

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN**  
**DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOMBA DE CALOR ASISTIDA POR  
ENERGÍA SOLAR UTILIZADA PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA  
CON UNA CAPACIDAD DE 60 l/día

**AUTORES:**

ANGEL ISAAC SIMBAÑA GALLARDO  
VICTOR EDUARDO TOAQUIZA TIPANTUÑA

**DOCENTE:**

ING. WILLIAM GIOVANNY QUITIAQUEZ SARZOSA, M.Sc.

**QUITO, ENERO 2018**

## **CESIÓN DE DERECHOS**

Nosotros, Ángel Isaac Simbaña Gallardo, con cédula de ciudadanía N° 1716245244 y Víctor Eduardo Toaquiza Tipantuña, con cédula de ciudadanía N° 1717939720, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: Diseño y construcción de una bomba de calor asistida por energía solar para el calentamiento de 60 l/día de agua, con el fin de reducir el consumo energético en el sector residencial, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada.

En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....  
Nombre: Simbaña Gallardo Ángel Isaac  
Cédula: 1716245244  
Fecha: 03 de enero de 2018

.....  
Nombre: Toaquiza Tipantuña Víctor Eduardo  
Cédula: 1717939720  
Fecha: 03 de enero de 2018

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOMBA DE CALOR ASISTIDA POR ENERGÍA SOLAR UTILIZADA PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA CON UNA CAPACIDAD DE 60 l/día**, realizado por Simbaña Gallardo Ángel Isaac y Toaquiza Tipantuña Víctor Eduardo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, 03 de enero de 2018

.....  
Ing. William Giovanni Quitiaquez Sarzosa, M.Sc.  
Cédula: 1721609764

## **DEDICATORIA**

A mi madre, Rosita, quien ha sido la persona que siempre ha estado junto a mí, brindándome su amor y su apoyo incondicional, incluso en mis errores. Por enfrentar y superar tantas adversidades para que nunca me falte nada. Por brindarme la oportunidad de recibir educación académica de calidad, teniendo confianza en mí, comprendiendo mis decisiones y alentándome para llegar a ser un excelente profesional.

A mi hermana, Nathali, por todo el sacrificio que ha hecho con el fin de ayudarme a salir adelante. Por compartir su tiempo y cariño conmigo. Por ser mi motivación y fortaleza en los momentos en que quise rendirme, porque eres la mejor persona del mundo, mi modelo a seguir.

**Isaac**

A mi padre Víctor Raúl Toaquiza, que Dios lo tenga en su gloria, mi madre Silvia Tipantuña, los que me motivaron a emprender un nuevo camino lleno de retos y nuevas experiencias, me apoyaron en sus inicios económica y moralmente, en especial a mi padre que con su ejemplo de superación, lucha, entrega y optimismo me enseñó a ver la vida de diferente manera indicándome el camino hacia la superación y libertad profesional.

A mi esposa Nancy Ruiz, por sus palabras de confianza, por su amor y paciencia, por apoyarme en todo lo que estaba a su alcance, la que pasó mucho tiempo solitaria teniendo que soportar mi carácter en las situaciones más tormentosas.

Mis hijos Matías y Cristhofer, que posiblemente en este momento no comprendan mis palabras, pero cuando sean capaces de entender lo que significan para mí, quiero que sepan que son mi principal motivación, la razón por la que me levanto cada día a buscar el bienestar para su presente y futuro.

A mis amigos y familia que de una u otra manera aportaron con un granito de arena en la culminación de esta etapa.

**Víctor**

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Politécnica Salesiana, por la formación académica, profesional y personal, impartida por cada uno de los docentes y personal administrativo de la Facultad de Ingeniería Mecánica, así como su ayuda durante el período de estudios universitarios.

Al Ing. William Quitiaquez, M.Sc., tutor del proyecto técnico, por brindarnos la oportunidad de desarrollar el tema de este proyecto, compartiendo su conocimiento, así como su tiempo para la ejecución y culminación del presente trabajo, de igual manera a nuestro amigo Pablo que compartió su tiempo con nosotros demostrando día a día que cuando existe trabajo en equipo los resultados son excelentes.

**Isaac y Víctor**

## RESUMEN

Este proyecto consiste en el diseño de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa; consta de un colector- evaporador de placa plana descubierto fabricado en aluminio, con una emisividad de 0,09. Además, se ha instalado un compresor de velocidad variable con una velocidad máxima de 3 600 rpm. El condensador está fabricado con tubería de cobre de 0,716 mm de espesor, en diámetros de 1/4" y 3/16". Los resultados obtenidos fueron tabulados con datos experimentales tomados cada 5 minutos en cuatro diferentes ensayos con una duración de 45 minutos por cada proceso de calentamiento. La temperatura máxima alcanzada por el agua en el tanque de almacenamiento fue de 47,6 °C en un período de 90 minutos. La bomba de calor fue probada bajo distintas condiciones climáticas. En días despejados, con un valor promedio de radiación de 642,2 [ $W \cdot m^{-2}$ ], a una temperatura ambiente de 22,8 °C, se pudo obtener agua a una temperatura de 41,9188 °C; de igual manera, en un clima lluvioso y completamente nublado, con una radiación promedio de 210,5 [ $W \cdot m^{-2}$ ] y 16,4 °C de temperatura ambiente, la temperatura máxima del agua fue 34,8899 °C. La implementación de un sistema solar conlleva un elevado costo inicial, el mismo que puede ser recuperado, aunque en largo plazo; sin embargo, un sistema solar térmico o fotovoltaico tiene una vida útil muy extensa, pero, sobre todo, contribuyen con el medio ambiente al dejar de utilizar combustibles fósiles o energía eléctrica. En particular, la implementación de esta bomba de calor puede dejar de emitir 1 065,6 kg de CO<sub>2</sub> al año. Adicionalmente, fue utilizada una estación meteorológica para la obtención de parámetros climáticos, tales como temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación incidente.

