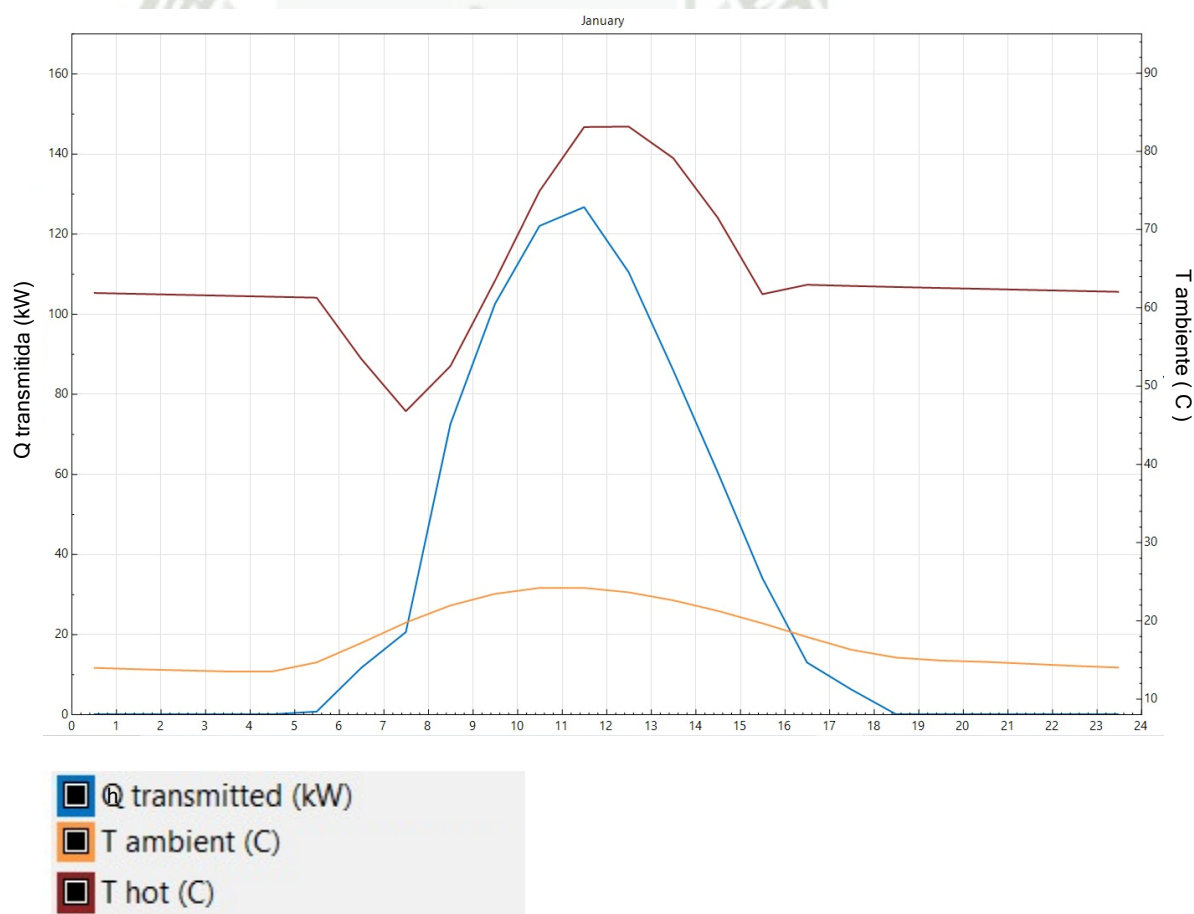
3.9. Simulación y análisis

Con toda la información introducida, se procedió a simular el comportamiento del sistema de calentamiento de agua solar a lo largo del año. SAM proporcionó resultados detallados que incluyeron:

Datos de la temperatura ambiente

Figura 10

Diferentes parámetros evaluados en el software



Nota. Elaboración Propia

La Figura 10 muestra la oscilación diaria de la energía transmitida (Q transmitted), la temperatura ambiente (T ambiente) y la temperatura del agua

caliente (T hot) durante un día típico de enero. La curva de la energía transmitida (azul) alcanza su máximo alrededor del mediodía, con picos de hasta 120 kW, lo que coincide con el periodo de mayor irradiación solar. La temperatura ambiente (naranja) también aumenta progresivamente, alcanzando su valor máximo durante el mismo periodo antes de descender por la tarde. Por otro lado, la temperatura del agua caliente (marrón) sube significativamente durante las horas de mayor energía transmitida, logrando máximos cercanos a 80 °C, lo que demuestra la efectividad del sistema en aprovechar las horas de mayor insolación para calentar el agua.

3.9.1. Energía ahorrada mensual por el sistema solar

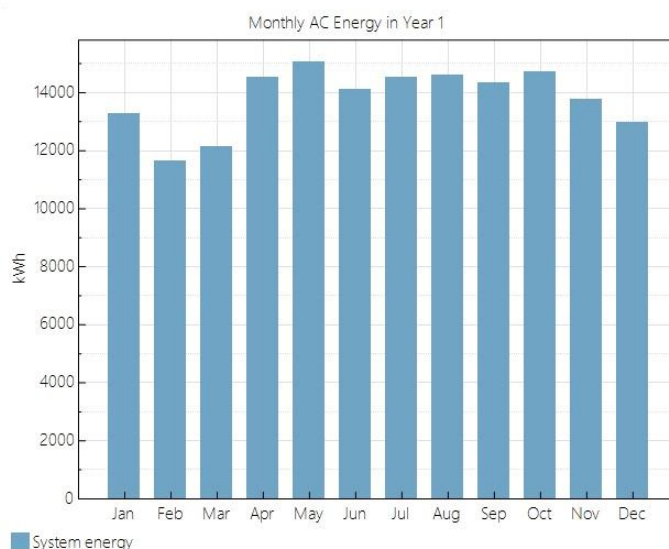
La Figura 11 muestra la energía ahorrada mensualmente por el sistema solar durante el primer año. El gráfico de barras indica que el ahorro mensual en energía varía ligeramente a lo largo del año, con un promedio que oscila entre 12,000 y 14,000 kWh. Los meses de mayor ahorro energético corresponden a mayo, junio y julio, cuando la irradiación solar es más intensa, lo que optimiza la generación de energía solar.

Figura 11

Energía ahorrada mensual por el sistema solar

Metric	Value
Annual AC energy saved (year 1)	165,640 kWh
Solar fraction (year 1)	0.91
Aux with solar (year 1)	15,927.2 kWh
Aux without solar (year 1)	181,741.9 kWh
Capacity factor (year 1)	19.4%

T ambiente



Nota. Elaboración Propia

Los datos adicionales indican que el sistema ha logrado un ahorro anual total de 165,640 kWh, con una fracción solar del 91%, lo que significa que el 91% de

la demanda energética anual fue cubierta por la energía solar. La energía auxiliar necesaria con el sistema solar fue de 15,927.2 kWh, en contraste con 181,741.9 kWh si no se hubiera usado energía solar. El factor de capacidad anual del sistema es del 19.4%, lo que refleja el aprovechamiento efectivo de la capacidad instalada para generar energía a lo largo del año.

Tabla 25

Comparación entre el Software SAM y datos calculados

Mes	Software SAM		Cálculos propios	
	Energía transmitida (kW)	T caliente (°C)	Energía transmitida (kW)	T caliente (°C)
Enero	15433.10	64.08	18,924.57	74.65
Febrero	13683.20	61.75	17,703.63	74.30
Marzo	14035.00	59.36	18,293.75	72.90
Abril	18054.80	75.12	18,314.10	77.94
Mayo	18816.10	76.16	18,609.16	76.09
Junio	17263.10	74.66	19,229.81	73.18
Julio	18042.00	76.40	19,870.80	71.43
Agosto	18889.80	79.47	19,870.80	73.41
Septiembre	18908.50	80.80	19,229.81	75.24
Octubre	19465.70	81.31	18,924.57	76.11
Noviembre	17781.40	76.56	17,703.63	77.18
Diciembre	15591.20	64.71	18,293.75	72.57

Nota. Elaboración Propia

La tabla 25 muestra que los resultados del software SAM y los cálculos propios son similares, lo que indica una buena correlación entre ambos enfoques para estimar la energía transmitida y la temperatura del agua caliente. Aunque hay pequeñas diferencias en los valores mensuales, estas son mínimas y se mantienen dentro de un rango aceptable. Esto sugiere que los métodos utilizados para los cálculos propios están alineados con los algoritmos del software SAM, lo que valida la precisión de los resultados obtenidos en ambos casos. La consistencia en los datos refleja que los modelos de cálculo empleados capturan de manera efectiva el comportamiento del sistema solar a lo largo del año.

CAPÍTULO IV

4. Análisis comparativo detallado de los tres sistemas de colectores solares

En este apartado se comparan tres configuraciones de sistemas de colectores solares, considerando opciones con 30, 50 y 70 unidades. Se analizan parámetros como la temperatura final del agua, el ahorro de combustible diario y mensual, así como los beneficios económicos en soles y dólares. El propósito es identificar el desempeño de cada configuración en términos de eficiencia y ahorro, ajustándose a las necesidades energéticas de una caldera de vapor industrial. La comparación busca destacar cómo cada sistema puede contribuir a reducir el consumo de combustible y los costos operativos, ofreciendo alternativas para optimizar el uso de energía solar en procesos industriales.

La Tabla 26 presenta el desempeño del sistema solar empleando 30 colectores. Este diseño permite alcanzar temperaturas finales que, en su mayoría, cumplen con los requerimientos energéticos, aunque se evidencian limitaciones en meses de alta demanda. La temperatura final entregada varía entre 42.78 °C (julio) y 67.10 °C (noviembre), mientras que el ahorro mensual en GLP oscila entre 362.62 y 581.71 galones, generando un ahorro económico de entre S/ 3,807.52 y S/ 6,107.99 (equivalente a USD 1,001.98 a USD 1,607.37). En promedio, se logra un ahorro mensual de 452.06 galones, lo que representa un ahorro anual de 5,424.76 galones de GLP, S/ 56,960.03, USD 14,989.48, y una reducción de 30,975.41 kg de CO₂ en emisiones. Aunque el sistema con 30 colectores ofrece beneficios económicos y ambientales, su menor capacidad térmica respecto a configuraciones mayores puede ser insuficiente en meses críticos, comprometiendo parcialmente la eficiencia del calentamiento.

Tabla 26

30 colectores

Meses	Temperatura pronosticada (°C)	ΔT (°C)	Temperatura final entregada (°C)	ahorro Galones de GLP (por mes)	ahorro en soles de Galones de GLP (por mes)	ahorro en dolares de Galones de GLP (por mes)	Emisiones de GLP provenientes del ahorro
Ene	70.00	55.50	55.50	461.88	4,849.72	1,276.24	2,637.32
Feb	70.00	55.85	49.78	362.62	3,807.52	1,001.98	2,070.56
Mar	70.00	57.25	49.69	416.21	4,370.16	1,150.04	2,376.53
Abr	70.00	57.67	49.53	405.63	4,259.13	1,120.82	2,316.15

May	70.00	58.43	48.18	412.52	4,331.49	1,139.86	2,355.50
Jun	70.00	60.25	43.68	369.99	3,884.86	1,022.33	2,112.63
Jul	70.00	62.00	42.78	391.90	4,114.91	1,082.87	2,237.73
Ago	70.00	62.20	46.31	433.89	4,555.79	1,198.89	2,477.48
Sep	70.00	60.37	53.63	479.77	5,037.60	1,325.68	2,739.49
Oct	70.00	59.50	60.39	562.06	5,901.65	1,553.07	3,209.37
Nov	70.00	56.25	67.10	581.71	6,107.99	1,607.37	3,321.58
Dic	70.00	57.58	60.93	546.59	5,739.22	1,510.32	3,121.04
				5,424.76	56,960.03	14,989.48	30,975.41

Nota. Elaboración Propia

Con 50 colectores solares, la Tabla 27 muestra que, aunque la temperatura pronosticada se mantiene constante en 70 °C durante todo el año, el incremento térmico mensual (ΔT) varía entre 55.50 °C y 62.20 °C, lo que genera temperaturas finales que oscilan entre 65.97 °C (julio) y 102.67 °C (noviembre). Esto refleja la influencia de factores estacionales sobre el rendimiento térmico del sistema. El ahorro mensual en GLP varía entre 604.37 y 969.52 galones, generando un ahorro económico que va desde S/ 6,345.86 hasta S/ 10,179.99, y entre USD 1,669.96 y USD 2,678.94. En total, el sistema permite ahorrar S/ 94,933.39 y USD 24,982.47 al año. Además, se evita la emisión de 51,625.68 kg de CO₂ anuales, consolidando al sistema como una solución eficiente, rentable y ambientalmente responsable.

Tabla 27

50 colectores

Meses	Temperatura pronosticada (°C)	ΔT (°C)	Temperatura final entregada (°C)	Ahorro Galones de GLP (por mes)	Ahorro en soles de Galones de GLP (por mes)	ahorro en dolares de Galones de GLP (por mes)	Emisiones de GLP provenientes del ahorro
Ene	70.00	55.50	82.83	769.80	8,082.86	2,127.07	4,395.54
Feb	70.00	55.85	73.54	604.37	6,345.86	1,669.96	3,450.94
Mar	70.00	57.25	74.32	693.68	7,283.60	1,916.74	3,960.89
Abr	70.00	57.67	74.34	676.05	7,098.55	1,868.04	3,860.26
May	70.00	58.43	72.59	687.54	7,219.14	1,899.77	3,925.84
Jun	70.00	60.25	66.31	616.64	6,474.77	1,703.89	3,521.04
Jul	70.00	62.00	65.97	653.16	6,858.19	1,804.79	3,729.55
Ago	70.00	62.20	71.98	723.14	7,592.99	1,998.16	4,129.14
Sep	70.00	60.37	82.97	799.62	8,396.00	2,209.47	4,565.82
Oct	70.00	59.50	93.65	936.77	9,836.08	2,588.44	5,348.95
Nov	70.00	56.25	102.67	969.52	10,179.99	2,678.94	5,535.97

Dic	70.00	57.58	93.28	910.99	9,565.36	2,517.20	5,201.74
				9,041.27	94,933.39	24,982.47	51,625.68

Nota. Elaboración Propia

El sistema solar configurado con 70 colectores presenta el mayor rendimiento térmico y económico. La temperatura final entregada varía entre 88.93 °C (junio) y 138.24 °C (noviembre), superando ampliamente los requerimientos energéticos en todos los meses del año. Este diseño garantiza una cobertura total de la demanda, incluso en escenarios de alta exigencia térmica. En términos de ahorro, se alcanza un promedio mensual de 1,054.81 galones de GLP, lo que representa un ahorro anual acumulado de 12,657.78 galones, equivalente a S/ 132,906.74, USD 34,975.46 y una reducción de 72,275.95 kg de CO₂ en emisiones. Aunque este sistema implica una mayor inversión inicial, ofrece la solución más robusta y eficiente para asegurar la continuidad del suministro térmico, optimizar el rendimiento energético y maximizar los beneficios económicos y ambientales.

Tabla 28

70 Colectores

Meses	Temperatura pronosticada (°C)	ΔT (°C)	Temperatura final entregada (°C)	ahorro Galones de GLP (por mes)	ahorro en soles de Galones de GLP (por mes)	ahorro en dolares de Galones de GLP (por mes)	Emisiones de GLP provenientes del ahorro
Ene	70.00	55.50	110.16	1,077.71	11,316.01	2,977.90	6,153.75
Feb	70.00	55.85	97.30	846.11	8,884.20	2,337.95	4,831.31
Mar	70.00	57.25	98.95	971.15	10,197.04	2,683.43	5,545.25
Abr	70.00	57.67	99.14	946.47	9,937.96	2,615.25	5,404.36
May	70.00	58.43	97.00	962.55	10,106.80	2,659.68	5,496.17
Jun	70.00	60.25	88.93	863.30	9,064.68	2,385.44	4,929.46
Jul	70.00	62.00	89.16	914.42	9,601.46	2,526.70	5,221.37
Ago	70.00	62.20	97.66	1,012.40	10,630.19	2,797.42	5,780.80
Sep	70.00	60.37	112.30	1,119.47	11,754.39	3,093.26	6,392.15
Oct	70.00	59.50	126.90	1,311.48	13,770.51	3,623.82	7,488.54
Nov	70.00	56.25	138.24	1,357.33	14,251.98	3,750.52	7,750.36
Dic	70.00	57.58	125.62	1,275.38	13,391.51	3,524.08	7,282.43
				12,657.78	132,906.74	34,975.46	72,275.95

Nota. Elaboración Propia

Análisis comparativo de los tres sistemas de colectores solares

El análisis de los sistemas con 30, 50 y 70 colectores solares se han llevado a cabo considerando múltiples indicadores clave: temperatura final, consumo de gas diario y mensual, y ahorros económicos tanto en soles como en dólares. A continuación, se expone un análisis exhaustivo basado en los datos presentados.