**PALABRAS CLAVE:** bomba de calor, expansión directa, energía solar, colector- evaporador, placa plana descubierta, refrigerante R-134a, agua caliente sanitaria

## ABSTRACT

This project is about designing a direct expansion solar assisted heat pump. It consists of a bare flat plate collector-evaporator built in aluminum, with an emissivity of 0,03. Also, a variable speed compressor with a maximum speed of 3 600 rpm was installed. Condenser is built in a copper pipe with a thickness of 0,716 mm, in 1/4" y 3/16" diameters. Results obtained were tabulated with experimental data taken every 5 minutes in four different tests with a duration of 45 minutes for each heating process. The top temperature reached by water in the storage tank was 47,6 °C in a period of 90 minutes. The heat pump was tested in different climatic conditions. On clear days, with an average radiation value of 642,2 [ $W \cdot m^{-2}$ ], at an ambient temperature of 22,8 °C, it was possible to obtain water at 4,19188 °C. Similarly, in a rainy day and completely cloudy weather, with an average radiation of 210,5 [ $W \cdot m^{-2}$ ] and 16,4 °C of ambient temperature, the maximum water temperature was 34,8899 °C. Implementing a solar system involves a high initial cost, it can be recovered, although in a long term. However, a solar system, thermal or photovoltaic, has an extend useful life, but above all, these systems contribute with the environment, due they don't use fossil fuels or electrical energy. Implementing this heat pump can stop 1 065,6 kg CO<sub>2</sub> emissions per year. Finally, a meteorological station was used to get climatic parameters, such as ambient temperature, wind speed and incident radiation.

**KEY WORDS:** Heat pump, direct expansion, solar energy, collector-evaporator, bare flat plate, R-134a refrigerant, domestic hot water.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Planteamiento del problema .....	1
Justificación del problema .....	2
Objetivo general .....	3
Objetivos específicos.....	3
Capítulo I - Marco teórico de sistemas de calentamiento de agua que usan energía solar....	4
1.1 Revisión de la literatura .....	4
1.2 Consumo energético .....	6
1.3 Fuentes de energía renovable.....	8
1.4 Energía solar .....	8
1.5 Energía solar en ecuador.....	9
1.7 Estándares ASHRAE .....	10
1.6 Normas INEN .....	11
1.7 Sistemas solares fotovoltaicos .....	11
1.8 Sistemas solares térmicos .....	13
1.9 Bombas de calor.....	16
1.10 Partes de una bomba de calor .....	17
1.11 Bomba de calor asistida por energía solar .....	17
1.12 Bomba de calor solar asistida de expansión indirecta .....	19
1.13 Bomba de calor solar asistida de expansión directa .....	20
1.13 Fluido de trabajo .....	20
1.13 Selección de alternativas.....	23
Capítulo II – Diseño de un sistema de calentamiento de agua empleando energía solar ....	26
2.1 Dirección del haz de radiación.....	26
2.2 Radiación solar .....	29
2.1 Análisis termodinámico de la bomba.....	33
2.2 Análisis del colector-evaporador .....	35
2.3 Análisis del compresor.....	37
2.4 Análisis del condensador .....	39
2.5 Análisis de la válvula de expansión.....	41

2.6 Rendimiento del sistema .....	42
Capítulo III - Análisis de resultados .....	43
3.1 Información técnica de la bomba de calor .....	43
3.2 Ensayos .....	44
3.3 Datos de radiación .....	44
3.4 Datos de temperatura ambiente y velocidad del viento .....	46
3.5 Datos de calor .....	47
3.6 Datos del compresor .....	48
3.7 Temperatura del refrigerante en el colector .....	50
3.8 Temperatura del agua.....	51
3.9 Rendimiento del sistema .....	52
Capítulo IV - Análisis económico .....	54
4.1 Listado de equipos y materiales.....	54
4.2 Costo de calentamiento de cada m <sup>3</sup> .....	56
4.3 Análisis comparativo de costos.....	59
4.4 Estudio ambiental .....	60
4.5 Costo de mantenimiento .....	62
4.6 Análisis financiero del proyecto .....	62
4.7 Ahorro económico .....	62
4.8 Cálculo del valor actual neto (V.A.N.) .....	63
4.9 Cálculo de la tasa interna de retorno (T.I.R.).....	64
4.10 Recuperación de la inversión.....	65
Conclusiones.....	66
Recomendaciones .....	68
Anexos.....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de inflamabilidad de los hidrocarburos.....	22
Tabla 2. Propiedades del refrigerante R134a.....	22
Tabla 3. Tipos de bomba de calor asistidas por energía solar.....	23
Tabla 4. Escala de Valoración.....	24
Tabla 5. Evaluación de Alternativas.....	25
Tabla 6. Parámetros empleados en la bomba de calor.....	43
Tabla 7. Información de los días de ensayos.....	44
Tabla 8. Descripción y costo de los materiales, equipos y suministros comprados.....	54
Tabla 9. Pliego Tarifario Vigente a Enero del 2016.....	56
Tabla 10. Análisis comparativo de costos para calentamiento de agua.....	60
Tabla 11. Equipos alimentados por los paneles solares. ....	60
Tabla 12. Evolución de la inflación en el Ecuador.....	62
Tabla 13. Proyección de ahorros.....	63
Tabla 14. Cálculo del V.A.N. ....	64
Tabla 15. Cálculo de T.I.R.....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación del COP para diferentes refrigerantes.....	4
Figura 2. Emisión de CO <sub>2</sub> en Ecuador.....	7
Figura 3. Producción de Energía e Importaciones en Ecuador [GWh] .....	8
Figura 4. Esquema de un sistema fotovoltaico .....	12
Figura 5. Estructura de una célula solar .....	13
Figura 6. Sistema solar doméstico para calentamiento de agua .....	14
Figura 7. Esquema de un colector solar con calentador de tubo .....	14
Figura 8. Esquema de la estructura de un colector solar de placa plana .....	15
Figura 9. Flujos de energía en un colector solar.....	15
Figura 10. Calefacción, ventilación y Aire Acondicionado de bomba de calor.....	16
Figura 11. Contribución solar fotovoltaica para producción de agua caliente sanitaria.....	18
Figura 12. Diagrama de una bomba de calor asistida para calentamiento de agua .....	18
Figura 13. Diagrama de bomba de calor asistida por energía solar expansión indirecta ....	19
Figura 14. Diagrama de bomba de calor asistida por energía solar expansión directa.....	20
Figura 15. Estrategia de sustitución de refrigerantes.....	21
Figura 16. (a) Ángulos solares para una superficie inclinada (b) Ángulo Azimut.....	26
Figura 17. Radiación incidente en una superficie horizontal .....	30
Figura 18. Absorción, reflexión y transmisión de radiación por un material.....	32
Figura 19. Bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa.....	33
Figura 20. Diagrama T-s del ciclo de la bomba de calor de expansión directa.....	33
Figura 21. Diagrama P-h del ciclo de la bomba de calor de expansión directa.....	34
Figura 22. Diagrama T-s de un ciclo real de refrigeración.....	34
Figura 23. Proceso de estrangulamiento.....	41
Figura 24. Estación meteorológica WS-1201 .....	44
Figura 25. Variación de la radiación solar (16-Sep-2017). .....	45
Figura 26. Radiación solar.....	45
Figura 27. Variación de la temperatura ambiente.....	46
Figura 28. Variación de la velocidad del viento .....	46
Figura 29. Calor ganado por el R-134a en el colector.....	47
Figura 30. Calor total ganado en el condensador .....	47
Figura 31. Potencia requerida por el compresor.....	48

Figura 32. Variación de flujo másico del R-134a.....	48
Figura 33. Presiones de operación en el compresor .....	49
Figura 34. Temperaturas de operación del compresor .....	49
Figura 35. Relación entre la potencia del compresor y el flujo másico.....	50
Figura 36. Termocuplas colocadas en el colector.....	50
Figura 37. Variación de la temperatura del R-134a en el colector .....	51
Figura 38. Incremento en la temperatura del agua .....	52
Figura 39. Coeficiente de desempeño (COP) .....	52
Figura 40. Variación del COP vs la velocidad rotacional vs radiación solar .....	53
Figura 41. Tiempo de baño diario por hogar .....	57

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Refrigerante 134a saturado. Tabla de temperatura. ....	76
<b>Anexo 2.</b> Refrigerante 134a saturado. Tabla de presión. ....	77
<b>Anexo 3.</b> Refrigerante 134a sobrecalentado.....	78
<b>Anexo 4.</b> Diagrama de Mollier del refrigerante 134a. ....	80
<b>Anexo 5.</b> Simbología.....	81
<b>Anexo 6.</b> Imágenes termográficas.....	84
<b>Anexo 7.</b> Proceso de construcción. ....	92
<b>Anexo 8.</b> Manual de operación. ....	96
<b>Anexo 9.</b> Manual de mantenimiento. ....	100
<b>Anexo 10.</b> Datos obtenidos el 26 de octubre del 2017.....	104
<b>Anexo 11.</b> Datos obtenidos el 30 de octubre del 2017.....	106
<b>Anexo 12.</b> Datos obtenidos el 02 de noviembre del 2017.....	108
<b>Anexo 13.</b> Datos obtenidos el 06 de noviembre del 2017.....	110
<b>Anexo 14.</b> Datos obtenidos el 09 de noviembre del 2017.....	112

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El cambio climático y la contaminación del aire son el mayor impacto ambiental que genera el uso de combustibles fósiles. Debido al crecimiento industrial, la emisión de gases de efecto invernadero cada vez es mayor, siendo el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el principal contaminante [1].

La transformación de áreas rurales a urbanas genera un incremento de consumo energético: consumo eléctrico, transporte, alimentación. La Agencia Internacional de Energía (IEA) informa que las grandes ciudades tienen el 67,77% del consumo de energía mundial [2]. La población urbana a nivel mundial entre los años 1974 - 1975 era de 1 520 millones, cifra que ha continuado creciendo de manera continua hasta llegar a 3 290 millones entre los años 2006-2007; se proyecta que esta cifra se va a duplicar para el año 2050.

La energía solar es una fuente de energía libremente disponible para su utilización, y a pesar de que su implementación está en crecimiento, los sistemas solares térmicos no son abundantes, aun conociendo los beneficios que éstos brindan. Si bien es cierto, existen proyectos mayores a 1 MW para la generación de potencia fotovoltaica [3], se está introduciendo al mercado paneles solares fotovoltaicos para uso residencial, pero no se evidencia la existencia de una bomba de calor asistida por energía solar.

## **JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Alcanzar un desarrollo sostenible es la meta a donde deben apuntar los seres humanos. La búsqueda de fuentes de energía que permitan reducir las emisiones de dióxido de carbono al usar combustibles fósiles ha permitido el desarrollo de energías alternativas, tales como la energía solar; la energía solar térmica permite reducir los costos del consumo de energía [4]. Debido a esto, en Europa y Estados Unidos se han implementado muchas plantas solares térmicas.

La energía solar es la industria que está creciendo más rápidamente en América; permite crear una fuente de energía limpia y puede llegar a convertirse en la más grande del mundo. La utilización de energía solar puede llegar a reducir 45 millones de toneladas de emisiones peligrosas de carbono [5]. La implementación de un sistema solar puede parecer costosa en un inicio, pero comparada con el ahorro a largo plazo, ésta es una inversión razonable; una vez realizada la instalación, el ahorro en el costo del consumo eléctrico mensual es inmediato. Debido a esto, el sector del comercio solar va en aumento, entre un 25% hasta un 50%.

El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable indica que la dependencia de combustibles fósiles ocupa el 80% de la oferta de energía primaria. El Plan Nacional del Buen Vivir propone el Cambio de la Matriz Energética [6], al incrementar el uso de energías renovables para la producción nacional.

La energía solar es un recurso natural virtualmente inagotable que no se aprovecha por completo, así que por medio de una bomba de calor asistida por energía solar se puede reducir el consumo de energía eléctrica para el calentamiento de agua sanitaria.

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir una bomba de calor por compresión de vapor de refrigerante asistida por energía solar utilizada para el calentamiento de agua con una capacidad de 60 l/día.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar una investigación teórica de los componentes de las bombas de calor convencionales, y de las bombas asistidas por energía solar.
- Seleccionar los elementos que componen la bomba de calor en base a los parámetros definidos.
- Efectuar pruebas de funcionamiento en diferentes condiciones climáticas para determinar la eficiencia de la bomba.

## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO SOBRE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA QUE EMPLEAN ENERGÍA SOLAR

Los combustibles fósiles satisfacen mayoritariamente la demanda de energía en el planeta; sin embargo, paralelamente a este consumo de energía, se vincula una contaminación ambiental y el aumento en los gases de efecto de invernadero; la implementación de sistemas solares es una alternativa para un desarrollo sustentable, particularizando en una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa.

#### 1.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA

Un método para predecir el rendimiento térmico de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa para el calentamiento de agua fue desarrollado por Malali *et al.* [7] para conocer la temperatura del fluido del colector en base a valores conocidos de la radiación solar, temperatura de condensación y temperatura del aire ambiente. El sistema presenta un COP entre 3,6 a 5,6 obtenido en el mes de enero en ciudades como Nueva York, Norkfolk y Tampa; las emisiones de carbón se reducen en un 31% hasta un 70% en comparación con un calentador eléctrico convencional de agua.

Una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa fue analizada por Chata *et al.* [8] utilizando diferentes refrigerantes; los resultados muestran que, en un rango de temperatura de 0 °C a 2 °C, el refrigerante R-12 produce le valor más alto de COP, seguido por el R-22 y el R-134a. Con el refrigerante R-410a se obtiene un valor de COP de 15% a 20% más bajo que el conseguido con el R-134a.