1. Ahorro de galones de gas diario y mensual

- **30 Colectores:** El ahorro de consumo promedio diario es de 13.8 galones, con un ahorro de consumo mensual estimado en 423 galones. Esto lo convierte en el sistema más económico en términos de gas utilizado, pero también limita la capacidad del sistema para generar mayores ahorros.
- **50 Colectores:** El ahorro de consumo diario sube a 22.3 galones, con un ahorro de consumo mensual de 706 galones. Aunque el ahorro de consumo es mayor que en el sistema de 30 colectores, se compensa por el mayor ahorro económico gracias a la eficiencia del sistema.
- **70 Colectores:** Este sistema presenta el ahorro de consumo más alto, alcanzando 32.9 galones diarios y un total mensual de 1008 galones. Este nivel de ahorro de consumo podría no ser justificable si las necesidades de agua caliente no son extremadamente altas.

El ahorro de consumo de gas en el sistema de 50 colectores está bien equilibrado. Aunque es mayor que el de los 30 colectores, permite obtener ahorros significativos sin llegar al gasto excesivo del sistema de 70 colectores.

2. Ahorros económicos

En soles:

- **30 colectores:** El ahorro mensual promedio es de aproximadamente S/ 930, siendo la alternativa menos eficiente en términos de rentabilidad.
- **50 colectores:** Este sistema eleva el ahorro mensual a S/ 1,540, lo que representa un incremento del 65 % en comparación con el sistema de 30 colectores.

- **70 colectores:** Se alcanza un ahorro promedio de S/ 2,200, un 43 % más que el sistema de 50 colectores. Sin embargo, el mayor consumo de gas asociado podría no justificar el costo adicional en aplicaciones que no requieren alta demanda térmica.

En dólares:

- **30 colectores:** Genera un ahorro mensual de USD 249, siendo el valor más bajo entre las configuraciones analizadas.
- **50 colectores:** El ahorro asciende a USD 411, evidenciando una mejora significativa frente al sistema de menor capacidad.
- **70 colectores:** Logra un ahorro mensual de USD 590. No obstante, el incremento en costos operativos podría superar los beneficios en contextos con menor exigencia energética.

El sistema de 50 colectores destaca como la opción más eficiente económicamente, logrando ahorros significativos sin incurrir en los costos excesivos del sistema de 70 colectores.

3. Análisis costo-beneficio

El análisis costo-beneficio se centra en evaluar la relación entre la inversión inicial, el consumo de gas y los ahorros mensuales. Aunque no se disponen datos explícitos de inversión inicial, se puede inferir que:

- El sistema de 30 colectores tiene la inversión inicial más baja, pero su ahorro limitado y menor temperatura final podrían no justificar la elección en escenarios de demanda media o alta.
- El sistema de 50 colectores representa un equilibrio ideal, maximizando ahorros con una inversión razonable.
- El sistema de 70 colectores solo sería adecuado en contextos de altísima demanda o aplicaciones industriales, donde los ahorros adicionales compensen los costos iniciales y de mantenimiento.

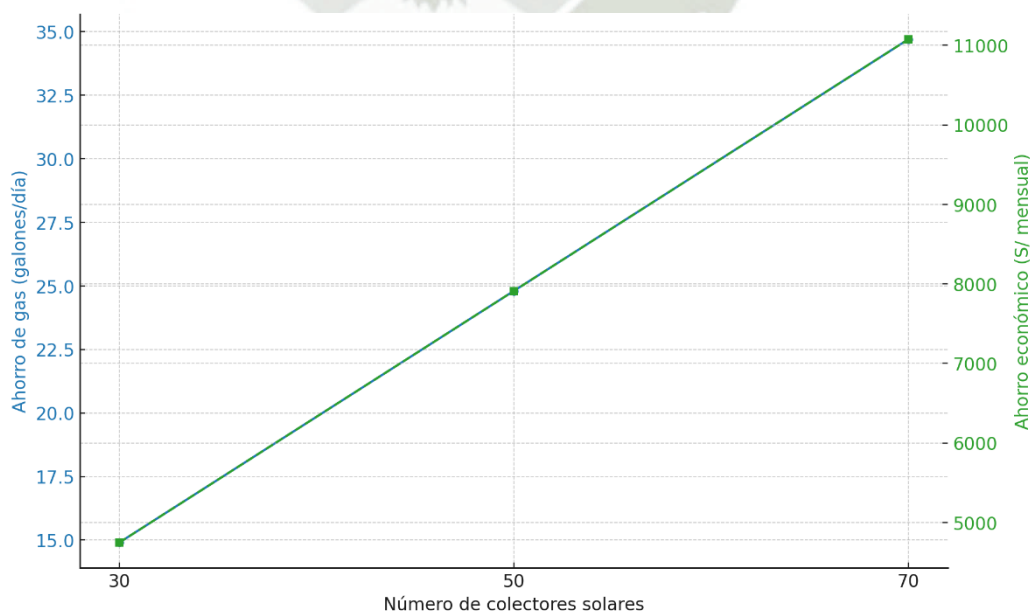
A continuación, se realiza una comparación visual de las temperaturas finales obtenidas por cada sistema, considerando su aplicación en diferentes escenarios.

La Figura 12 muestra la relación entre el número de colectores solares instalados, el ahorro diario en el consumo de GLP y el ahorro económico mensual obtenido.

- Con 30 colectores, se registra un ahorro total anual de 5,424.76 galones, lo que equivale a un promedio diario de aproximadamente 14.9 galones/día y un ahorro mensual de S/ 4,746.67 en promedio.
- Con 50 colectores, el ahorro anual es de 9,041.27 galones, lo que representa un promedio de 24.8 galones/día y un ahorro mensual promedio de S/ 7,911.12.
- Con 70 colectores, se alcanza el mayor rendimiento, con 12,657.78 galones/año, equivalente a 34.7 galones/día, y un ahorro mensual promedio de S/ 11,075.56.

Figura 12

Ahorro de consumo de gas por día

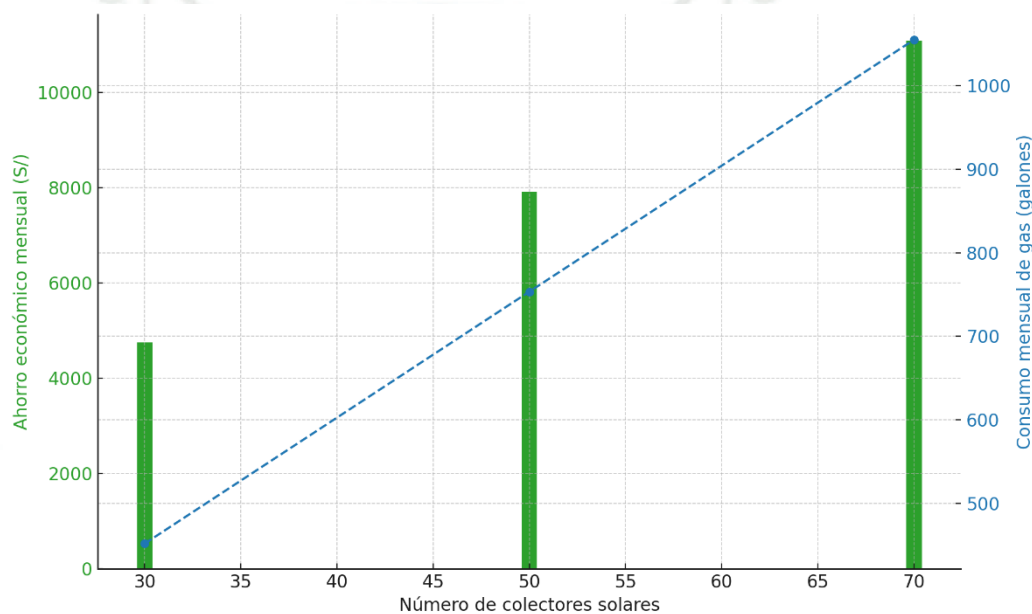


Nota. Elaboración Propia

Estos resultados evidencian que el sistema de 50 colectores ofrece una solución balanceada, con un ahorro considerable sin los costos adicionales del sistema sobredimensionado. Por su parte, el sistema de 70 colectores, si bien maximiza los ahorros, podría no ser económicamente justificable en contextos de baja o mediana demanda térmica. El sistema de 30 colectores resulta adecuado para instalaciones de menor escala, aunque con menor rentabilidad.

Figura 13

Ahorro económico mensual (Soles)



Nota. Elaboración Propia

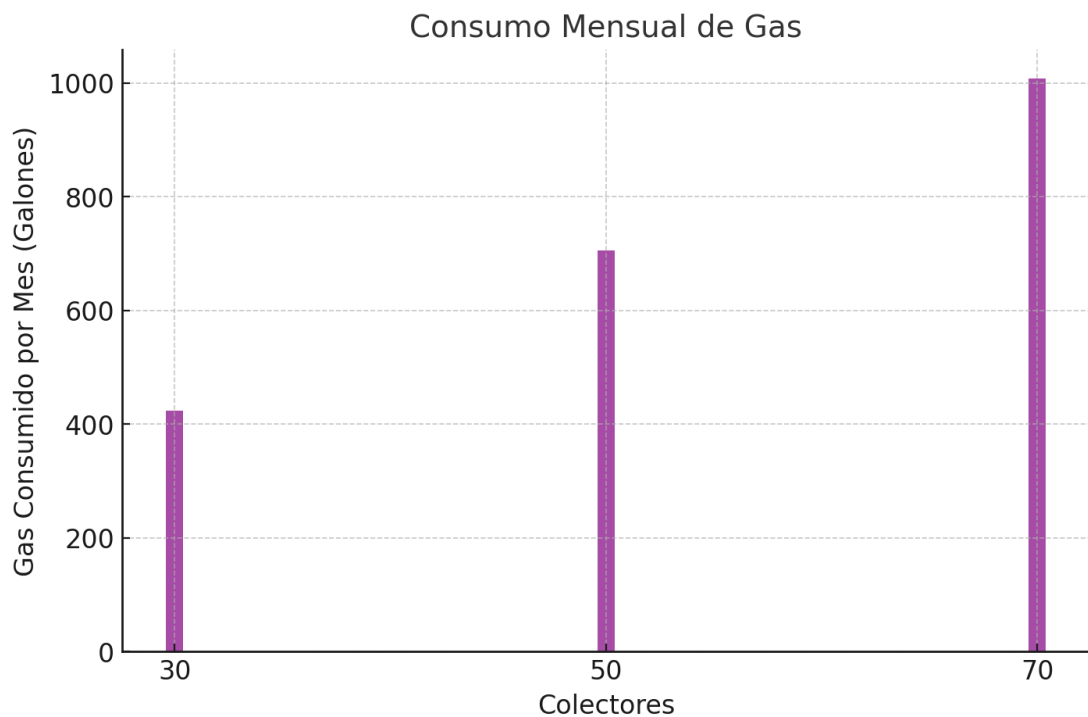
Interpretación:

- **30 colectores:** Generan un ahorro mensual promedio de S/ 4,746.67, con un consumo de gas de 452 galones/mes, adecuado para instalaciones pequeñas con baja demanda.
- **50 colectores:** El ahorro mensual se incrementa a S/ 7,911.12, con un consumo de 753 galones/mes, representando un buen equilibrio entre inversión y retorno.
- **70 colectores:** Logran el mayor ahorro económico mensual, con S/ 11,075.56, pero también el mayor consumo (1,055 galones/mes), lo que puede resultar innecesario para usuarios con demanda térmica moderada.

La Figura 13 muestra el consumo mensual de gas en galones para sistemas con diferentes cantidades de colectores solares. Con 30 colectores, el consumo es de aproximadamente 423 galones al mes, siendo la opción más eficiente en términos de consumo, aunque con ahorros económicos más limitados. Por otro lado, el sistema con 50 colectores incrementa el consumo a 706 galones mensuales, pero este aumento está justificado por mayores ahorros económicos. Finalmente, los 70 colectores presentan el consumo más alto, alrededor de 1,008 galones mensuales, lo cual podría ser innecesario si la demanda de agua caliente no es extremadamente alta.

Figura 14

Consumo mensual de gas



Nota. Elaboración Propia

Interpretación:

- **30 colectores:** Según la Tabla 26, el ahorro anual fue de 5,424.76 galones, lo que equivale a un consumo mensual promedio de 452.06 galones/mes.
- **50 colectores:** De acuerdo con la Tabla 27, se evitó el uso de 9,041.27 galones anuales, es decir, 753.44 galones/mes.

- **70 colectores:** Como se muestra en la Tabla 28, se ahorraron 12,657.78 galones en el año, lo que corresponde a 1,054.82 galones/mes.

La figura evidencia cómo el consumo desplazado de GLP se incrementa con el número de colectores. El sistema de 30 colectores es el que menor volumen desplaza, adecuado para demandas pequeñas. El de 50 colectores representa un equilibrio entre eficiencia y dimensionamiento. En cambio, 70 colectores desplazan el mayor volumen, pero este nivel puede ser excesivo en aplicaciones de baja o media demanda térmica.

4.1. Análisis de costos

4.1.1. Costo de la inversión inicial para el sistema de precalentamiento solar

El costo de la inversión inicial para el sistema de precalentamiento solar incluye el costo de los colectores solares, el sistema de tuberías y accesorios, la instalación y otros componentes necesarios. A continuación, se detalla la cantidad estimada de estos componentes:

Tabla 29

Cantidad de componentes en la inversión inicial

Ítems	Cantidad
Colectores Solares de Tubos de vacío	
- Tubos de vacío	(30 x 50)
Sistema de Circulación	
- Bomba de circulación para el fluido caloportador	1 (sistema centralizado)
- Controlador de bomba	1 (sistema centralizado)
Válvulas y Conexiones	
- Válvula de llenado y vaciado	50
- Válvula mezcladora termostática	50
- Válvulas de retención	50
- Válvula de seguridad (presión y temperatura)	50
Controlador Solar	
- Sensor de temperatura para el colector	50
- Sensor de temperatura para el tanque	50
- Unidad de control	50
Tuberías y Aislamiento	Según diseño y longitud

- Tuberías adecuadas para altas temperaturas	-
- Aislamiento para tuberías	-
Fijaciones y soportes	
- Soportes y herrajes	50 sets
- Sellos y conectores para tuberías	Según diseño
Instrumentación (opcional)	
- Medidor de flujo	1 o 50 (según preferencia)
- Termómetro o display digital	50

Nota. Elaboración Propia

A nivel de costos se presenta en la Tabla 30 la información en dólares:

Tabla 30

Costos en dólares

Ítem	Cantidad	Costo Aproximado (USD) por unidad	Costo Total Aproximado (USD)
Colectores Solares de Tubos de vacío			
- Tubos de vacío	1500	15	22500
- Bomba de circulación	1	150	150
- Controlador de bomba	1	120	120
Válvulas y Conexiones			
- Válvula de llenado y vaciado	50	8	400
- Válvula mezcladora termostática	50	30	1500
- Válvulas de retención	50	12	600
- Válvula de seguridad	50	18	900
Controlador Solar			
- Sensor de temperatura para el colector	50	20	1000
- Sensor de temperatura para el tanque	50	20	1000
- Unidad de control	50	70	3500
Fijaciones y soportes			
- Soportes y herrajes	50	50	2500
- Medidor de flujo	1	80	80
- Termómetro o display digital	50	30	1500

Costo de instalación	50	50	2500
TOTAL			38250

Nota. Elaboración Propia

4.2. Valor Actual Neto (VAN)

Para calcular el Valor Actual Neto (VAN) se requiere lo siguiente:

1. **Inversión inicial:** 38250 USD.
2. **Ahorro anual:** 24,982.47 USD
3. **Tasa de descuento:** 10% o 0.10.
4. **Horizonte temporal:** 10 años.

4.2.1. Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)

El VAN es la suma de los flujos de caja futuros traídos al presente a través de la tasa de descuento. La fórmula general para el VAN es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - \text{Inversión Inicial}$$

Donde:

- F_t = Son los flujos de caja netos (ahorros anuales en este caso) en el año t .
- r = Es la tasa de descuento.
- t = Es el número de años.
- n = Es el número total de años del análisis.

La inversión inicial es negativa porque es un costo inicial.

Según los cálculos realizados y reflejados en la Tabla 31 correspondiente, la suma de los valores presentes de los flujos de ahorro anual alcanza los 153,807.60 USD. Al descontar la inversión inicial de 38,250 USD, se obtiene un Valor Actual Neto (VAN) de 115,557.60 USD, lo cual confirma la alta rentabilidad del proyecto.

Tabla 31

Tabla resumen

Año	Ahorro en Gas (USD)	Valor Presente (USD)	Descripción
1	24,982.47	22,711.34	El sistema comienza a generar beneficios, pero aún no se recupera la inversión inicial.
2	24,982.47	20,646.67	El valor presente acumulado ya supera el 50% de la inversión inicial.
3	24,982.47	18,769.70	Se continúa recuperando la inversión; el retorno se vuelve cada vez más significativo.
4	24,982.47	17,063.36	El valor acumulado aproxima el 100% de la inversión; la recuperación está casi completa.
5	24,982.47	15,512.15	Se alcanza el punto de equilibrio: la inversión ha sido recuperada totalmente.
6	24,982.47	14,101.95	Comienzan a generarse beneficios netos; los flujos superan lo invertido.
7	24,982.47	12,819.05	Se consolida la rentabilidad del sistema con flujos positivos acumulados.
8	24,982.47	11,650.95	El sistema mantiene retornos estables y cada vez más acumulativos.
9	24,982.47	10,586.32	Se evidencia un beneficio sostenido y creciente por el ahorro energético.
10	24,982.47	9,614.84	El proyecto finaliza con un retorno económico muy superior a la inversión inicial.

Nota. Elaboración Propia

- Al cabo de 10 años, el proyecto ha generado un Valor Actual Neto (VAN) de 115,557.60 USD, lo que confirma su alta rentabilidad.
- Los ahorros anuales son constantes (24,982.47 USD), pero su valor presente disminuye cada año debido a la aplicación de la tasa de descuento del 10%.
- La inversión inicial de 38,250 USD se recupera alrededor del quinto año, y a partir del sexto año, todos los ahorros representan ganancias netas para la empresa.

Como parte del análisis de viabilidad del sistema de precalentamiento solar diseñado para reducir el consumo de combustible en una caldera de vapor industrial, se desarrolló una evaluación económica considerando los siguientes parámetros:

- Tasa de descuento: 10%
- Inversión inicial: 38,250 USD
- Ahorro anual constante: 24,982.47 USD
- Horizonte de análisis: 10 años

La Tabla 31 presenta los ahorros anuales, su valor presente y una breve descripción de la evolución del retorno de inversión año a año. Este análisis se complementa con el cálculo del VAN y la Tasa Interna de Retorno (TIR), que validan la factibilidad y rentabilidad del proyecto.

Tabla 32*Evaluación económica del sistema solar: VAN y TIR a 10 años*

Tasa de descuento	0.1
Inversión inicial	38250
Ahorro anual	24,982.47

FLUJOS (Años 1 a 10)		Flujos Netos (para TIR)		
Año	Ahorro en Gas (USD)	Valor Presente (USD)	Flujos Netos (para TIR)	Flujo acumulado descontado
1	24982.47012	22711.34	-38250	-15538.66
2	24982.47012	20646.67	24982.47012	7172.68
3	24982.47012	18769.7	24982.47012	29884.02
4	24982.47012	17063.36	24982.47012	46947.38
5	24982.47012	15512.15	24982.47012	62459.53
6	24982.47012	14101.95	24982.47012	76561.48
7	24982.47012	12819.96	24982.47012	89381.44
8	24982.47012	11654.51	24982.47012	114363.9101
9	24982.47012	10595.01	24982.47012	124958.9201
10	24982.47012	9631.82	24982.47012	134590.7401

Suma de Valor Presente	153506.47
Valor Actual Neto (VAN)	115256.47
Tasa Interna de Retorno (TIR)	65%

Nota. Elaboración Propia

La Tabla 32 muestra el flujo de caja proyectado para analizar la viabilidad económica del sistema de precalentamiento solar instalado en una caldera de vapor industrial, evaluado en un horizonte de 10 años. Para este análisis, se ha considerado una tasa de descuento del 10 %, una inversión inicial de USD 38,250, y un ahorro anual constante de USD 24,982.47 originado por la reducción del consumo de gas.

En cada año, el ahorro proyectado se ha descontado aplicando el factor correspondiente según la tasa establecida. Por ejemplo, en el primer año, el ahorro de USD 24,982.47 tiene un valor presente de USD 22,711.34, mientras que en el año diez, este mismo ahorro tiene un valor presente de USD 9,631.82. Esta disminución progresiva refleja el efecto del valor del dinero en el tiempo. Durante los primeros cinco años, el sistema genera retornos anuales crecientes, los cuales permiten recuperar progresivamente la inversión inicial. Esta recuperación se completa entre el año cinco y seis, momento a partir del cual los flujos de caja descontados comienzan a representar beneficios económicos netos para la organización.

Al finalizar el décimo año, se obtiene un Valor Actual Neto (VAN) de USD 115,256.47, el cual representa la diferencia entre la suma de los valores presentes de los flujos (USD 153,506.47) y la inversión inicial. Este resultado confirma que el proyecto es altamente rentable. Además, se calcula una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 65 %, considerablemente superior a la tasa de descuento utilizada, lo cual refuerza la viabilidad financiera del sistema de precalentamiento solar implementado.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo al objetivo específico a, y en consideración de los resultados obtenidos en el punto 3.9.1 y la figura 11, se concluye que la demanda energética mensual de la caldera de 60 BHP fue determinada con precisión, con un promedio de 16,581.48 kW/mes y estableciendo que los colectores consiguieron una energía promedio de 12.67 kW/m²/día.
2. En relación al objetivo específico b, y con base en los resultados de diseño desarrollados en los puntos 3.4 y 4, se concluye que el sistema de precalentamiento de agua mediante 50 colectores solares fue adecuadamente dimensionado para responder a la variabilidad estacional de irradiación. Con 50 colectores solares, el sistema mantuvo su desempeño frente a la variabilidad mensual: las temperaturas finales del agua alcanzaron valores entre 65.97 °C en julio y 102.67 °C en noviembre, partiendo de temperaturas iniciales que oscilaron entre 7.80 °C y 14.5 °C según el mes de análisis.
3. Respecto al objetivo específico c, y considerando el análisis del capítulo 3.6 al 3.9, se concluye que el software System Advisor Model (SAM) permitió validar y simular con precisión el comportamiento del sistema solar, mostrando una alta correlación con los cálculos teóricos. Esta herramienta resultó eficaz para optimizar el diseño térmico y energético del sistema, consolidando su viabilidad técnica.
4. En cumplimiento del objetivo específico d, con base en el análisis del punto 4.2.1 y la Tabla 32, se concluye que el sistema es económicamente viable, al alcanzar un Valor Actual Neto (VAN) de USD 115,256.47, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 65 %, y un periodo de recuperación de inversión de aproximadamente 5 años. El ahorro económico anual por reducción en el consumo de gas se estimó en USD 24,982.47, lo cual respalda la factibilidad financiera del proyecto.
5. Finalmente, de acuerdo con el objetivo específico e, y conforme a los resultados integrados de eficiencia energética y reducción de consumo de GLP en los capítulos 3 y 4, se concluye que el impacto energético del sistema de precalentamiento solar es altamente positivo. La disminución del uso de combustibles fósiles implica una mejora directa en el desempeño ambiental del

proceso, contribuyendo a la sostenibilidad industrial y al cumplimiento de políticas energéticas responsables.



RECOMENDACIONES

1. Basado en la Conclusión 1

Se recomienda implementar el sistema de precalentamiento solar en entornos industriales con alta demanda de vapor, priorizando regiones con elevada irradiación solar como Arequipa, ya que se ha demostrado que este tipo de sistema puede cubrir hasta el 91 % de la demanda mensual y reducir significativamente el consumo de combustible.

2. Basado en la Conclusión 2

Se recomienda realizar mantenimientos periódicos y ajustes estacionales al sistema de colectores solares para asegurar que las temperaturas alcanzadas se mantengan en rangos óptimos, especialmente en meses con menor radiación solar, garantizando así la estabilidad térmica del proceso.

3. Basado en la Conclusión 3

Se recomienda utilizar el software SAM u otras herramientas de simulación energética como parte del proceso de diseño y evaluación de sistemas térmicos solares, debido a su alta precisión, capacidad de modelado y utilidad para tomar decisiones técnicas fundamentadas.

4. Basado en la Conclusión 4

Se recomienda que las empresas interesadas en adoptar este sistema realicen un análisis financiero detallado previo a la inversión, considerando no solo el VAN y la TIR, sino también la posibilidad de acceso a incentivos o financiamiento verde, con el fin de maximizar la rentabilidad del proyecto.

5. Basado en la Conclusión 5

Se recomienda promover la adopción de sistemas solares térmicos en industrias que busquen mejorar su desempeño energético y reducir su huella de carbono, como parte de sus políticas de sostenibilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, S. (2024). Las calderas de gas protagonizan la nueva batalla entre el sector eléctrico y gasista en España. El Periódico de La Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-calderas-de-gas-protagonizan-la-nueva-batalla-entre-el-sector-electrico-y-gasista-en-espana/>
- Aguaisa Nogales, D. E. and V. B. J. J. (2024). Análisis de la eficiencia energética del sistema de calentamiento de agua, mediante integración solar en la Quesera Artesanal “San Sebastián.”
- Arcos Adame, J. G. (2018). Dimensionamiento de sistemas de precalentamiento de agua para calderas utilizando energía solar y almacenamiento térmico.
- Arias, R., & Limaico, M. (2008). Diseño y simulación de un sistema de calefacción por piso radiante. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/849/1/CD-1258.pdf>
- ASALE, & E, R. A. (2014). Diccionario de la lengua española | Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/>
- Cambroner Espinoza, A. (2019). Diseño de un Sistema de Energía Solar para Agua de Reposición de Calderas.
- Carvajal Paucar, A. P., & Mejía Almeida, R. D. (2021). Diseño y análisis de implementación de un sistema de calentamiento de agua por tubos de vacío con energía solar térmica para la piscina de 360 m³ del Club Castillo de Amaguaña. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19960>
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Heat and mass transfer: Fundamentals & applications (4th, Ed.). McGraw-Hill.
- Centy Zapana, E. (2019). Módulo de Entrenamiento de un Sistema de Control en Cascada aplicado a una Caldera Industrial con Pre-Calentamiento Usando Energía Solar. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9326>
- Chucuya Huallpachoque, R. C. (2017). Ahorro de energía primaria mediante precalentamiento del aire y agua en una unidad de generación de vapor. INGnosis Revista de Investigación Científica, 3(2), 365–375. <https://doi.org/10.18050/ingnosis.v3i2.2049>
- Criollo Cumbe, A. V., & Pogo Guamán, Á. M. (2011). Diseño de un sistema dual de calentamiento de agua, por medio de energía solar y GLP y diseño estructural

de la cubierta para la piscina de la Hostería «Los Juanes» en el cantón Santa Isabel. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1338>

Díaz Silva, S. E. (2019). Propuesta técnica económica para el mejoramiento de eficiencia energética en sistema de generación de agua caliente sanitaria en un edificio de la Armada de Chile en Valparaíso. <https://repositorio.usm.cl/entities/tesis/2b492641-94e0-41c4-a580-607ba435743c>

Gutierrez, A. (2018). El gran potencial de la energía solar. El Peruano. <https://elperuano.pe/noticia/70012-el-gran-potencial-de-la-energia-solar>

Industria, R. T. para la. (2024). Descarbonizar las calderas de vapor: Beneficios y Aplicaciones. Tecnología Para La Industria. <https://tecnologiaparalaindustria.com/descarbonizar-las-calderas-de-vapor-industriales-beneficios-y-aplicaciones/>

Ingelcia (2024). Las 3 Alternativas Más Ecológicas a las Calderas Industriales - Ingelcia.com. <https://www.ingelcia.com/articulo-general/las-3-alternativas-mas-ecologicas-a-las-calderas-industriales/>

Jurado Mallo, I. (2018). Climatización por energía solar térmica de una nave industrial.

Jurado Sosa, I. R., & Lazo Barbieri, G. J. (2018). Estudio de pre factibilidad para la instalación de una planta productora de calentadores solares para su uso en calderos industriales. <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/8093>

López, F. A., y García, C. N. M. (2012). Análisis dimensional discriminado en mecánica de fluidos y transferencia de calor. Reverté.

Marazzi, S., & Ruiz, J. (2018). Diseño y dimensionamiento de un sistema termosolar de precalentamiento de agua para caldera, caso de estudio: Industria farmacéutica. https://www.bc-una.info/cgi-bin/wxis.cgi?IsisScript=plus_pls.xis&mf=011580&base=repo

Martínez Herranz, M. (2011). Sistema de recuperación de condensados de una línea de decapado de bobinas laminadas en caliente. <https://riunet.upv.es/handle/10251/11306>

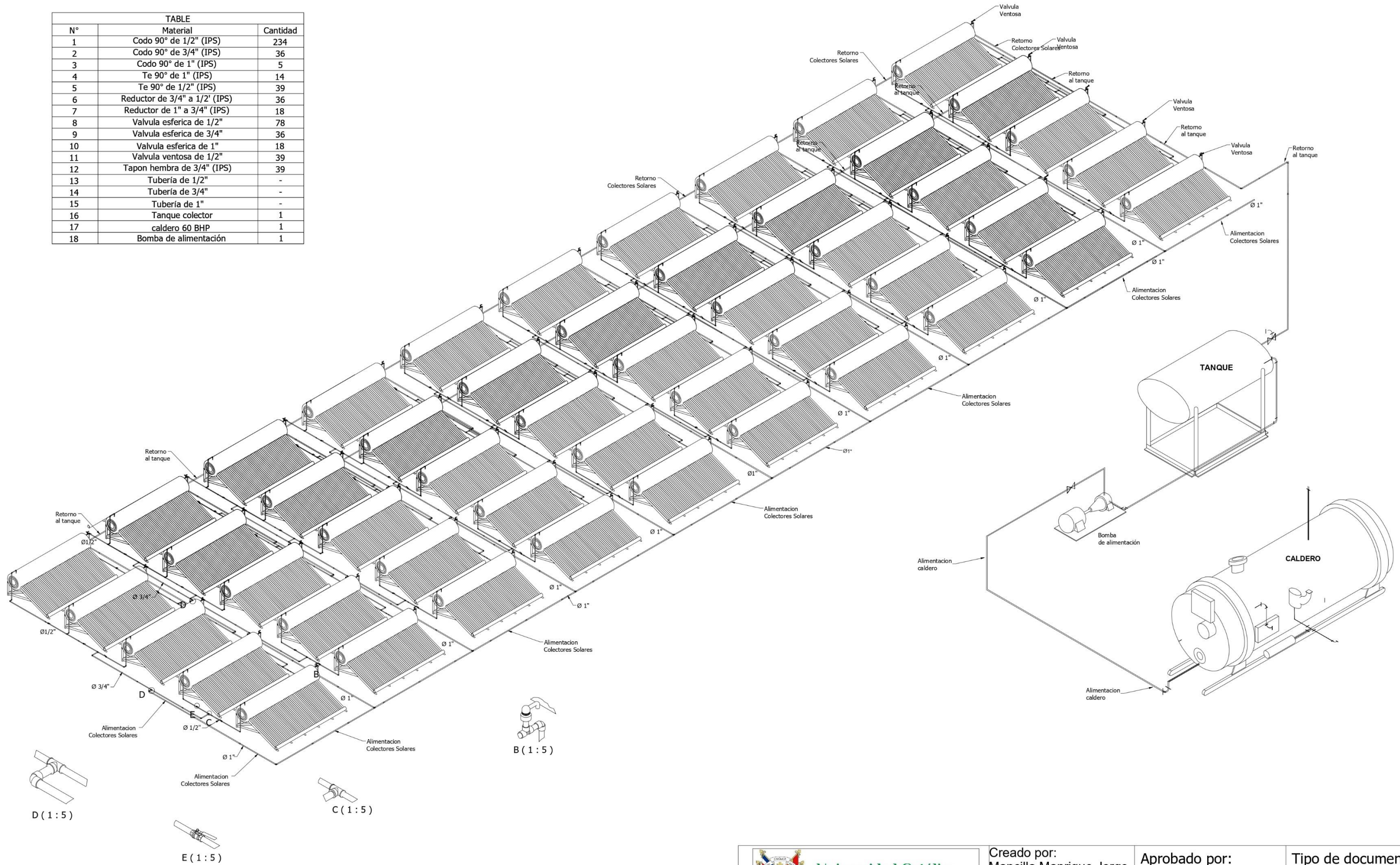
- Nations, U. (2024). Energías renovables: Energías para un futuro más seguro. United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
- Novillo, C. (2019). Qué es condensación del agua y ejemplos. Ecologiaverde.Com. <https://www.ecologiaverde.com/que-es-condensacion-del-agua-y-ejemplos-1999.html>
- Peña Sánchez, A. C. (2017). Diseño del plan de mantenimiento preventivo y correctivo para la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Muzo (Boyacá). <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/16026>
- PERÚ, B. C. D. E. R. D. E. L. (2023). Estimaciones del balance oferta – demanda en el sector eléctrico 2023-2026. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Reporte-Inflacion/2023/diciembre/reporte-de-inflacion-diciembre-2023-recuadro-4.pdf>
- Ruffier, J. (1998). La eficiencia productiva: Cómo funcionan las fábricas (P. edición, Ed.). CINTERFOR. https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/file_publicacion/ruffier.pdf
- Saenz Tintayo, P. (2016). Mejoramiento del sistema de condensado para reducir pérdidas de vapor en el área de lavandería del Hospital Nacional Essalud Huancayo. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/1576>
- Torres Gamarra, L. A. (2020). Optimización de las redes de distribución de vapor y condensado de un Hospital Público de Lambayeque. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8260>
- Valdivia Guzmán, C. A. (2020). Diseño de un sistema de distribución de vapor para el fraguado de prefabricados de concreto en la empresa Concretos Moldeados S.A.C., Arequipa—Perú 2019. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/10215>
- Vásquez, S. (2003). Diseño del calentamiento solar de agua. Organización Panamericana de la Salud.
- Wright, J. (2008). Cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica. Uniciencia, 22(1), 55–69. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5381375.pdf>