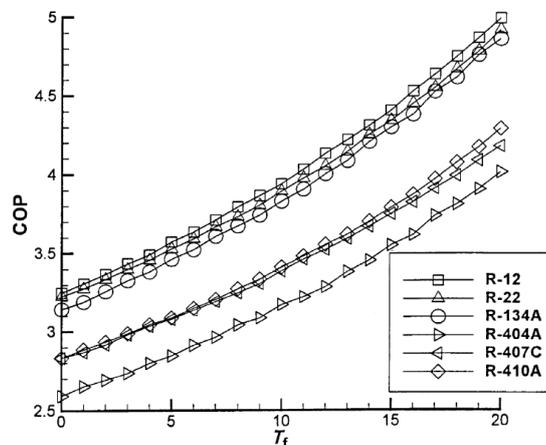


Figura 1. Comparación del COP para diferentes refrigerantes [8].

Los efectos de la cantidad de refrigerante y los parámetros estructurales en el rendimiento de bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa fueron estudiados por Zhang *et al.* [9] para determinar cómo afectan directamente el funcionamiento de la bomba. La cantidad de refrigerante no debe ser muy baja para tener un COP alto, pero tampoco sobrecargada para evitar fugas. El estudio ensaya cargando entre 1,2 kg hasta 1,8 kg de refrigerante, donde el COP aumenta de 36,7% a 42,3%; una cantidad recomendada es de 1,65 kg a 1,75 kg en un colector de hasta 6 m<sup>2</sup> y con un condensador de tubo de 70 m de largo y 9 mm de espesor. El COP se reduce cuando se incrementa el área del colector y es más eficiente si el tubo del condensador es de cobre en lugar de aluminio.

Las características de congelamiento y el rendimiento térmico de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa para calentamiento de espacio bajo condiciones de congelamiento se analizaron por Huang *et al.* [10] en rangos de temperatura de 7 °C a -3 °C, con valores de irradiancia solar de 0 W·m<sup>-2</sup> a 300 W·m<sup>-2</sup>. Un valor de 1 000 W·m<sup>-2</sup> puede prevenir el congelamiento en el colector descubierto a temperaturas sobre los -3 °C; a 1 °C y sin irradiancia solar, el rendimiento del sistema tampoco se ve afectado por congelamiento. Con temperaturas superiores a 5 °C e irradiancia hasta 300 W·m<sup>-2</sup> el COP alcanzado es de 2,23 y la capacidad de calentamiento es de 1 000 W; entre 0 W·m<sup>-2</sup> a 300 W·m<sup>-2</sup>, el sistema mejora un 49,9% la capacidad de calentamiento y el COP aumenta un 26%. Este estudio comprueba que una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa es aplicable bajo condiciones de congelamiento, además que ahorra energía, tiene un rendimiento aceptable en comparación con intercambiadores de calor convencionales y funciona aún en invierno, con baja irradiancia solar.

Las características del Evaporador/Evaporador para un sistema de bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa según Zhu *et al.* [11] muestra que el rendimiento global de este sistema es influenciado principalmente por la intensidad de la irradiación solar y el área del colector. En un sistema con dos colectores de placa plana de 2 m<sup>2</sup>, un compresor de 735 W y una irradiación solar entre 143,12 W·m<sup>-2</sup> a 646,6 W·m<sup>-2</sup>, se obtiene un COP en rangos de 2,49 hasta 3,47. El estudio comprueba que el COP es más alto con una mejor irradiación y con una temperatura del ambiente más alta, acelerando el calentamiento de la

temperatura del agua; esto elevará la presión de evaporación, pero la succión del compresor disminuirá. Incrementar el área del colector mejor el COP del sistema, pero reducirá la eficiencia del colector e incrementará la carga de trabajo sobre el compresor.

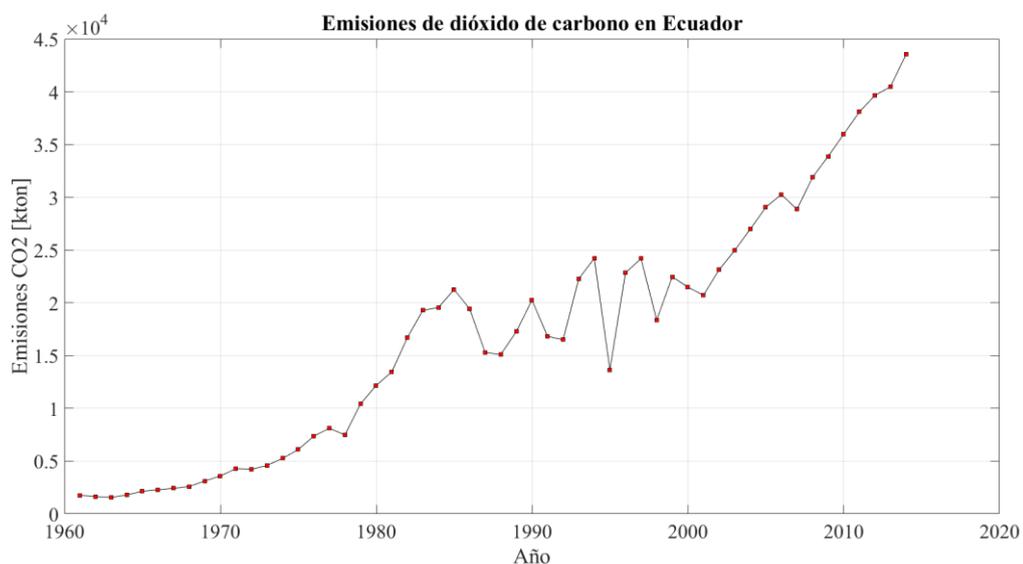
El análisis termodinámico de calentador de agua con una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa fue investigado teóricamente por Yousefi y Moradali [12]. El sistema es usado para el calentamiento doméstico de agua de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  empleando un colector solar de  $3\text{ m}^2$ . A una temperatura ambiente de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y con una radiación recibida sobre la superficie de  $500\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $700\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $900\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , el COP calculado fue de 6,52, 7,35 y 8,02. Mientras que a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  con la misma irradiancia, se obtuvo valores de COP de 6,96, 7,55 y 8,25. La velocidad del compresor influye significativamente en el funcionamiento del sistema; a una temperatura ambiente de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , al incrementar la velocidad del compresor de  $1\ 100\text{ rpm}$  a  $1\ 700\text{ rpm}$ , el COP se reduce de 11 a 7 con una irradiancia de  $950\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Estudios paramétricos de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa simple operando en un ambiente cálido y húmedo se llevaron a cabo por Lokesh *et al.* [13] en la península sureña de la India. El sistema incluye un colector solar de  $2\text{ m}^2$ , actuando como evaporador con refrigerante R22, un compresor, un condensador de aire frío y una válvula de expansión electrónica. El COP encontrado varía de 2,09 a 2,72 con un consumo de energía desde  $1\ 110\text{ W}$  a  $1\ 310\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , brindando una capacidad de calentamiento en el rango de  $2,09\text{ kW}$  hasta  $3,57\text{ kW}$ . El funcionamiento del sistema se ve afectado por varios parámetros: el área del colector/evaporador, la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento.