ANEXOS

Anexo 1: Planos

TABLE		
N°	Material	Cantidad
1	Codo 90° de 1/2" (IPS)	234
2	Codo 90° de 3/4" (IPS)	36
3	Codo 90° de 1" (IPS)	5
4	Te 90° de 1" (IPS)	14
5	Te 90° de 1/2" (IPS)	39
6	Reductor de 3/4" a 1/2" (IPS)	36
7	Reductor de 1" a 3/4" (IPS)	18
8	Valvula esferica de 1/2"	78
9	Valvula esferica de 3/4"	36
10	Valvula esferica de 1"	18
11	Valvula ventosa de 1/2"	39
12	Tapon hembra de 3/4" (IPS)	39
13	Tubería de 1/2"	-
14	Tubería de 3/4"	-
15	Tubería de 1"	-
16	Tanque colector	1
17	caldero 60 BHP	1
18	Bomba de alimentación	1



CARACTERISTICAS COLECTOR SOLAR		
LARGO	ANCHO	ALTURA
4 m	1.18 m	0.06 m
AREA / COLECTOR		4.18 m ²
NUMERO DE COLECTORES		50
ORIENTACION DE COLECTOR		NORTE


Universidad Católica de Santa María
 Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica

Creado por: Mancilla Manrique Jorge Manuel		Aprobado por:		Tipo de documento: Plano	
Titulo: Plano de colectores solares			Numero de Referencia: TESIS - 0001		Rev.
Diseño de mejoramiento de la eficiencia de la caldera industrial con precalentamiento solar en una empresa			Escala: 1/100	Form: A0	Fecha: 19-05-2025
HOJA:					



Nota. Tomado de (Colmaquinas, 2025)

DATOS TÉCNICOS

HORIZONTALES 150 P.S.I.G. PRESIÓN DE DISEÑO:

DATOS TÉCNICOS									
	BHP	30	40	50	60	70	80	100	150
CAPACIDAD DE LA CALDERA	Btu/h	1,004,250	1,339,000	1,673,750	2,008,500	2,343,250	2,678,000	3,347,500	5,021,250
CAPACIDAD TÉRMICA DE LA CALDERA	lb/h	1,035	1,380	1,725	2,070	2,415	2,760	3,450	5,175
PRODUCCIÓN DE VAPOR	ft ²	150	200	250	300	350	400	500	750
SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO	Btu/ft ² /h	183,861	189,243	177,415	168,545	178,503	169,280	149,696	174,349
LIBERACIÓN TÉRMICA	lb	5,362	6,011	7,259	7,623	9,718	10,787	13,065	13,728
PESO NETO CALDERA	gal	275	365	456	553	581	676	838	1,030
CONTENIDO DE AGUA A NIVEL NORMAL	lb	2,293	3,043	3,802	4,610	4,844	5,636	6,986	8,591
PESO DEL AGUA A NIVEL NORMAL	(138000 Btu/gal) gph	8.6	11.4	14.3	17.1	20.0	22.8	28.5	42.8
CONSUMO DE ACEITE No. 2	(150000 Btu/gal) gph	7.9	10.5	13.1	15.8	18.4	21.0	26.3	39.4
CONSUMO DE GAS NATURAL	(35315 Btu/m ³) m ³ /h	33.5	44.6	55.8	66.9	78.1	89.2	111.5	167.3
DIMENSIONES (PULGADAS)									
DIAMETRO INTERIOR CALDERA		42	48	48	48	54	54	60	66
LONGITUD TOTAL DE LA CALDERA	A	128 3/4	132 1/4	151 1/4	168 3/4	165 1/4	181 1/4	188 1/2	197 3/4
ALTURA TOTAL DE LA CALDERA	B	68 3/4	74 3/4	74 3/4	74 3/4	82	82	91	100 1/16
LONGITUD TOTAL DEL CUERPO	C	103 3/4	107 1/4	126 1/4	143 3/4	132 1/4	148 1/4	153	162
ALTURA DE LA BASE	D	6	6	6	6	6	6	6	6
ANCHO DE LA BASE	E	42	48	48	48	54	54	60	66
LONGITUD DE LA BASE	F	111	111 1/2	130 1/2	148	140	156	164	166 1/2
DE LA BASE INFERIOR CUERPO	G	18 1/4	18 1/4	18 1/4	18 1/4	19 1/2	19 1/2	22 1/2	22 1/2
DEL FRENTE CALDERA A FRENTE BASE	H	25	25	25	25	33	33	35 1/2	35 1/2
ESPACIO DE REMOCIÓN DE TUBOS	I	93	92 1/2	111 1/2	129	115 1/2	131 1/2	136	141
LOCALIZACIÓN SALIDA DE HUMO	J	4	6	6	6	7	7	7	9
LOCALIZACIÓN SALIDA DE VAPOR	K	30 3/8	32 1/2	37	38 3/4	37 1/4	43 1/2	43 3/4	42 3/4
LOCALIZACIÓN ALIMENTACIÓN DE AGUA	L	51 1/4	52 3/4	62 1/4	71	64 1/4	72 1/4	74 1/2	79 1/4
DIAMETRO CONEXIÓN PARA (PULGADAS)									
SALIDA DE VAPOR	1	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	2	3	3	3
VALVULA DE SEGURIDAD	3a	1/2	3/4	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4
	3b								1 1/4
ALIMENTACIÓN DE AGUA	4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4
PURGA CONTINUA	5	1	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2
PURGA DE FONDO	6	1	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2
DIAMETRO INTERIOR DE HUMO	7	8	12	12	12	14	14	14	18

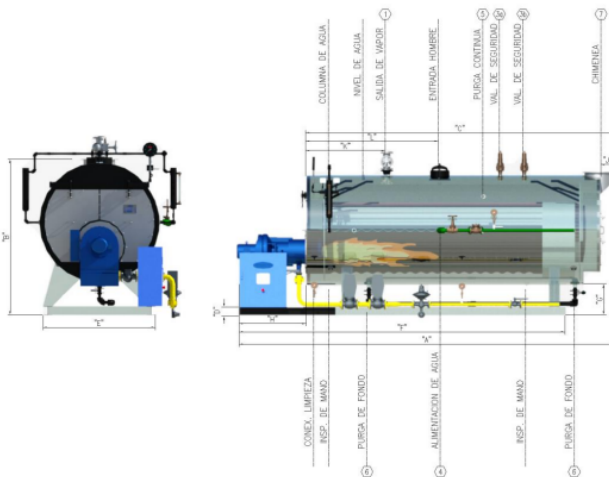
HORIZONTALES 150 P.S.I.G. PRESIÓN DE DISEÑO:

DATOS TÉCNICOS									
	BHP	200	250	300	350	400	500	600	700
CAPACIDAD DE LA CALDERA	Btu/h	6,695,000	8,368,750	10,042,500	11,716,250	13,390,000	16,737,500	20,085,000	23,432,500
CAPACIDAD TÉRMICA DE LA CALDERA	lb/h	6,900	8,625	10,350	12,075	13,800	17,250	20,700	24,150
PRODUCCIÓN DE VAPOR	ft ²	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,500	3,000	3,500
SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO	Btu/ft ² /h	137,279	174,170	163,970	186,099	129,048	179,807	146,173	166,451
LIBERACIÓN TÉRMICA	lb	17,803	24,853	25,675	29,883	35,133	40,306	47,246	58,559
PESO NETO CALDERA	gal	1,609	1,673	1,925	2,228	2,696	3,060	3,610	3,786
CONTENIDO DE AGUA A NIVEL NORMAL	lb	13,425	13,948	16,057	18,575	22,486	25,511	30,113	31,564
PESO DEL AGUA A NIVEL NORMAL	(85) %	7,876,471	9,845,588	11,814,706	13,783,824	15,752,941	19,691,176	23,629,412	27,567,647
EFICIENCIA DE LA CALDERA	(138000 Btu/gal) gph	57.1	71.3	85.6	99.9	114.2	142.7	171.2	199.8
CONSUMO DE ACEITE No. 2	(150000 Btu/gal) gph	52.5	65.6	78.8	91.9	105.0	131.3	157.5	183.8
CONSUMO DE GAS NATURAL	(1000 Btu/ft ³) ft ³ /h	7,876.5	9,845.6	11,814.7	13,783.8	15,752.9	19,691.2	23,629.4	27,567.6
CONSUMO DE GAS NATURAL	(35315 Btu/m ³) m ³ /h	223.0	278.8	334.6	390.3	446.1	557.6	669.1	780.6
DIMENSIONES (PULGADAS)									
DIAMETRO INTERIOR CALDERA		72	78	78	84	84	90	96	102
LONGITUD TOTAL DE LA CALDERA	A	234 3/4	237 1/8	269 3/4	259 1/2	301 1/4	316 7/16	334 3/4	341
ALTURA TOTAL DE LA CALDERA	B	105 11/16	109	112 4/7	115 1/2	115 1/2	121	129 3/8	133 9/16
LONGITUD TOTAL DEL CUERPO	C	199	199.625	224	214	255.75	270 15/16	289	291 1/2
ALTURA DE LA BASE	D	6	6	6	8	8	8	8	12
ANCHO DE LA BASE	E	72	78	78	84	84	90	96	102
LONGITUD DE LA BASE	F	203 1/2	202.625	235	234	260	265 1/2	285	285
DE LA BASE INFERIOR CUERPO	G	22 1/2	22.5	22.625	23	23	22 1/2	23	23 1/16
DEL FRENTE CALDERA A FRENTE BASE	H	35 1/2	37 1/2	45 1/2	45 1/2	45 1/2	45 1/2	45 1/2	49 1/2
ESPACIO DE REMOCIÓN DE TUBOS	I	178	174.625	197	201	229	241 15/16	254	255
LOCALIZACIÓN SALIDA DE HUMO	J	9	11	11	12	12	13	15	17
LOCALIZACIÓN SALIDA DE VAPOR	K	42 3/4	52.625	57.75	62	69.75	72 3/16	71 3/4	67 1/2
LOCALIZACIÓN ALIMENTACIÓN DE AGUA	L	93 3/4	94 5/8	96 1/4	109 1/2	123 1/2	132 15/16	128 3/4	105
DIAMETRO CONEXIÓN PARA (PULGADAS)									
SALIDA DE VAPOR	1	4	4	4	6	6	6	6	6
VALVULA DE SEGURIDAD	3a	1 1/4	1.5	1.5	2	2	2	2	2
	3b	1 1/4	1.5	1.5	2	2	2	2	2
ALIMENTACIÓN DE AGUA	4	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
PURGA CONTINUA	5	2	2	2	2	2	2	2	2
PURGA DE FONDO	6	2	2	2	2	2	2	2	2
DIAMETRO INTERIOR DE HUMO	7	18	22	22	24	24	26	30	34

Nota. Tomado de (Colmaquinas, 2025)

HORIZONTALES 150 P.S.I.G. PRESIÓN DE DISEÑO:

DATOS TÉCNICOS				
	BHP	800	900	1000
CAPACIDAD DE LA CALDERA				
CAPACIDAD TERMICA DE LA CALDERA	Btu/h	26,780,000	30,127,500	33,475,000
PRODUCCION DE VAPOR	lb/h	27,600	31,050	34,500
SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO	ft ²	4,000	4,500	5,000
LIBERACION TERMICA	Btu/ft ² /h	124,422	126,306	122,407
PESO NETO CALDERA	lb	62,029	67,997	76,912
CONTENIDO DE AGUA A NIVEL NORMAL	gal	5,893	6,419	6,296
PESO DEL AGUA A NIVEL NORMAL	lb	49,155	53,542	52,490
EFICIENCIA DE LA CALDERA (85)	%	31,505,882	35,444,118	39,382,353
CONSUMO DE ACEITE No. 2 (138000) Btu/gal	gph	228.3	256.8	285.4
CONSUMO DE ACEITE No. 6 (150000) Btu/gal	gph	210.0	236.3	262.5
CONSUMO DE GAS NATURAL (1000) Btu/ft ³	ft ³ /h	31,505.9	35,444.1	39,382.4
CONSUMO DE GAS NATURAL (35315) Btu/m ³	m ³ /h	892.1	1,003.7	1,115.2
DIMENSIONES (PULGADAS)				
DIAMETRO INTERIOR CALDERA		114	114	120
LONGITUD TOTAL DE LA CALDERA	A	365 3/4	392 3/4	395 1/2
ALTURA TOTAL DE LA CALDERA	B	142 3/4	142 3/4	144 7/16
LONGITUD TOTAL DEL CUERPO	C	301 1/2	347	345
ALTURA DE LA BASE	D	8	8	12
ANCHO DE LA BASE	E	114	114	120
LONGITUD DE LA BASE	F	312	330	332 1/2
DE LA BASE INFERIOR CUERPO	G	18	18	15 15/16
DEL FRENTE CALDERA A FRENTE BASE	H	47 1/2	47 1/2	50 1/2
ESPACIO DE REMOCION DE TUBOS	I	276	301	301 1/2
LOCALIZACION SALIDA DE HUMO	J	18 1/2	19 1/2	20 1/2
LOCALIZACION SALIDA DE VAPOR	K	87 3/4	105 3/4	114 1/2
LOCALIZACION ALIMENTACION DE AGUA	L	131 3/4	147 3/4	164 1/2
DIAMETRO CONEXION PARA (PULGADAS)				
SALIDA DE VAPOR	1	8	8	8
	3a	2	2	2
	3b	2	2	2
	3c	2	2	2
	3d		2	2
ALIMENTACION DE AGUA	4	2 1/2	2 1/2	2 1/2
PURGA CONTINUA	5	2	2	2
PURGA DE FONDO	6	2	2	2
DIAMETRO INTERIOR DE HUMO	7	37	39	41



www.colmaquinas.com

Nota. Tomado de (Colmaquinas, 2025)

INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO

El acceso a la parte interna de las calderas es fácil debido a que están diseñadas con puertas frontales escualizables las cuales puede manipular un solo operario sin necesidad de desmontar el quemador o sus controles.

Disminuye considerablemente la mano de obra en el mantenimiento, así como el tiempo de parada de la caldera. Los demás componentes son externos, a la vista, de fácil acceso y mantenimiento.

QUEMADOR

Las Calderas están equipadas con quemador automático de fabricación Norte Americana, diseñado para uso en calderas Piro-tubulares, cumpliendo con el reglamento vigente de emisión de gases a la atmosfera, en las siguientes disponibilidades de acuerdo con los requerimientos del cliente.

- Combustible: Aceite liviano N. 2, aceite pesado N. 6, gas natural, propano o para cualquier combinación entre ellos.
- Atomización mecánica, con aire o vapor según solicitud del cliente.
- Total modulación de combustible o funcionamiento ON- OFF en calderas menores de 80 BHP.
- Equipado con moto-ventilador integral para funcionamiento a cualquier elevación sobre el nivel de mar, según se requieran.
- Cubierta abisagrada para fácil acceso.

Anexo 3

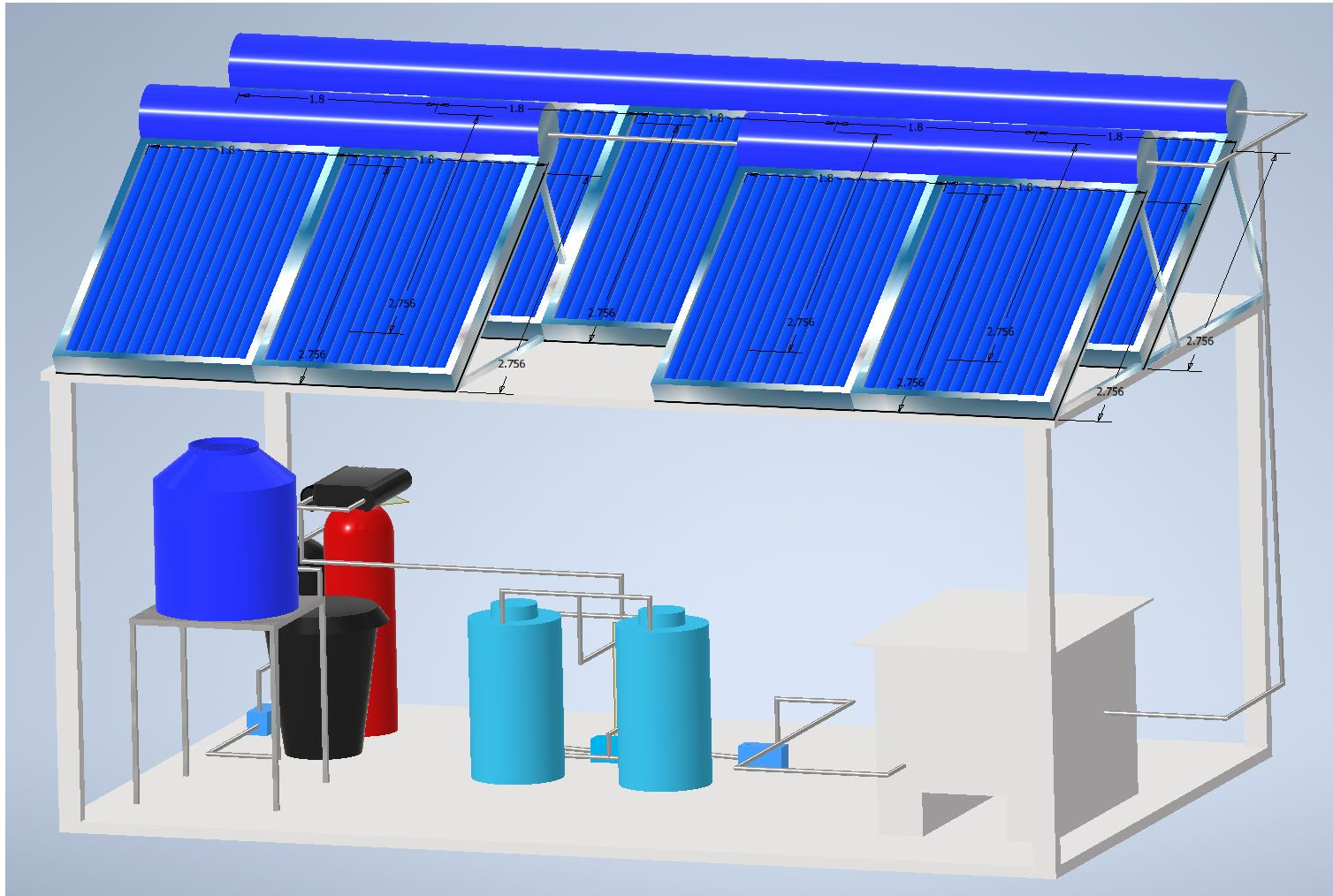
Imagen referencial de la caldera



Nota. Tomado de (Microm Inc., 2025)

Anexo 4

Esquema representativo del sistema



APENDICES

Apéndice 1 Cálculos de radiación de superficie inclinada por horas

Cálculo de la radiación global instantánea sobre una superficie horizontal

Con frecuencia, es esencial tener conocimiento de los valores instantáneos de G , I_h y D . Para estimar estos valores, se deben emplear las ecuaciones que se describirán a continuación:

$$\begin{aligned}\bar{D} &= r_d \bar{H}_d \\ \bar{G} &= r_h \bar{H} \\ \bar{I}_h &= \bar{G} - \bar{D}\end{aligned}$$

$$r_d = \frac{\pi \cos \omega - \cos \omega_s}{T \sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (62)$$

Dónde:

T = Longitud del día = 24 horas

Ws=Ángulo de horas de asoleamiento; ángulo horario de puesta del sol durante el periodo considerado.

w= Ángulo horario (cada hora es = 15°)

Al sustituir los valores en las ecuaciones previamente mencionadas, se genera una tabla que muestra los resultados para cada mes y a distintas horas del día (Tabla 33).

Factor rd

Tabla 33

Factor rd

Hora	Min	w	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	0	90	0.012	0.008	0.001	-0.007	-0.016	-0.020	-0.018	-0.010	-0.002	0.005	0.011	0.014
	15	86.25	0.020	0.015	0.010	0.002	-0.006	-0.010	-0.008	-0.001	0.007	0.013	0.018	0.021
	30	82.5	0.027	0.023	0.018	0.011	0.005	0.001	0.003	0.009	0.016	0.021	0.026	0.028
	45	78.75	0.034	0.031	0.026	0.020	0.015	0.011	0.013	0.018	0.024	0.029	0.033	0.035
7	0	75	0.041	0.038	0.035	0.030	0.024	0.022	0.023	0.028	0.033	0.037	0.040	0.042
	15	71.25	0.048	0.046	0.043	0.038	0.034	0.032	0.033	0.037	0.041	0.045	0.047	0.049
	30	67.5	0.055	0.053	0.051	0.047	0.044	0.042	0.043	0.046	0.049	0.052	0.054	0.055
	45	63.75	0.061	0.060	0.058	0.056	0.053	0.051	0.052	0.055	0.057	0.060	0.061	0.062
8	0	60	0.068	0.067	0.066	0.064	0.062	0.060	0.061	0.063	0.065	0.067	0.068	0.068
	15	56.25	0.074	0.074	0.073	0.072	0.070	0.069	0.070	0.071	0.072	0.073	0.074	0.074
	30	52.5	0.080	0.080	0.080	0.079	0.079	0.078	0.078	0.079	0.080	0.080	0.080	0.080
	45	48.75	0.085	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.085
9	0	45	0.091	0.092	0.092	0.093	0.094	0.094	0.094	0.093	0.093	0.092	0.091	0.090
	15	41.25	0.096	0.097	0.098	0.100	0.101	0.101	0.101	0.100	0.099	0.097	0.096	0.095
	30	37.5	0.100	0.102	0.104	0.105	0.107	0.108	0.107	0.106	0.104	0.102	0.101	0.100
	45	33.75	0.104	0.106	0.109	0.111	0.113	0.114	0.113	0.112	0.109	0.107	0.105	0.104
10	0	30	0.108	0.110	0.113	0.116	0.118	0.120	0.119	0.117	0.114	0.111	0.109	0.108
	15	26.25	0.112	0.114	0.117	0.120	0.123	0.125	0.124	0.121	0.118	0.115	0.112	0.111
	30	22.5	0.115	0.117	0.120	0.124	0.127	0.129	0.128	0.125	0.122	0.118	0.115	0.114
	45	18.75	0.117	0.120	0.123	0.127	0.131	0.133	0.132	0.129	0.125	0.121	0.118	0.117
11	0	15	0.119	0.122	0.126	0.130	0.134	0.136	0.135	0.132	0.127	0.123	0.120	0.119
	15	11.25	0.121	0.124	0.128	0.132	0.136	0.138	0.137	0.134	0.129	0.125	0.122	0.120
	30	7.5	0.122	0.125	0.129	0.134	0.138	0.140	0.139	0.135	0.131	0.127	0.123	0.121
	45	3.75	0.123	0.126	0.130	0.135	0.139	0.141	0.140	0.136	0.132	0.127	0.124	0.122
12	0	0	0.123	0.126	0.130	0.135	0.139	0.141	0.140	0.137	0.132	0.128	0.124	0.122

	15	-3.75	0.123	0.126	0.130	0.135	0.139	0.141	0.140	0.136	0.132	0.127	0.124	0.122
	30	-7.5	0.122	0.125	0.129	0.134	0.138	0.140	0.139	0.135	0.131	0.127	0.123	0.121
	45	-11.25	0.121	0.124	0.128	0.132	0.136	0.138	0.137	0.134	0.129	0.125	0.122	0.120
	0	-15	0.119	0.122	0.126	0.130	0.134	0.136	0.135	0.132	0.127	0.123	0.120	0.119
13	15	-18.75	0.117	0.120	0.123	0.127	0.131	0.133	0.132	0.129	0.125	0.121	0.118	0.117
	30	-22.5	0.115	0.117	0.120	0.124	0.127	0.129	0.128	0.125	0.122	0.118	0.115	0.114
	45	-26.25	0.112	0.114	0.117	0.120	0.123	0.125	0.124	0.121	0.118	0.115	0.112	0.111
	0	-30	0.108	0.110	0.113	0.116	0.118	0.120	0.119	0.117	0.114	0.111	0.109	0.108
14	15	-33.75	0.104	0.106	0.109	0.111	0.113	0.114	0.113	0.112	0.109	0.107	0.105	0.104
	30	-37.5	0.100	0.102	0.104	0.105	0.107	0.108	0.107	0.106	0.104	0.102	0.101	0.100
	45	-41.25	0.096	0.097	0.098	0.100	0.101	0.101	0.101	0.100	0.099	0.097	0.096	0.095
	0	-45	0.091	0.092	0.092	0.093	0.094	0.094	0.094	0.093	0.093	0.092	0.091	0.090
15	15	-48.75	0.085	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.085
	30	-52.5	0.080	0.080	0.080	0.079	0.079	0.078	0.078	0.079	0.080	0.080	0.080	0.080
	45	-56.25	0.074	0.074	0.073	0.072	0.070	0.069	0.070	0.071	0.072	0.073	0.074	0.074
	0	-60	0.068	0.067	0.066	0.064	0.062	0.060	0.061	0.063	0.065	0.067	0.068	0.068
16	15	-63.75	0.061	0.060	0.058	0.056	0.053	0.051	0.052	0.055	0.057	0.060	0.061	0.062
	30	-67.5	0.055	0.053	0.051	0.047	0.044	0.042	0.043	0.046	0.049	0.052	0.054	0.055
	45	-71.25	0.048	0.046	0.043	0.038	0.034	0.032	0.033	0.037	0.041	0.045	0.047	0.049
	0	-75	0.041	0.038	0.035	0.030	0.024	0.022	0.023	0.028	0.033	0.037	0.040	0.042
17	15	-78.75	0.034	0.031	0.026	0.020	0.015	0.011	0.013	0.018	0.024	0.029	0.033	0.035
	30	-82.5	0.027	0.023	0.018	0.011	0.005	0.001	0.003	0.009	0.016	0.021	0.026	0.028
	45	-86.25	0.020	0.015	0.010	0.002	-0.006	-0.010	-0.008	-0.001	0.007	0.013	0.018	0.021

Similarmente, el factor de conversión rG puede calcularse mediante la relación:

$$r_G = \frac{\pi}{T} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (63)$$

De donde los parámetros a y b están dados por las expresiones

$$\begin{aligned} a &= 0,409 + 0,5016 \sin (\omega_s - 1,047) \\ b &= 0,6609 + 0,4767 \sin (\omega_s - 1,047) \end{aligned} \quad (64)$$

Para poder obtener el factor de conversión rG es necesario calcular los parámetros a y b:

Tabla 34

Factor de conversión rG

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a	0.707	0.687	0.664	0.637	0.615	0.603	0.609	0.628	0.653	0.679	0.701	0.712
b	0.944	0.925	0.903	0.878	0.856	0.846	0.851	0.869	0.893	0.918	0.938	0.949

Reemplazando los datos en anteriores se obtiene la Tabla 35 para cada mes y a diferentes horas:

Factor rg

Tabla 35

Factor rg

Hora	Min	w	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	0	90	0.009	0.005	0.001	-0.005	-0.010	-0.012	-0.011	-0.007	-0.001	0.004	0.008	0.010
	15	86.25	0.015	0.011	0.007	0.001	-0.004	-0.006	-0.005	-0.001	0.005	0.010	0.014	0.016
	30	82.5	0.022	0.019	0.014	0.008	0.003	0.001	0.002	0.006	0.012	0.017	0.021	0.023
	45	78.75	0.030	0.027	0.022	0.017	0.011	0.009	0.010	0.015	0.020	0.025	0.029	0.031
7	0	75	0.039	0.036	0.031	0.026	0.020	0.018	0.019	0.024	0.029	0.034	0.038	0.040
	15	71.25	0.048	0.045	0.041	0.035	0.030	0.028	0.029	0.033	0.039	0.044	0.047	0.049
	30	67.5	0.058	0.055	0.051	0.046	0.041	0.038	0.040	0.044	0.049	0.054	0.058	0.059
	45	63.75	0.069	0.066	0.062	0.057	0.052	0.050	0.051	0.055	0.060	0.065	0.068	0.070
8	0	60	0.080	0.077	0.073	0.069	0.064	0.062	0.063	0.067	0.072	0.076	0.079	0.081
	15	56.25	0.091	0.088	0.085	0.081	0.077	0.075	0.076	0.079	0.083	0.087	0.090	0.092
	30	52.5	0.102	0.100	0.097	0.093	0.089	0.087	0.088	0.091	0.095	0.099	0.102	0.103
	45	48.75	0.114	0.111	0.109	0.105	0.102	0.100	0.101	0.104	0.107	0.110	0.113	0.114
9	0	45	0.125	0.123	0.120	0.117	0.114	0.113	0.114	0.116	0.119	0.122	0.124	0.125
	15	41.25	0.135	0.134	0.132	0.129	0.127	0.125	0.126	0.128	0.131	0.133	0.135	0.136
	30	37.5	0.146	0.145	0.143	0.141	0.139	0.137	0.138	0.140	0.142	0.144	0.146	0.146
	45	33.75	0.156	0.155	0.153	0.152	0.150	0.149	0.149	0.151	0.153	0.154	0.156	0.156
10	0	30	0.165	0.164	0.163	0.162	0.160	0.160	0.160	0.161	0.163	0.164	0.165	0.165
	15	26.25	0.174	0.173	0.172	0.171	0.170	0.170	0.170	0.171	0.172	0.173	0.173	0.174
	30	22.5	0.181	0.181	0.180	0.180	0.179	0.178	0.179	0.179	0.180	0.181	0.181	0.181
	45	18.75	0.188	0.188	0.187	0.187	0.187	0.186	0.186	0.187	0.187	0.188	0.188	0.188
11	0	15	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193
	15	11.25	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198
	30	7.5	0.201	0.201	0.201	0.202	0.202	0.202	0.202	0.202	0.201	0.201	0.201	0.201
	45	3.75	0.203	0.203	0.203	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203
12	0	0	0.203	0.204	0.204	0.204	0.205	0.205	0.205	0.204	0.204	0.204	0.203	0.203

	15	-3.75	0.203	0.203	0.203	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203
	30	-7.5	0.201	0.201	0.201	0.202	0.202	0.202	0.202	0.202	0.201	0.201	0.201	0.201
	45	-11.25	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198
	0	-15	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193
13	15	-18.75	0.188	0.188	0.187	0.187	0.187	0.186	0.186	0.187	0.187	0.188	0.188	0.188
	30	-22.5	0.181	0.181	0.180	0.180	0.179	0.178	0.179	0.179	0.180	0.181	0.181	0.181
	45	-26.25	0.174	0.173	0.172	0.171	0.170	0.170	0.170	0.171	0.172	0.173	0.173	0.174
	0	-30	0.165	0.164	0.163	0.162	0.160	0.160	0.160	0.161	0.163	0.164	0.165	0.165
14	15	-33.75	0.156	0.155	0.153	0.152	0.150	0.149	0.149	0.151	0.153	0.154	0.156	0.156
	30	-37.5	0.146	0.145	0.143	0.141	0.139	0.137	0.138	0.140	0.142	0.144	0.146	0.146
	45	-41.25	0.135	0.134	0.132	0.129	0.127	0.125	0.126	0.128	0.131	0.133	0.135	0.136
	0	-45	0.125	0.123	0.120	0.117	0.114	0.113	0.114	0.116	0.119	0.122	0.124	0.125
15	15	-48.75	0.114	0.111	0.109	0.105	0.102	0.100	0.101	0.104	0.107	0.110	0.113	0.114
	30	-52.5	0.102	0.100	0.097	0.093	0.089	0.087	0.088	0.091	0.095	0.099	0.102	0.103
	45	-56.25	0.091	0.088	0.085	0.081	0.077	0.075	0.076	0.079	0.083	0.087	0.090	0.092
	0	-60	0.080	0.077	0.073	0.069	0.064	0.062	0.063	0.067	0.072	0.076	0.079	0.081
16	15	-63.75	0.069	0.066	0.062	0.057	0.052	0.050	0.051	0.055	0.060	0.065	0.068	0.070
	30	-67.5	0.058	0.055	0.051	0.046	0.041	0.038	0.040	0.044	0.049	0.054	0.058	0.059
	45	-71.25	0.048	0.045	0.041	0.035	0.030	0.028	0.029	0.033	0.039	0.044	0.047	0.049
	0	-75	0.039	0.036	0.031	0.026	0.020	0.018	0.019	0.024	0.029	0.034	0.038	0.040
17	15	-78.75	0.030	0.027	0.022	0.017	0.011	0.009	0.010	0.015	0.020	0.025	0.029	0.031
	30	-82.5	0.022	0.019	0.014	0.008	0.003	0.001	0.002	0.006	0.012	0.017	0.021	0.023
	45	-86.25	0.015	0.011	0.007	0.001	-0.004	-0.006	-0.005	-0.001	0.005	0.010	0.014	0.016

Ahora para poder conocer la radiación global, difusa, directa instantánea sobre una superficie horizontal con las fórmulas anteriormente expuestas:

Radiación Global Instantánea sobre una superficie horizontal (G - W/m²)

Tabla 36

Radiación global Instantánea sobre una superficie horizontal (G - W/m²)