## **1.2 CONSUMO ENERGÉTICO**

El calentamiento de agua sanitaria residencial [14] ocupa el tercer lugar de consumo energético; en la actualidad, el calentamiento de agua es realizado en mayor parte empleando calentadores de gas natural o de energía eléctrica, los cuales de manera directa o indirecta consumen combustibles fósiles y generan emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El efecto invernadero es un proceso natural [15, 16] mediante el cual, la Tierra es capaz de retener

calor en la atmósfera a través de las nubes y ciertos gases; la radiación solar que llega a la Tierra es absorbida en su mayoría por nubes y moléculas de los gases de efecto invernadero, lo que permite el calentamiento de la superficie terrestre, indispensable para la vida. La concentración de estos gases controla el clima; las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) han incrementado en un 30% en 200 años, desde la revolución industrial. A nivel mundial, la generación de calor y la electricidad han registrado emisiones de CO<sub>2</sub> del 41%. En Ecuador, en el año 2011 se estimaron factores de emisión de CO<sub>2</sub> por unidad de electricidad de 313,3 g de CO<sub>2</sub> por  $kW \cdot h$ . Así que la planificación energética [17] debe ser desarrollada en base a indicadores de sustentabilidad.



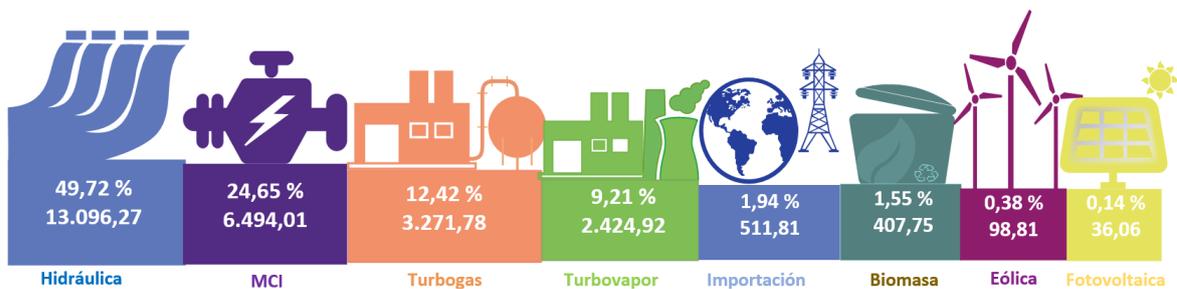
**Figura 2.** Emisión de CO<sub>2</sub> en Ecuador [18].

En Ecuador, en el año de 1990 se registraron 365 272 nacimientos, mientras que, en el 2014, 337 700; por otro lado, la tasa de natalidad, el número anual de nacimientos al año por cada mil habitantes muestra más variabilidad, aunque de igual manera ha bajado de 25,97% a 14,32%. En contraste con lo anterior, cifras del 2013 indican que hubo 63 104 defunciones totales, valor que a pesar de su disminución en tasa de mortalidad de 1990 con 4,95% hasta el 2013 con 4% [19], alrededor de un quinto de las personas nacidas; en base a esto, se puede afirmar que los nacimientos son mucho mayores que las defunciones, lo que conlleva a un aumento significativo en la cantidad de habitantes, una mayor cantidad de personas que consumen cada vez más recursos energéticos para sobrevivir. El crecimiento poblacional y el desarrollo tecnológico están relacionados a un aumento en el consumo energético [20]. Ecuador para el 2015 supera el 97% de cobertura de suministro de servicio de energía eléctrica [21].

### 1.3 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

Debido al impacto ambiental que ocasiona la generación de energía empleando combustibles fósiles, se ha incrementado el interés en fuentes de energía renovable [22]. En el 2005, apenas 55 países tenían proyectos concernientes a energías renovables que eran apoyados por el gobierno, con una inversión de *USD* 244 000 millones; para el 2010 este valor se incrementó un 8%; en el 2012 [23], aproximadamente el 19% del consumo mundial de energía era proporcionado por fuentes de energía renovable y en el 2013, al menos 144 países ya implementaron políticas para promover el desarrollo de energías renovables.

Las fuentes de energía renovable han sido consideradas por mucho tiempo como la opción más viable para la generación de electricidad, debido a su disponibilidad inmediata y permanente, aunque también puede presentar ciertos inconvenientes, debido a su calidad, cantidad, densidad y confiabilidad [24].



**Figura 3.** Producción de Energía e Importaciones en Ecuador [GWh] [21].

Los combustibles fósiles quemados generan diversos inconvenientes ambientales: cambios climáticos, calentamiento global, contaminación del aire, lluvia ácida [25]. Como medida, el desarrollo de tecnologías en base a energías renovables ha aumentado; investigadores, políticos, líderes industriales han comprendido la viabilidad económica de estas nuevas fuentes de energía.

### 1.4 ENERGÍA SOLAR

La energía solar es una de las fuentes permanentes de energía en el planeta. El desarrollo de la energía solar tiene como propósito convertirla en una energía sustentable, térmica o eléctrica [26]. Debido a la baja eficiencia en la conversión de la energía solar, se continúa investigando diferentes técnicas para mejorar la eficiencia de sistemas que emplean energía

solar. La energía solar es una fuente de energía limpia, ilimitada, de fácil acceso, gratuita y ambientalmente amigable.

Nastasi *et al.* [27] consideran que sustentabilidad es hacia donde se dirige el desarrollo de nuevas fuentes energéticas; tener una compatibilidad entre la vida humana y su entorno, y a la vez respetar el medio ambiente. Una inversión en la implementación de un sistema solar provee energía por un largo período de tiempo, en la actualidad y para las futuras generaciones [28].