Hora	Min	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	0	56.92	31.56	4.42	-25.19	-49.18	-56.77	-57.27	-37.13	-7.82	25.44	55.78	71.09
	15	98.30	69.53	42.50	7.57	-18.93	-29.71	-26.59	-3.37	29.19	68.00	101.29	117.82
	30	145.31	112.99	86.55	45.95	16.95	2.61	9.92	36.36	72.20	116.88	153.11	170.80
	45	197.64	161.65	136.24	89.67	58.20	39.95	52.01	81.79	120.90	171.74	210.89	229.69
7	0	254.88	215.13	191.18	138.36	104.45	81.99	99.30	132.51	174.88	232.15	274.18	294.03
	15	316.54	272.94	250.86	191.56	155.27	128.31	151.32	188.04	233.65	297.57	342.41	363.26
	30	382.03	334.54	314.69	248.72	210.11	178.41	207.54	247.82	296.61	367.35	414.94	436.73
	45	450.69	399.28	382.00	309.23	268.37	231.73	267.32	311.18	363.10	440.78	491.05	513.71
8	0	521.80	466.47	452.04	372.40	329.37	287.65	329.95	377.41	432.38	517.05	569.91	593.38
	15	594.57	535.36	524.02	437.48	392.37	345.48	394.69	445.71	503.65	595.31	650.66	674.88
	30	668.19	605.15	597.08	503.70	456.60	404.49	460.72	515.25	576.04	674.64	732.37	757.29
	45	741.78	675.02	670.35	570.23	521.24	463.94	527.21	585.17	648.69	754.11	814.10	839.64
9	0	814.48	744.11	742.90	636.22	585.45	523.05	593.29	654.56	720.68	832.73	894.85	920.97
	15	885.40	811.58	813.84	700.83	648.40	581.02	658.08	722.54	791.10	909.53	973.65	1000.28
	30	953.66	876.58	882.24	763.21	709.25	637.09	720.73	788.20	859.05	983.55	1049.52	1076.60
	45	1018.41	938.28	947.24	822.54	767.17	690.50	780.39	850.67	923.63	1053.83	1121.50	1148.99
10	0	1078.83	995.88	1007.97	878.03	821.39	740.50	836.24	909.12	983.99	1119.47	1188.67	1216.52
	15	1134.15	1048.65	1063.64	928.93	871.16	786.42	887.51	962.74	1039.34	1179.60	1250.18	1278.33
	30	1183.64	1095.89	1113.50	974.55	915.78	827.61	933.50	1010.82	1088.92	1233.45	1305.23	1333.64
	45	1226.68	1136.98	1156.89	1014.27	954.66	863.50	973.56	1052.68	1132.08	1280.29	1353.09	1381.72
11	0	1262.69	1171.37	1193.22	1047.54	987.24	893.57	1007.14	1087.75	1168.22	1319.50	1393.15	1421.95
	15	1291.20	1198.60	1222.00	1073.91	1013.06	917.42	1033.76	1115.55	1196.86	1350.56	1424.87	1453.80

	30	1311.84	1218.32	1242.84	1093.01	1031.77	934.70	1053.04	1135.69	1217.60	1373.05	1447.83	1476.85
	45	1324.34	1230.26	1255.46	1104.58	1043.10	945.17	1064.72	1147.89	1230.16	1386.66	1461.73	1490.81
12	0	1328.52	1234.26	1259.69	1108.45	1046.90	948.67	1068.64	1151.97	1234.36	1391.22	1466.38	1495.48
	15	1324.34	1230.26	1255.46	1104.58	1043.10	945.17	1064.72	1147.89	1230.16	1386.66	1461.73	1490.81
	30	1311.84	1218.32	1242.84	1093.01	1031.77	934.70	1053.04	1135.69	1217.60	1373.05	1447.83	1476.85
	45	1291.20	1198.60	1222.00	1073.91	1013.06	917.42	1033.76	1115.55	1196.86	1350.56	1424.87	1453.80
	0	1262.69	1171.37	1193.22	1047.54	987.24	893.57	1007.14	1087.75	1168.22	1319.50	1393.15	1421.95
13	15	1226.68	1136.98	1156.89	1014.27	954.66	863.50	973.56	1052.68	1132.08	1280.29	1353.09	1381.72
	30	1183.64	1095.89	1113.50	974.55	915.78	827.61	933.50	1010.82	1088.92	1233.45	1305.23	1333.64
	45	1134.15	1048.65	1063.64	928.93	871.16	786.42	887.51	962.74	1039.34	1179.60	1250.18	1278.33
	0	1078.83	995.88	1007.97	878.03	821.39	740.50	836.24	909.12	983.99	1119.47	1188.67	1216.52
14	15	1018.41	938.28	947.24	822.54	767.17	690.50	780.39	850.67	923.63	1053.83	1121.50	1148.99
	30	953.66	876.58	882.24	763.21	709.25	637.09	720.73	788.20	859.05	983.55	1049.52	1076.60
	45	885.40	811.58	813.84	700.83	648.40	581.02	658.08	722.54	791.10	909.53	973.65	1000.28
	0	814.48	744.11	742.90	636.22	585.45	523.05	593.29	654.56	720.68	832.73	894.85	920.97
15	15	741.78	675.02	670.35	570.23	521.24	463.94	527.21	585.17	648.69	754.11	814.10	839.64
	30	668.19	605.15	597.08	503.70	456.60	404.49	460.72	515.25	576.04	674.64	732.37	757.29
	45	594.57	535.36	524.02	437.48	392.37	345.48	394.69	445.71	503.65	595.31	650.66	674.88
	0	521.80	466.47	452.04	372.40	329.37	287.65	329.95	377.41	432.38	517.05	569.91	593.38
16	15	450.69	399.28	382.00	309.23	268.37	231.73	267.32	311.18	363.10	440.78	491.05	513.71
	30	382.03	334.54	314.69	248.72	210.11	178.41	207.54	247.82	296.61	367.35	414.94	436.73
	45	316.54	272.94	250.86	191.56	155.27	128.31	151.32	188.04	233.65	297.57	342.41	363.26
	0	254.88	215.13	191.18	138.36	104.45	81.99	99.30	132.51	174.88	232.15	274.18	294.03
17	15	197.64	161.65	136.24	89.67	58.20	39.95	52.01	81.79	120.90	171.74	210.89	229.69
	30	145.31	112.99	86.55	45.95	16.95	2.61	9.92	36.36	72.20	116.88	153.11	170.80
	45	98.30	69.53	42.50	7.57	-18.93	-29.71	-26.59	-3.37	29.19	68.00	101.29	117.82

Radiación Difusa Instantánea sobre una superficie horizontal (D - W/m²)

Tabla 37

Radiación difusa Instantánea sobre una superficie horizontal (D - W/m²)

Hora	Min	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	0	29.73	17.36	2.35	-13.40	-26.07	-29.97	-29.39	-19.08	-3.97	12.73	27.61	34.68
	15	47.21	35.16	20.74	3.69	-9.20	-14.37	-12.50	-1.59	13.61	31.27	46.10	52.87
	30	64.62	52.87	39.06	20.71	7.60	1.16	4.31	15.83	31.12	49.73	64.51	70.98
	45	81.88	70.44	57.22	37.58	24.25	16.56	20.97	33.09	48.48	68.03	82.76	88.93
7	0	98.92	87.77	75.14	54.23	40.69	31.76	37.42	50.13	65.61	86.09	100.78	106.66
	15	115.66	104.81	92.76	70.60	56.85	46.70	53.58	66.87	82.45	103.84	118.49	124.07
	30	132.03	121.47	109.98	86.60	72.64	61.30	69.39	83.25	98.92	121.20	135.80	141.10
	45	147.96	137.69	126.75	102.17	88.02	75.52	84.78	99.19	114.94	138.09	152.65	157.67
8	0	163.39	153.39	142.98	117.25	102.90	89.29	99.67	114.62	130.46	154.45	168.97	173.72
	15	178.25	168.50	158.61	131.78	117.24	102.54	114.02	129.48	145.40	170.20	184.68	189.18
	30	192.47	182.97	173.57	145.67	130.96	115.23	127.75	143.70	159.70	185.28	199.72	203.97
	45	205.99	196.74	187.80	158.89	144.01	127.29	140.80	157.22	173.30	199.61	214.02	218.03
9	0	218.76	209.73	201.23	171.37	156.33	138.68	153.13	169.99	186.14	213.15	227.53	231.32
	15	230.72	221.90	213.81	183.06	167.86	149.35	164.68	181.95	198.17	225.83	240.17	243.76
	30	241.82	233.19	225.49	193.91	178.57	159.25	175.39	193.06	209.33	237.60	251.91	255.30
	45	252.01	243.56	236.21	203.87	188.40	168.34	185.23	203.25	219.58	248.40	262.69	265.90
10	0	261.24	252.96	245.93	212.90	197.32	176.59	194.15	212.49	228.87	258.19	272.46	275.51
	15	269.49	261.35	254.61	220.96	205.28	183.94	202.11	220.73	237.16	266.94	281.18	284.09
	30	276.71	268.70	262.20	228.01	212.24	190.39	209.08	227.96	244.42	274.59	288.82	291.60
	45	282.87	274.97	268.69	234.04	218.19	195.88	215.03	234.12	250.62	281.12	295.33	298.01
11	0	287.95	280.14	274.03	239.00	223.09	200.41	219.94	239.20	255.73	286.51	300.70	303.29
	15	291.92	284.18	278.21	242.88	226.92	203.96	223.77	243.17	259.72	290.72	304.90	307.42
	30	294.77	287.08	281.21	245.67	229.67	206.50	226.52	246.02	262.59	293.74	307.92	310.39
	45	296.49	288.83	283.01	247.35	231.32	208.03	228.18	247.74	264.31	295.56	309.73	312.17

12	0	297.06	289.41	283.61	247.91	231.88	208.54	228.73	248.31	264.89	296.17	310.34	312.76
	15	296.49	288.83	283.01	247.35	231.32	208.03	228.18	247.74	264.31	295.56	309.73	312.17
	30	294.77	287.08	281.21	245.67	229.67	206.50	226.52	246.02	262.59	293.74	307.92	310.39
	45	291.92	284.18	278.21	242.88	226.92	203.96	223.77	243.17	259.72	290.72	304.90	307.42
13	0	287.95	280.14	274.03	239.00	223.09	200.41	219.94	239.20	255.73	286.51	300.70	303.29
	15	282.87	274.97	268.69	234.04	218.19	195.88	215.03	234.12	250.62	281.12	295.33	298.01
	30	276.71	268.70	262.20	228.01	212.24	190.39	209.08	227.96	244.42	274.59	288.82	291.60
	45	269.49	261.35	254.61	220.96	205.28	183.94	202.11	220.73	237.16	266.94	281.18	284.09
14	0	261.24	252.96	245.93	212.90	197.32	176.59	194.15	212.49	228.87	258.19	272.46	275.51
	15	252.01	243.56	236.21	203.87	188.40	168.34	185.23	203.25	219.58	248.40	262.69	265.90
	30	241.82	233.19	225.49	193.91	178.57	159.25	175.39	193.06	209.33	237.60	251.91	255.30
	45	230.72	221.90	213.81	183.06	167.86	149.35	164.68	181.95	198.17	225.83	240.17	243.76
15	0	218.76	209.73	201.23	171.37	156.33	138.68	153.13	169.99	186.14	213.15	227.53	231.32
	15	205.99	196.74	187.80	158.89	144.01	127.29	140.80	157.22	173.30	199.61	214.02	218.03
	30	192.47	182.97	173.57	145.67	130.96	115.23	127.75	143.70	159.70	185.28	199.72	203.97
	45	178.25	168.50	158.61	131.78	117.24	102.54	114.02	129.48	145.40	170.20	184.68	189.18
16	0	163.39	153.39	142.98	117.25	102.90	89.29	99.67	114.62	130.46	154.45	168.97	173.72
	15	147.96	137.69	126.75	102.17	88.02	75.52	84.78	99.19	114.94	138.09	152.65	157.67
	30	132.03	121.47	109.98	86.60	72.64	61.30	69.39	83.25	98.92	121.20	135.80	141.10
	45	115.66	104.81	92.76	70.60	56.85	46.70	53.58	66.87	82.45	103.84	118.49	124.07
17	0	98.92	87.77	75.14	54.23	40.69	31.76	37.42	50.13	65.61	86.09	100.78	106.66
	15	81.88	70.44	57.22	37.58	24.25	16.56	20.97	33.09	48.48	68.03	82.76	88.93
	30	64.62	52.87	39.06	20.71	7.60	1.16	4.31	15.83	31.12	49.73	64.51	70.98
	45	47.21	35.16	20.74	3.69	-9.20	-14.37	-12.50	-1.59	13.61	31.27	46.10	52.87

Radiación Directa Instantánea sobre una superficie horizontal ($I_h - W/m^2$)

Tabla 38

Radiación directa instantánea sobre una superficie horizontal ($I_h - W/m^2$)

Hora	Min	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	0	27.19	14.20	2.07	-11.80	-23.11	-26.80	-27.88	-18.05	-3.85	12.71	28.17	36.41
	15	51.09	34.37	21.76	3.88	-9.73	-15.35	-14.09	-1.78	15.58	36.73	55.20	64.95
	30	80.69	60.11	47.49	25.24	9.35	1.44	5.61	20.54	41.08	67.15	88.60	99.83
	45	115.76	91.21	79.02	52.09	33.94	23.39	31.04	48.70	72.42	103.71	128.13	140.76
7	0	155.97	127.35	116.03	84.13	63.76	50.23	61.88	82.38	109.27	146.06	173.40	187.38
	15	200.88	168.13	158.10	120.96	98.42	81.61	97.74	121.17	151.20	193.73	223.92	239.19
	30	250.00	213.06	204.70	162.12	137.47	117.11	138.15	164.57	197.70	246.15	279.14	295.63
	45	302.73	261.59	255.25	207.05	180.35	156.21	182.54	212.00	248.16	302.68	338.39	356.03
8	0	358.41	313.08	309.06	255.14	226.47	198.36	230.28	262.79	301.93	362.60	400.94	419.66
	15	416.33	366.85	365.41	305.71	275.13	242.94	280.67	316.23	358.25	425.11	465.97	485.71
	30	475.72	422.18	423.51	358.03	325.64	289.27	332.98	371.56	416.34	489.37	532.65	553.32
	45	535.79	478.28	482.55	411.33	377.23	336.65	386.41	427.95	475.39	554.49	600.07	621.61
9	0	595.72	534.38	541.67	464.84	429.13	384.36	440.16	484.57	534.54	619.58	667.33	689.65
	15	654.68	589.68	600.02	517.76	480.54	431.67	493.41	540.58	592.94	683.70	733.48	756.52
	30	711.85	643.39	656.75	569.30	530.68	477.84	545.34	595.14	649.72	745.95	797.61	821.30
	45	766.41	694.72	711.03	618.67	578.77	522.15	595.16	647.42	704.05	805.43	858.81	883.09
10	0	817.59	742.92	762.04	665.13	624.07	563.92	642.09	696.63	755.12	861.27	916.21	941.01
	15	864.66	787.30	809.03	707.97	665.88	602.48	685.40	742.01	802.18	912.67	969.00	994.24
	30	906.93	827.19	851.29	746.53	703.54	637.22	724.41	782.86	844.50	958.86	1016.41	1042.04
	45	943.81	862.00	888.20	780.23	736.47	667.61	758.53	818.56	881.46	999.17	1057.76	1083.71
11	0	974.74	891.23	919.19	808.54	764.15	693.16	787.20	848.56	912.50	1032.99	1092.44	1118.66
	15	999.28	914.42	943.79	831.02	786.14	713.46	809.98	872.38	937.14	1059.84	1119.96	1146.38
	30	1017.07	931.24	961.63	847.34	802.10	728.20	826.52	889.67	955.01	1079.31	1139.91	1166.47
	45	1027.85	941.44	972.45	857.23	811.78	737.14	836.55	900.15	965.85	1091.10	1152.00	1178.64

12	0	1031.46	944.85	976.07	860.54	815.02	740.13	839.90	903.66	969.48	1095.06	1156.04	1182.72
	15	1027.85	941.44	972.45	857.23	811.78	737.14	836.55	900.15	965.85	1091.10	1152.00	1178.64
	30	1017.07	931.24	961.63	847.34	802.10	728.20	826.52	889.67	955.01	1079.31	1139.91	1166.47
	45	999.28	914.42	943.79	831.02	786.14	713.46	809.98	872.38	937.14	1059.84	1119.96	1146.38
13	0	974.74	891.23	919.19	808.54	764.15	693.16	787.20	848.56	912.50	1032.99	1092.44	1118.66
	15	943.81	862.00	888.20	780.23	736.47	667.61	758.53	818.56	881.46	999.17	1057.76	1083.71
	30	906.93	827.19	851.29	746.53	703.54	637.22	724.41	782.86	844.50	958.86	1016.41	1042.04
	45	864.66	787.30	809.03	707.97	665.88	602.48	685.40	742.01	802.18	912.67	969.00	994.24
14	0	817.59	742.92	762.04	665.13	624.07	563.92	642.09	696.63	755.12	861.27	916.21	941.01
	15	766.41	694.72	711.03	618.67	578.77	522.15	595.16	647.42	704.05	805.43	858.81	883.09
	30	711.85	643.39	656.75	569.30	530.68	477.84	545.34	595.14	649.72	745.95	797.61	821.30
	45	654.68	589.68	600.02	517.76	480.54	431.67	493.41	540.58	592.94	683.70	733.48	756.52
15	0	595.72	534.38	541.67	464.84	429.13	384.36	440.16	484.57	534.54	619.58	667.33	689.65
	15	535.79	478.28	482.55	411.33	377.23	336.65	386.41	427.95	475.39	554.49	600.07	621.61
	30	475.72	422.18	423.51	358.03	325.64	289.27	332.98	371.56	416.34	489.37	532.65	553.32
	45	416.33	366.85	365.41	305.71	275.13	242.94	280.67	316.23	358.25	425.11	465.97	485.71
16	0	358.41	313.08	309.06	255.14	226.47	198.36	230.28	262.79	301.93	362.60	400.94	419.66
	15	302.73	261.59	255.25	207.05	180.35	156.21	182.54	212.00	248.16	302.68	338.39	356.03
	30	250.00	213.06	204.70	162.12	137.47	117.11	138.15	164.57	197.70	246.15	279.14	295.63
	45	200.88	168.13	158.10	120.96	98.42	81.61	97.74	121.17	151.20	193.73	223.92	239.19
17	0	155.97	127.35	116.03	84.13	63.76	50.23	61.88	82.38	109.27	146.06	173.40	187.38
	15	115.76	91.21	79.02	52.09	33.94	23.39	31.04	48.70	72.42	103.71	128.13	140.76
	30	80.69	60.11	47.49	25.24	9.35	1.44	5.61	20.54	41.08	67.15	88.60	99.83
	45	51.09	34.37	21.76	3.88	-9.73	-15.35	-14.09	-1.78	15.58	36.73	55.20	64.95

Energía recibida sobre una superficie inclinada a partir de mediciones en el plano horizontal.

Para estimar la energía recibida sobre una superficie inclinada a partir de mediciones en el plano horizontal, hace falta separar las componentes directa y difusa y luego:

Multiplicar la radiación directa por un factor de inclinación.

Tener en cuenta que la superficie no “ve” sino una parte de la bóveda celeste, pero ella pueda captar una parte de la radiación difusa reflejada por el suelo.

Luego los valores se reemplazan en la siguiente ecuación:

$$G_t = R_b I_h + R_{dc} D + R_{ds} G \quad (65)$$

La radiación directa instantánea

La radiación directa sobre un plano inclinado es, en un instante dado:

$$I_t = I \cos \theta = I_h \cos \theta / \cos h \quad (66)$$

Donde θ es el ángulo entre la normal al plano y la dirección del sol.

El cociente:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos h} \quad (67)$$

Dónde:

θ : Ángulo entre un rayo incidente directamente del sol y la normal a un plano cualquiera.

h: Ángulo de la altura solar

Se denomina factor de inclinación. Los ángulos h y θ pueden ser calculados a partir de las siguientes fórmulas:

Para una superficie orientada al norte $\cos \theta$ es el siguiente:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin (\phi - s) + \cos \delta \cos (\phi - s) \cos \omega \quad (68)$$

Dónde:

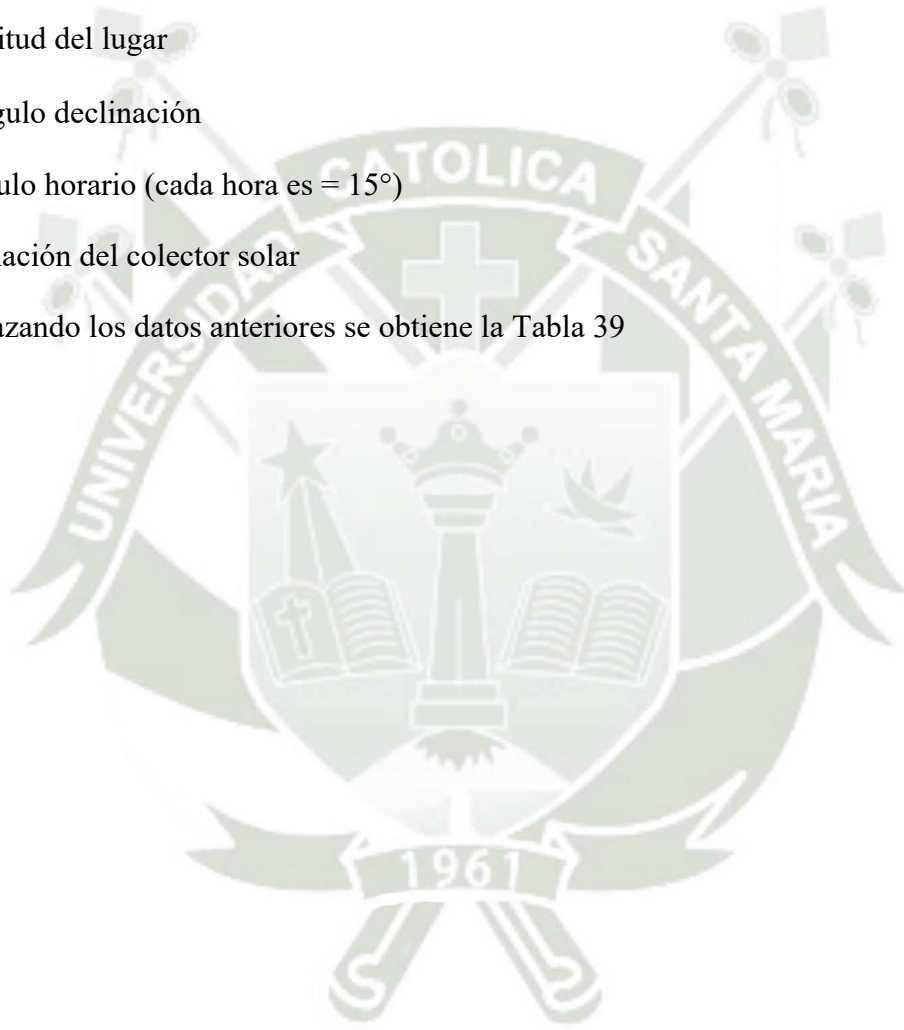
ϕ = Latitud del lugar

δ = Ángulo declinación

w = Ángulo horario (cada hora es = 15°)

s = inclinación del colector solar

Reemplazando los datos anteriores se obtiene la Tabla 39



cos (0)

Tabla 39

Cos (0)

Hora	Min	w	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	0	-90	0.238	0.143	0.019	-0.116	-0.219	-0.265	-0.243	-0.159	-0.034	0.102	0.212	0.263
	15	-86.25	0.283	0.190	0.067	-0.068	-0.173	-0.220	-0.198	-0.112	0.014	0.149	0.258	0.308
	30	-82.5	0.328	0.237	0.115	-0.021	-0.128	-0.176	-0.153	-0.065	0.062	0.197	0.304	0.352
	45	-78.75	0.373	0.284	0.163	0.026	-0.083	-0.132	-0.109	-0.019	0.110	0.244	0.349	0.396
7	0	-75	0.417	0.330	0.210	0.073	-0.038	-0.089	-0.065	0.027	0.157	0.291	0.394	0.439
	15	-71.25	0.460	0.375	0.256	0.118	0.006	-0.046	-0.022	0.072	0.203	0.336	0.438	0.482
	30	-67.5	0.503	0.419	0.302	0.163	0.048	-0.005	0.020	0.116	0.248	0.381	0.481	0.523
	45	-63.75	0.544	0.462	0.346	0.206	0.090	0.036	0.061	0.159	0.292	0.425	0.522	0.564
8	0	-60	0.584	0.504	0.388	0.248	0.130	0.075	0.101	0.200	0.335	0.467	0.563	0.603
	15	-56.25	0.622	0.544	0.429	0.288	0.169	0.113	0.139	0.240	0.376	0.507	0.602	0.641
	30	-52.5	0.659	0.582	0.468	0.327	0.206	0.149	0.176	0.278	0.415	0.546	0.639	0.677
	45	-48.75	0.694	0.619	0.506	0.364	0.242	0.183	0.211	0.314	0.452	0.583	0.674	0.711
9	0	-45	0.727	0.653	0.541	0.399	0.275	0.215	0.244	0.349	0.488	0.618	0.708	0.744
	15	-41.25	0.758	0.685	0.574	0.431	0.306	0.246	0.275	0.381	0.521	0.651	0.739	0.774
	30	-37.5	0.786	0.715	0.605	0.461	0.335	0.274	0.303	0.411	0.551	0.681	0.768	0.802
	45	-33.75	0.813	0.743	0.633	0.489	0.362	0.300	0.329	0.438	0.579	0.709	0.795	0.828
10	0	-30	0.837	0.768	0.658	0.514	0.386	0.323	0.353	0.463	0.605	0.734	0.819	0.852
	15	-26.25	0.858	0.790	0.681	0.537	0.407	0.344	0.374	0.485	0.628	0.756	0.841	0.873
	30	-22.5	0.876	0.810	0.701	0.556	0.426	0.363	0.393	0.504	0.648	0.776	0.860	0.891
	45	-18.75	0.892	0.826	0.718	0.573	0.442	0.378	0.409	0.521	0.665	0.793	0.876	0.907
11	0	-15	0.906	0.840	0.732	0.587	0.456	0.391	0.422	0.534	0.679	0.807	0.889	0.920
	15	-11.25	0.916	0.851	0.743	0.598	0.466	0.401	0.432	0.545	0.690	0.818	0.900	0.930
	30	-7.5	0.923	0.858	0.751	0.606	0.473	0.409	0.440	0.553	0.697	0.825	0.907	0.937
	45	-3.75	0.928	0.863	0.756	0.610	0.478	0.413	0.444	0.557	0.702	0.830	0.912	0.942

12	0	0	0.929	0.865	0.757	0.612	0.479	0.414	0.445	0.559	0.704	0.832	0.913	0.943
	15	3.75	0.928	0.863	0.756	0.610	0.478	0.413	0.444	0.557	0.702	0.830	0.912	0.942
	30	7.5	0.923	0.858	0.751	0.606	0.473	0.409	0.440	0.553	0.697	0.825	0.907	0.937
	45	11.25	0.916	0.851	0.743	0.598	0.466	0.401	0.432	0.545	0.690	0.818	0.900	0.930
13	0	15	0.906	0.840	0.732	0.587	0.456	0.391	0.422	0.534	0.679	0.807	0.889	0.920
	15	18.75	0.892	0.826	0.718	0.573	0.442	0.378	0.409	0.521	0.665	0.793	0.876	0.907
	30	22.5	0.876	0.810	0.701	0.556	0.426	0.363	0.393	0.504	0.648	0.776	0.860	0.891
	45	26.25	0.858	0.790	0.681	0.537	0.407	0.344	0.374	0.485	0.628	0.756	0.841	0.873
14	0	30	0.837	0.768	0.658	0.514	0.386	0.323	0.353	0.463	0.605	0.734	0.819	0.852
	15	33.75	0.813	0.743	0.633	0.489	0.362	0.300	0.329	0.438	0.579	0.709	0.795	0.828
	30	37.5	0.786	0.715	0.605	0.461	0.335	0.274	0.303	0.411	0.551	0.681	0.768	0.802
	45	41.25	0.758	0.685	0.574	0.431	0.306	0.246	0.275	0.381	0.521	0.651	0.739	0.774
15	0	45	0.727	0.653	0.541	0.399	0.275	0.215	0.244	0.349	0.488	0.618	0.708	0.744
	15	48.75	0.694	0.619	0.506	0.364	0.242	0.183	0.211	0.314	0.452	0.583	0.674	0.711
	30	52.5	0.659	0.582	0.468	0.327	0.206	0.149	0.176	0.278	0.415	0.546	0.639	0.677
	45	56.25	0.622	0.544	0.429	0.288	0.169	0.113	0.139	0.240	0.376	0.507	0.602	0.641
16	0	60	0.584	0.504	0.388	0.248	0.130	0.075	0.101	0.200	0.335	0.467	0.563	0.603
	15	63.75	0.544	0.462	0.346	0.206	0.090	0.036	0.061	0.159	0.292	0.425	0.522	0.564
	30	67.5	0.503	0.419	0.302	0.163	0.048	-0.005	0.020	0.116	0.248	0.381	0.481	0.523
	45	71.25	0.460	0.375	0.256	0.118	0.006	-0.046	-0.022	0.072	0.203	0.336	0.438	0.482
17	0	75	0.417	0.330	0.210	0.073	-0.038	-0.089	-0.065	0.027	0.157	0.291	0.394	0.439
	15	78.75	0.373	0.284	0.163	0.026	-0.083	-0.132	-0.109	-0.019	0.110	0.244	0.349	0.396
	30	82.5	0.328	0.237	0.115	-0.021	-0.128	-0.176	-0.153	-0.065	0.062	0.197	0.304	0.352
	45	86.25	0.283	0.190	0.067	-0.068	-0.173	-0.220	-0.198	-0.112	0.014	0.149	0.258	0.308

El cálculo de seno h se hace con la siguiente formula:

$$\text{seno } (h) = \cos \varnothing \sin \delta \cos \omega + \sin \varnothing \sin \delta \quad (69)$$

Reemplazando los datos anteriores se obtiene el siguiente cuadro

seno (h)

Tabla 40

Seno (h)

Hora	Min	w	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	0	-90	0.100	0.060	0.008	-0.048	-0.092	-0.111	-0.102	-0.067	-0.014	0.043	0.089	0.110
	15	-86.25	0.158	0.121	0.071	0.013	-0.032	-0.053	-0.043	-0.006	0.049	0.105	0.148	0.168
	30	-82.5	0.217	0.182	0.133	0.075	0.027	0.004	0.015	0.055	0.111	0.166	0.208	0.225
	45	-78.75	0.275	0.243	0.195	0.136	0.085	0.061	0.073	0.115	0.173	0.228	0.267	0.282
7	0	-75	0.332	0.302	0.256	0.196	0.143	0.117	0.130	0.175	0.234	0.288	0.325	0.339
	15	-71.25	0.388	0.361	0.316	0.255	0.200	0.173	0.186	0.233	0.294	0.347	0.382	0.394
	30	-67.5	0.443	0.419	0.375	0.313	0.256	0.227	0.241	0.290	0.352	0.406	0.437	0.448
	45	-63.75	0.497	0.474	0.432	0.370	0.310	0.279	0.294	0.346	0.410	0.462	0.492	0.501
8	0	-60	0.548	0.529	0.487	0.424	0.362	0.330	0.345	0.400	0.465	0.517	0.544	0.552
	15	-56.25	0.598	0.581	0.541	0.477	0.412	0.379	0.395	0.451	0.518	0.569	0.595	0.601
	30	-52.5	0.646	0.631	0.592	0.527	0.461	0.426	0.443	0.501	0.569	0.620	0.643	0.648
	45	-48.75	0.691	0.678	0.640	0.575	0.507	0.471	0.488	0.548	0.618	0.668	0.689	0.693
9	0	-45	0.734	0.723	0.686	0.620	0.550	0.513	0.531	0.593	0.663	0.713	0.733	0.735
	15	-41.25	0.774	0.765	0.729	0.662	0.590	0.552	0.571	0.634	0.706	0.756	0.773	0.774
	30	-37.5	0.812	0.804	0.769	0.701	0.628	0.589	0.608	0.673	0.746	0.795	0.811	0.811
	45	-33.75	0.846	0.839	0.805	0.737	0.663	0.623	0.642	0.709	0.782	0.831	0.846	0.845
10	0	-30	0.877	0.872	0.838	0.770	0.694	0.653	0.673	0.741	0.816	0.864	0.877	0.875
	15	-26.25	0.905	0.901	0.868	0.799	0.722	0.680	0.701	0.770	0.845	0.893	0.906	0.902