Los principales factores por considerar para la implementación de un sistema solar son la latitud y la longitud del lugar [29]. Otros parámetros que influyen directamente en la eficiencia de un sistema solar son la orografía, la cual estudia, describe y representa el relieve de la superficie; por otro lado, la altitud del lugar, pudiendo generar sombras o reflejos a tomar en cuenta para los cálculos. Insolación es la radiación solar incidente por unidad de área horizontal en un determinado período de tiempo [30].

El consumo energético para calefacción en lugares fríos, y el uso de aire acondicionado en lugares cálidos, es una de las demandas más grandes en el mundo; este consumo espera un aumento promedio de 1,5% anual del 2012 hasta el 2040. En los países asiáticos, se estima que el consumo energético residencial se incrementará un 750% para el 2050; por otro lado, en los países europeos se pretende reducir el consumo energético para calentamiento y enfriamiento en un 70% para este mismo año [31]. Las técnicas de control solar contienen estrategias que, al ser correctamente diseñadas y aplicadas, pueden reducir la radiación solar y las demandas de enfriamiento.

## **1.5 ENERGÍA SOLAR EN ECUADOR**

La línea ecuatorial divide a la Tierra en dos hemisferios; Ecuador se halla sobre esta línea, por lo cual, la radiación solar llega casi de forma perpendicular hacia la superficie. La nueva tendencia está en el diseño de edificios autosustentables, ya que la energía solar puede ser empleada como fuente de energía para calentamiento de espacios y de agua, además de generar electricidad mediante paneles solares fotovoltaicos. Una familia consume un promedio de  $200 \text{ kW} \cdot \text{h}$  mensuales [32]; la implementación de un sistema solar reduce el consumo de energía, y por consiguiente los costos.

En Ecuador, el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) propuso la implementación de 53 centrales generadoras fotovoltaicas, para obtener una potencia de 146,6 MW. La realidad es que apenas están operando cuatro centrales generando 3,5 MW, un 2,4% de lo planificado. Para impulsar la producción de energía solar, en abril del 2012, el CONELEC fijó la tarifa de USD 0,40 kW·h [3]. Sin embargo, los proyectos de energía solar presentan varias adversidades, principalmente la falta de financiamiento, así como trabas burocráticas.

Emplear la energía solar como una fuente renovable de energía tiene como objetivo disminuir la reducción de gases de efecto invernadero al reducir el consumo de combustibles fósiles. Ecuador cuenta con un documento técnico [33] que facilita información de la energía solar como fuente energética, el Atlas Solar del Ecuador. Los datos de radiación solar diarios están entre 3,35 kW·h·m<sup>-2</sup> en mayo y 4,33 kW·h·m<sup>-2</sup> en septiembre.

## 1.7 ESTÁNDARES ASHRAE

La Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) se encarga de identificar las necesidades existentes, apoyar la investigación y escribir los estándares para pruebas y su posterior aplicación práctica en la industria, con el objetivo de mantener ambientes seguros y productivos, mientras se preserva el medio ambiente para generaciones futuras [34].

El Estándar ASHRAE 95-1981 (RA 87) se denomina “métodos de prueba para determinar el rendimiento térmico de sistemas solares de calentamiento doméstico de agua”; su propósito es establecer un método uniforme para probar sistemas solares de calentamiento de agua para el rendimiento térmico. Este estándar no es usado para el análisis de los componentes de manera individual del sistema. Es aplicable a sistemas de 100 galones de agua caliente por día o menos [35].

El Estándar ASHRAE 96-1980 (RA 89) se denomina “métodos de prueba para determinar el rendimiento térmico de colectores solares de placa plana sin cubierta de vidrio”; el propósito de éste es brindar métodos de prueba para determinar el rendimiento térmico de colectores solares de placa plana sin cubierta de vidrio, los cuales calientan el líquido para

aplicaciones de baja temperatura. Este estándar contiene métodos para pruebas en exteriores bajo condiciones de irradiación solar natural, y para interiores, bajo simulación [35].

## **1.6 NORMAS INEN**

La norma NTE INEN 2507 [36] define los requisitos para el rendimiento térmico de colectores solares en sistemas de agua a temperatura menor a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En primer lugar, el dimensionamiento, establecer el lugar de instalación y los consumidores. En promedio cada persona requiere 50 litros de agua a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  al día. A continuación, los circuitos primarios y secundarios deben garantizar la transferencia de energía a los otros elementos del sistema. En el diseño se debe emplear los siguientes valores: irradiancia global en el plano del colector  $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Temperatura del aire ambiente  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La norma GPE INEN 18 [37] establece los requisitos para la construcción de calentadores solares de agua destinados al uso doméstico. El colector solar por emplearse debe ser nuevo, no tener más de dos años desde su fabricación. Como mínimo, se debe brindar 33 litros de agua caliente por persona cada día; actualmente ya existen diseños que pueden proporcionar 65 litros. Los sistemas de calentamiento solar domésticos requieren de mantenimiento preventivo, al menos cuatro veces al año; si existe dificultad al acceso o no se dispone del capital, dos veces al año.

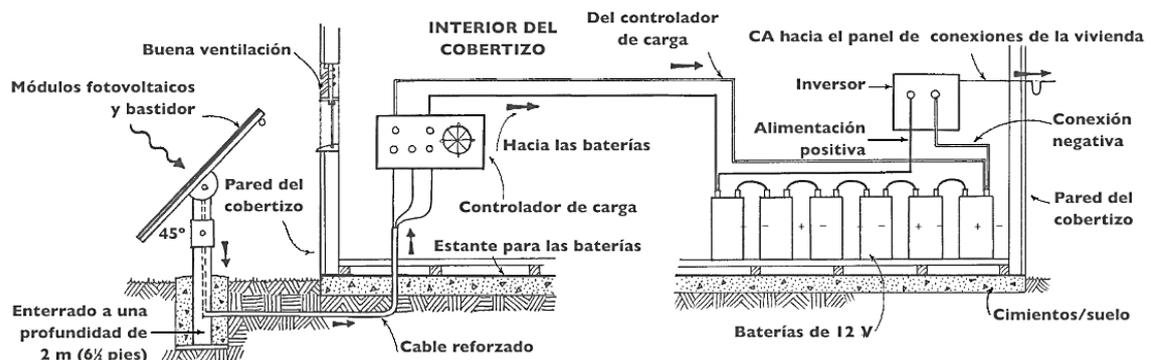
## **1.7 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS**

Tam *et al.* [38] afirman que la electricidad producida por sistemas solares fotovoltaicos contribuye a minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero; de igual manera, la implementación de estos sistemas genera efectiva y eficientemente energía limpia y contribuye a un desarrollo sustentable, consiguiendo una conservación energética y reduciendo el impacto ambiental, sin embargo, presenta costos iniciales elevados

El desarrollo de fuentes renovables de energía permite convertir la irradiancia solar en electricidad, para lo cual se emplean sistemas solares fotovoltaicos como alternativa a las fuentes no renovables de energía [39], como gas natural, gasolina, carbón; la energía eléctrica generada por un sistema solar fotovoltaico es eficiente y amigable con el medio ambiente, es utilizada en iluminación residencial, vehículos eléctricos, sistemas híbridos en

plantas. El principal inconveniente es la eficiencia de conversión de estos sistemas, buscando maximizar la generación de energía eléctrica bajo todo tipo de situación climática [40].

Un sistema solar fotovoltaico brinda la oportunidad que áreas rurales, las cuales no cuentan con suministro eléctrico, dispongan de este servicio; India cuenta con instalaciones de una capacidad de 272,5 GW, lo que proporciona energía eléctrica a 75,02 millones de hogares, principalmente en áreas rurales que no contaban de ésta. Alrededor de 72,4 millones de hogares emplean keroseno como combustible primario para la iluminación, sin embargo, el desarrollo de las aplicaciones fotovoltaicas permite conseguir una mejor alternativa en calidad de iluminación y versatilidad. Aunque llevar un desarrollo sustentable es el objetivo de todas las personas, este proceso avanza lentamente; en India, el 61% de las plantas generadoras utiliza carbón, mientras que apenas el 13% contribuye con fuentes de energía renovable [41].

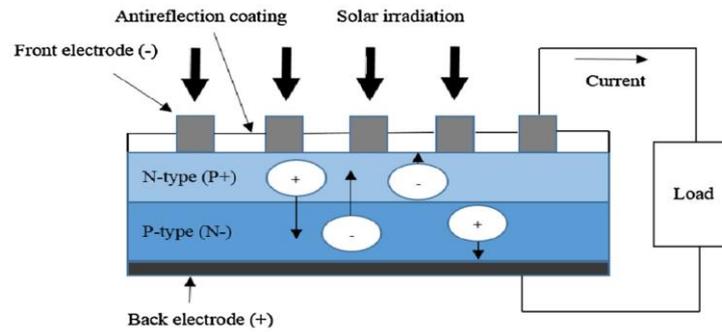


**Figura 4.** Esquema de un sistema fotovoltaico [42].

Un panel solar fotovoltaico es un dispositivo que emplea la insolación para generar energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico; la corriente y tensión requeridas están en función del número de células solares, así como de su conexión, serie o paralelo. Un panel solar fotovoltaico tiene de 28 a 40 células, cada célula es capaz de entregar 0,5 voltios [43, 44].

La mejor eficiencia de un panel solar es alcanzable en área con abundante energía solar; el Medio Este y el Norte de África, así como el suroeste de los Estados Unidos son ejemplos de lugares ideales para coleccionar energía solar [45]. Pero las áreas más soleadas generalmente están rodeadas por desiertos, donde las tormentas de arena son frecuentes. El polvo puede afectar en un 40% la eficiencia del panel solar.

Un panel solar es empleado para reducir el consumo energético, en especial para el sector comercial o residencial. Existen dos tipos de cristales diferentes [46]: policristalino y monocristalino. Los paneles policristalinos tienen menor eficiencia debido a la presencia de un solo cristal, aunque son más baratos; los paneles monocristalinos suelen ser más costosos, pero generalmente más eficientes.



**Figura 5.** Estructura de una célula solar [47].

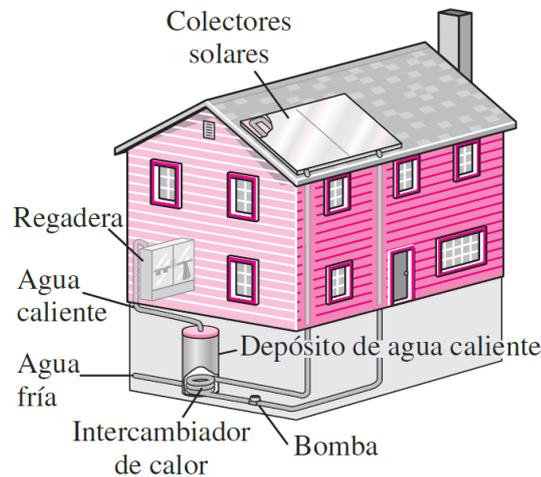
En Ecuador, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) ejecuta un proyecto para generar electricidad limpia empleando energía solar; la planta fotovoltaica de almacenamiento de energía Baltra con una capacidad de 67 kilo Watt pico [ $kWp$ ] capaz de brindar  $11 MW \cdot h$  por año. Este proyecto permite dejar de emitir 73 toneladas de  $CO_2$  al dejar de utilizar 7 800 galones de diésel en los generadores térmicos, además de no contaminar por vertederos en el aire, suelo o agua [48].

## 1.8 SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

La transformación de la energía solar a energía calórica ha sido objeto de desarrollo con el propósito de reducir el consumo de combustibles fósiles, principalmente en el calentamiento de agua. El factor determinante en el rendimiento de un sistema solar para el calentamiento de agua es la eficiencia del colector solar. Durante años se ha estudiado el desempeño de varios tipos de colectores solares: colectores tubos de vacío, colectores de vidrio con tubos tipo U, colectores convencionales de placa plana [49]. Los tubos de calor efectúan la transferencia de calor al fluido de trabajo, incluyendo condensación y evaporación.

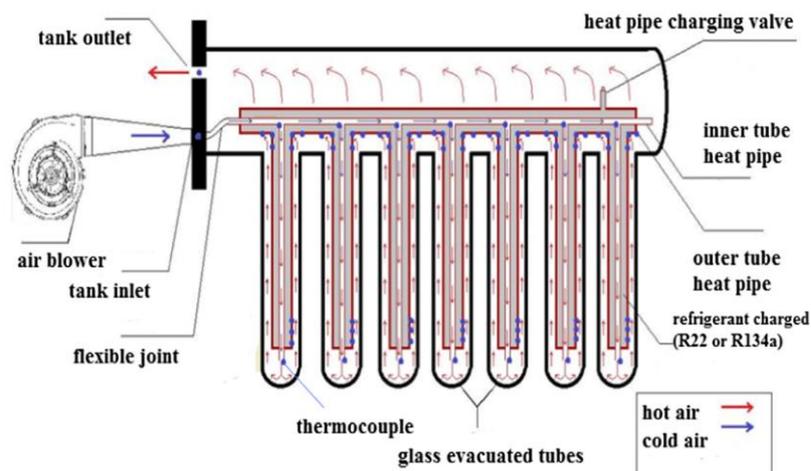
Un sistema solar de absorción tiene como parte principal al colector y al absorbedor; es esta combinación el factor más importante para aumentar el rendimiento (COP) del sistema. Un

estudio llevado a cabo por Mahash [50], determinó las eficiencias de distintos tipos de colectores a una temperatura de  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Con un 55%, el colector de tubo evacuado fue el más eficiente, seguido por el colector de canal parabólico con un 40% y el colector de placa plana con un 15%.