	30	-22.5	0.929	0.926	0.894	0.825	0.747	0.704	0.725	0.795	0.871	0.919	0.930	0.926
	45	-18.75	0.950	0.948	0.916	0.846	0.767	0.725	0.745	0.816	0.893	0.941	0.951	0.947
	0	-15	0.967	0.965	0.934	0.864	0.785	0.741	0.762	0.834	0.911	0.959	0.968	0.963
11	15	-11.25	0.980	0.979	0.948	0.878	0.798	0.754	0.776	0.848	0.926	0.973	0.982	0.976
	30	-7.5	0.990	0.989	0.959	0.889	0.808	0.764	0.785	0.858	0.936	0.983	0.992	0.986
	45	-3.75	0.995	0.995	0.965	0.895	0.814	0.770	0.791	0.864	0.942	0.989	0.997	0.992
	0	0	0.997	0.997	0.967	0.897	0.816	0.771	0.793	0.866	0.944	0.991	0.999	0.993
12	15	3.75	0.995	0.995	0.965	0.895	0.814	0.770	0.791	0.864	0.942	0.989	0.997	0.992
	30	7.5	0.990	0.989	0.959	0.889	0.808	0.764	0.785	0.858	0.936	0.983	0.992	0.986
	45	11.25	0.980	0.979	0.948	0.878	0.798	0.754	0.776	0.848	0.926	0.973	0.982	0.976
	0	15	0.967	0.965	0.934	0.864	0.785	0.741	0.762	0.834	0.911	0.959	0.968	0.963
13	15	18.75	0.950	0.948	0.916	0.846	0.767	0.725	0.745	0.816	0.893	0.941	0.951	0.947
	30	22.5	0.929	0.926	0.894	0.825	0.747	0.704	0.725	0.795	0.871	0.919	0.930	0.926
	45	26.25	0.905	0.901	0.868	0.799	0.722	0.680	0.701	0.770	0.845	0.893	0.906	0.902
	0	30	0.877	0.872	0.838	0.770	0.694	0.653	0.673	0.741	0.816	0.864	0.877	0.875
14	15	33.75	0.846	0.839	0.805	0.737	0.663	0.623	0.642	0.709	0.782	0.831	0.846	0.845
	30	37.5	0.812	0.804	0.769	0.701	0.628	0.589	0.608	0.673	0.746	0.795	0.811	0.811
	45	41.25	0.774	0.765	0.729	0.662	0.590	0.552	0.571	0.634	0.706	0.756	0.773	0.774
	0	45	0.734	0.723	0.686	0.620	0.550	0.513	0.531	0.593	0.663	0.713	0.733	0.735
15	15	48.75	0.691	0.678	0.640	0.575	0.507	0.471	0.488	0.548	0.618	0.668	0.689	0.693
	30	52.5	0.646	0.631	0.592	0.527	0.461	0.426	0.443	0.501	0.569	0.620	0.643	0.648
	45	56.25	0.598	0.581	0.541	0.477	0.412	0.379	0.395	0.451	0.518	0.569	0.595	0.601
	0	60	0.548	0.529	0.487	0.424	0.362	0.330	0.345	0.400	0.465	0.517	0.544	0.552
16	15	63.75	0.497	0.474	0.432	0.370	0.310	0.279	0.294	0.346	0.410	0.462	0.492	0.501
	30	67.5	0.443	0.419	0.375	0.313	0.256	0.227	0.241	0.290	0.352	0.406	0.437	0.448
	45	71.25	0.388	0.361	0.316	0.255	0.200	0.173	0.186	0.233	0.294	0.347	0.382	0.394
	0	75	0.332	0.302	0.256	0.196	0.143	0.117	0.130	0.175	0.234	0.288	0.325	0.339
17	15	78.75	0.275	0.243	0.195	0.136	0.085	0.061	0.073	0.115	0.173	0.228	0.267	0.282
	30	82.5	0.217	0.182	0.133	0.075	0.027	0.004	0.015	0.055	0.111	0.166	0.208	0.225
	45	86.25	0.158	0.121	0.071	0.013	-0.032	-0.053	-0.043	-0.006	0.049	0.105	0.148	0.168

Factor Rb

Tabla 41

Factor Rb

Hora	Min	w	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	0	-90	2.388	2.388	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.388	2.388	2.388
	15	-86.25	1.789	1.569	0.953	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.297	1.429	1.739	1.831
	30	-82.5	1.514	1.301	0.867	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.563	1.184	1.462	1.560
	45	-78.75	1.357	1.169	0.836	0.193	0.000	0.000	0.000	0.000	0.637	1.073	1.309	1.401
7	0	-75	1.256	1.090	0.820	0.370	0.000	0.000	0.000	0.154	0.672	1.009	1.213	1.296
	15	-71.25	1.186	1.038	0.811	0.463	0.028	0.000	0.000	0.308	0.692	0.968	1.147	1.222
	30	-67.5	1.134	1.001	0.804	0.519	0.189	0.000	0.084	0.399	0.705	0.940	1.099	1.167
	45	-63.75	1.095	0.974	0.800	0.558	0.291	0.128	0.209	0.459	0.714	0.919	1.062	1.126
8	0	-60	1.064	0.953	0.796	0.585	0.360	0.227	0.293	0.500	0.720	0.903	1.034	1.093
	15	-56.25	1.040	0.937	0.794	0.605	0.410	0.297	0.353	0.531	0.726	0.891	1.012	1.066
	30	-52.5	1.020	0.923	0.792	0.621	0.448	0.349	0.398	0.555	0.729	0.881	0.993	1.045
	45	-48.75	1.003	0.913	0.790	0.633	0.477	0.389	0.432	0.573	0.733	0.873	0.978	1.027
9	0	-45	0.990	0.904	0.789	0.643	0.500	0.420	0.459	0.588	0.735	0.866	0.966	1.012
	15	-41.25	0.978	0.896	0.788	0.651	0.518	0.445	0.481	0.600	0.737	0.861	0.956	1.000
	30	-37.5	0.969	0.890	0.787	0.658	0.534	0.465	0.499	0.610	0.739	0.856	0.947	0.990
	45	-33.75	0.961	0.885	0.786	0.663	0.546	0.482	0.513	0.618	0.740	0.853	0.940	0.981
10	0	-30	0.954	0.881	0.785	0.668	0.556	0.495	0.525	0.624	0.742	0.850	0.934	0.973
	15	-26.25	0.948	0.877	0.785	0.672	0.564	0.506	0.534	0.630	0.743	0.847	0.929	0.967
	30	-22.5	0.944	0.874	0.784	0.675	0.571	0.515	0.542	0.634	0.743	0.845	0.924	0.962
	45	-18.75	0.940	0.872	0.784	0.677	0.576	0.522	0.549	0.638	0.744	0.843	0.921	0.958
11	0	-15	0.937	0.870	0.784	0.679	0.581	0.528	0.554	0.641	0.745	0.842	0.918	0.955
	15	-11.25	0.935	0.869	0.783	0.680	0.584	0.532	0.557	0.643	0.745	0.841	0.916	0.952
	30	-7.5	0.933	0.868	0.783	0.682	0.586	0.535	0.560	0.644	0.745	0.840	0.915	0.951
	45	-3.75	0.932	0.867	0.783	0.682	0.587	0.537	0.561	0.645	0.745	0.839	0.914	0.950
12	0	0	0.932	0.867	0.783	0.682	0.588	0.537	0.562	0.645	0.745	0.839	0.914	0.949

	15	3.75	0.932	0.867	0.783	0.682	0.587	0.537	0.561	0.645	0.745	0.839	0.914	0.950
	30	7.5	0.933	0.868	0.783	0.682	0.586	0.535	0.560	0.644	0.745	0.840	0.915	0.951
	45	11.25	0.935	0.869	0.783	0.680	0.584	0.532	0.557	0.643	0.745	0.841	0.916	0.952
	0	15	0.937	0.870	0.784	0.679	0.581	0.528	0.554	0.641	0.745	0.842	0.918	0.955
13	15	18.75	0.940	0.872	0.784	0.677	0.576	0.522	0.549	0.638	0.744	0.843	0.921	0.958
	30	22.5	0.944	0.874	0.784	0.675	0.571	0.515	0.542	0.634	0.743	0.845	0.924	0.962
	45	26.25	0.948	0.877	0.785	0.672	0.564	0.506	0.534	0.630	0.743	0.847	0.929	0.967
	0	30	0.954	0.881	0.785	0.668	0.556	0.495	0.525	0.624	0.742	0.850	0.934	0.973
	15	33.75	0.961	0.885	0.786	0.663	0.546	0.482	0.513	0.618	0.740	0.853	0.940	0.981
14	30	37.5	0.969	0.890	0.787	0.658	0.534	0.465	0.499	0.610	0.739	0.856	0.947	0.990
	45	41.25	0.978	0.896	0.788	0.651	0.518	0.445	0.481	0.600	0.737	0.861	0.956	1.000
	0	45	0.990	0.904	0.789	0.643	0.500	0.420	0.459	0.588	0.735	0.866	0.966	1.012
	15	48.75	1.003	0.913	0.790	0.633	0.477	0.389	0.432	0.573	0.733	0.873	0.978	1.027
15	30	52.5	1.020	0.923	0.792	0.621	0.448	0.349	0.398	0.555	0.729	0.881	0.993	1.045
	45	56.25	1.040	0.937	0.794	0.605	0.410	0.297	0.353	0.531	0.726	0.891	1.012	1.066
	0	60	1.064	0.953	0.796	0.585	0.360	0.227	0.293	0.500	0.720	0.903	1.034	1.093
	15	63.75	1.095	0.974	0.800	0.558	0.291	0.128	0.209	0.459	0.714	0.919	1.062	1.126
16	30	67.5	1.134	1.001	0.804	0.519	0.189	0.000	0.084	0.399	0.705	0.940	1.099	1.167
	45	71.25	1.186	1.038	0.811	0.463	0.028	0.000	0.000	0.308	0.692	0.968	1.147	1.222
	0	75	1.256	1.090	0.820	0.370	0.000	0.000	0.000	0.154	0.672	1.009	1.213	1.296
	15	78.75	1.357	1.169	0.836	0.193	0.000	0.000	0.000	0.000	0.637	1.073	1.309	1.401
17	30	82.5	1.514	1.301	0.867	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.563	1.184	1.462	1.560
	45	86.25	1.789	1.569	0.953	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.297	1.429	1.739	1.831

Por la tanto, se puede obtener los valores de la radiación global instantánea sobre una superficie inclinada, reemplazando los valores en la fórmula:

$$G_t = R_b I_h + R_{dc} D + R_{ds} G \quad (70)$$

Tabla 42

Radiación global instantánea sobre una superficie inclinada

Hora	Min	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	0	103.97	56.38	3.07	-17.50	-34.09	-39.23	-38.77	-25.16	-5.26	47.26	104.07	133.37
	15	154.86	100.50	48.50	4.95	-12.33	-19.28	-16.92	-2.15	23.10	95.07	158.97	191.51
	30	211.11	149.87	94.69	28.39	10.43	1.60	5.97	21.93	66.39	148.91	219.88	255.59
	45	272.38	204.16	146.27	62.76	34.08	23.31	29.78	46.94	115.12	208.44	286.40	325.23
7	0	338.21	262.98	202.83	108.89	58.47	45.72	54.38	85.44	168.90	273.20	358.07	399.92
	15	408.09	325.83	263.87	159.36	86.18	68.70	79.61	136.53	227.24	342.65	434.29	479.08
	30	481.41	392.14	328.81	213.65	134.86	92.08	116.96	191.75	289.56	416.14	514.41	562.04
	45	557.49	461.28	397.00	271.17	186.92	135.64	169.37	250.46	355.21	492.95	597.67	648.02
8	0	635.60	532.55	467.69	331.26	241.73	184.34	224.68	311.99	423.48	572.29	683.25	736.21
	15	714.94	605.19	540.11	393.21	298.60	235.06	282.18	375.59	493.59	653.31	770.27	825.71
	30	794.68	678.42	613.43	456.26	356.80	287.12	341.13	440.45	564.72	735.11	857.82	915.60
	45	873.96	751.42	686.78	519.63	415.57	339.82	400.72	505.77	636.00	816.76	944.93	1004.91
9	0	951.89	823.34	759.29	582.52	474.11	392.44	460.16	570.69	706.56	897.29	1030.62	1092.66
	15	1027.60	893.35	830.05	644.11	531.63	444.23	518.62	634.35	775.53	975.76	1113.91	1177.86
	30	1100.20	960.61	898.20	703.59	587.34	494.47	575.29	695.90	842.02	1051.21	1193.84	1259.54
	45	1168.86	1024.30	962.87	760.17	640.47	542.45	629.37	754.52	905.17	1122.72	1269.45	1336.75
10	0	1232.75	1083.65	1023.23	813.10	690.26	587.46	680.09	809.39	964.17	1189.39	1339.85	1408.58
	15	1291.11	1137.91	1078.51	861.66	736.03	628.88	726.73	859.77	1018.24	1250.38	1404.17	1474.17
	30	1343.23	1186.42	1127.98	905.19	777.11	666.08	768.62	904.95	1066.66	1304.93	1461.62	1532.73
	45	1388.47	1228.56	1171.01	943.10	812.93	698.54	805.15	944.32	1108.78	1352.34	1511.51	1583.56
11	0	1426.27	1263.80	1207.02	974.85	842.97	725.77	835.79	977.31	1144.06	1391.99	1553.21	1626.02
	15	1456.17	1291.68	1235.53	1000.02	866.79	747.38	860.10	1003.46	1172.00	1423.38	1586.20	1659.61

	30	1477.80	1311.86	1256.18	1018.25	884.06	763.05	877.72	1022.41	1192.23	1446.09	1610.06	1683.90
	45	1490.89	1324.07	1268.67	1029.29	894.52	772.54	888.40	1033.89	1204.48	1459.84	1624.50	1698.60
	0	1495.27	1328.16	1272.86	1032.99	898.02	775.72	891.97	1037.74	1208.58	1464.44	1629.33	1703.52
12	15	1490.89	1324.07	1268.67	1029.29	894.52	772.54	888.40	1033.89	1204.48	1459.84	1624.50	1698.60
	30	1477.80	1311.86	1256.18	1018.25	884.06	763.05	877.72	1022.41	1192.23	1446.09	1610.06	1683.90
	45	1456.17	1291.68	1235.53	1000.02	866.79	747.38	860.10	1003.46	1172.00	1423.38	1586.20	1659.61
	0	1426.27	1263.80	1207.02	974.85	842.97	725.77	835.79	977.31	1144.06	1391.99	1553.21	1626.02
13	15	1388.47	1228.56	1171.01	943.10	812.93	698.54	805.15	944.32	1108.78	1352.34	1511.51	1583.56
	30	1343.23	1186.42	1127.98	905.19	777.11	666.08	768.62	904.95	1066.66	1304.93	1461.62	1532.73
	45	1291.11	1137.91	1078.51	861.66	736.03	628.88	726.73	859.77	1018.24	1250.38	1404.17	1474.17
	0	1232.75	1083.65	1023.23	813.10	690.26	587.46	680.09	809.39	964.17	1189.39	1339.85	1408.58
14	15	1168.86	1024.30	962.87	760.17	640.47	542.45	629.37	754.52	905.17	1122.72	1269.45	1336.75
	30	1100.20	960.61	898.20	703.59	587.34	494.47	575.29	695.90	842.02	1051.21	1193.84	1259.54
	45	1027.60	893.35	830.05	644.11	531.63	444.23	518.62	634.35	775.53	975.76	1113.91	1177.86
	0	951.89	823.34	759.29	582.52	474.11	392.44	460.16	570.69	706.56	897.29	1030.62	1092.66
15	15	873.96	751.42	686.78	519.63	415.57	339.82	400.72	505.77	636.00	816.76	944.93	1004.91
	30	794.68	678.42	613.43	456.26	356.80	287.12	341.13	440.45	564.72	735.11	857.82	915.60
	45	714.94	605.19	540.11	393.21	298.60	235.06	282.18	375.59	493.59	653.31	770.27	825.71
	0	635.60	532.55	467.69	331.26	241.73	184.34	224.68	311.99	423.48	572.29	683.25	736.21
16	15	557.49	461.28	397.00	271.17	186.92	135.64	169.37	250.46	355.21	492.95	597.67	648.02
	30	481.41	392.14	328.81	213.65	134.86	92.08	116.96	191.75	289.56	416.14	514.41	562.04
	45	408.09	325.83	263.87	159.36	86.18	68.70	79.61	136.53	227.24	342.65	434.29	479.08
	0	338.21	262.98	202.83	108.89	58.47	45.72	54.38	85.44	168.90	273.20	358.07	399.92
17	15	272.38	204.16	146.27	62.76	34.08	23.31	29.78	46.94	115.12	208.44	286.40	325.23
	30	211.11	149.87	94.69	28.39	10.43	1.60	5.97	21.93	66.39	148.91	219.88	255.59
	45	154.86	100.50	48.50	4.95	-12.33	-19.28	-16.92	-2.15	23.10	95.07	158.97	191.51

Temperatura ambiente

La temperatura se pone en el siguiente cuadro, los datos fueron tomados de SENAMHI

Tabla 43

Temperatura ambiente en la estación meteorológica de “La Pampilla”

Mes	Temperatura (°c)	
	Máxima	Mínima
Enero	23.61	11.06
Febrero	24.14	12.90
Marzo	23.92	11.06
Abril	23.73	10.16
Mayo	22.91	8.41
Junio	22.67	7.48
Julio	22.17	5.57
Agosto	23.16	7.60
Septiembre	22.83	7.67
Octubre	22.81	7.79
Noviembre	21.96	7.05
Diciembre	21.38	9.50

Nota. Información tomada del SENAMHI

Velocidad del viento

La velocidad del viento se pone en el siguiente cuadro, los datos fueron tomados del SENAMHI

Tabla 44*Velocidad viento en la estación meteorológica de “La Pampilla”*

Mes	Velocidad viento (m/s)
Enero	7.58
Febrero	7.07
Marzo	7.06
Abril	7.03
Mayo	6.52
Junio	6.60
Julio	6.35
Agosto	6.71
Septiembre	7.13
Octubre	7.68
Noviembre	7.53
Diciembre	7.77

Nota. Información tomada del SENAMHI