**Figura 6.** Sistema solar doméstico para calentamiento de agua [51].

Un sistema de calentamiento de agua mediante energía solar consta de un colector solar y un tanque de almacenamiento; el colector solar recibe la radiación solar y la convierte en calor usando un fluido, agua, y energía eléctrica [52].

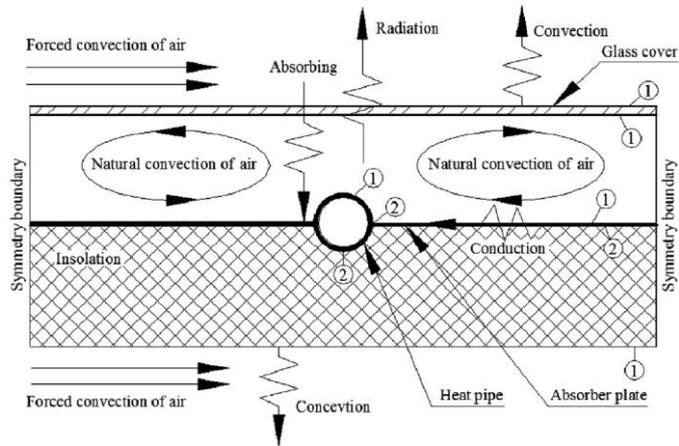


**Figura 7.** Esquema de un colector solar con calentador de tubo [53].

Un colector solar de tubo evacuado puede capturar la energía solar y transferirla como energía calórica hacia un sistema de calentamiento de agua. Mejorar la transferencia de calor

en los colectores solares es el punto más crítico en el diseño; la utilización de aditivos en los fluidos base, en especial varios tipos de nanofluidos, está siendo investigada por Ghaderian *et al.* [54] para analizar la eficiencia de los colectores solares.

Un colector solar térmico presenta una serie de pérdidas alrededor de su estructura, esto debido a los diferentes modos de transferencia de calor [55]; por tanto, es indispensable el cálculo de estos valores para diseñar un proyecto solar térmico con las prestaciones requeridas.



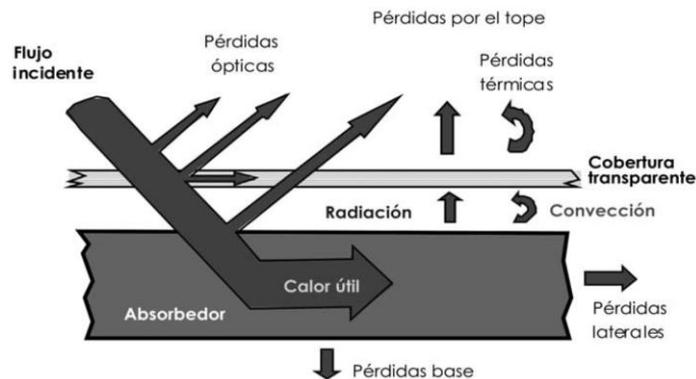
**Figura 8.** Esquema de la estructura de un colector solar de placa plana [49].

Cerón [55] analiza los métodos de transferencia de calor en un colector solar térmico, las cuales se presentan por:

Conducción: en laterales y cara posterior alrededor del fluido absorbedor.

Convección: desde el fluido absorbedor a la cubierta.

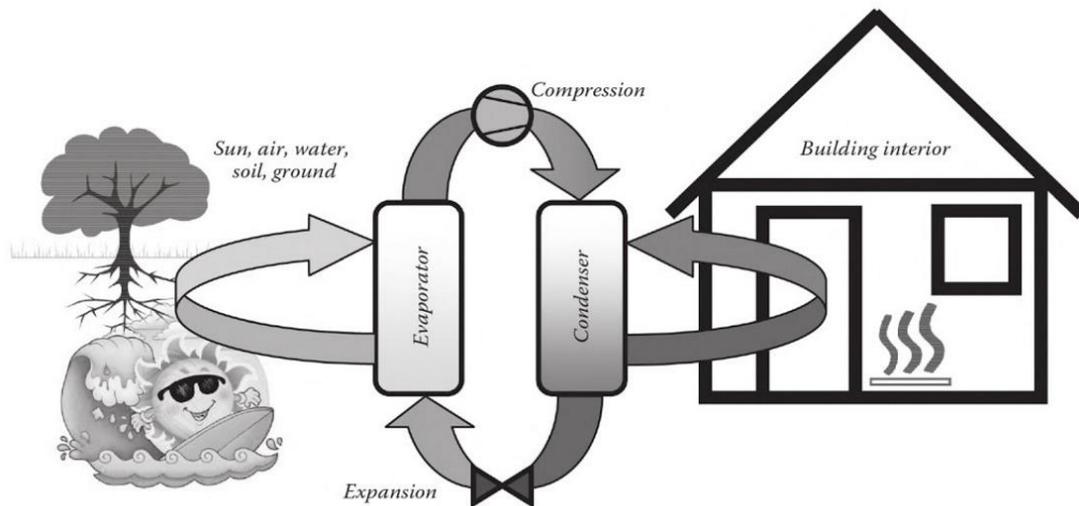
Radiación: debido a la temperatura del fluido absorbedor.



**Figura 9.** Flujos de energía en un colector solar [56].

## 1.9 BOMBAS DE CALOR

Una bomba de calor es un dispositivo que transfiere calor desde un medio de baja temperatura a otro de alta a través de la compresión de vapor del refrigerante 134a. Tiene como propósito mantener un espacio calentado a una temperatura alta, mediante la absorción de calor desde una fuente que se encuentra a temperatura baja para posteriormente suministrar este calor a un medio de temperatura alta [51].



**Figura 10.** Aplicación de Calefacción, ventilación y Aire Acondicionado de una bomba de calor [57].

Una bomba de calor toma el calor de una fuente a una determinada temperatura para después bombearlo hacia otra fuente con mayor temperatura [58]. Citando un ejemplo, se puede utilizar el aire frío que rodea a una vivienda en invierno y llevarlo hasta el interior de ella, que va a tener una temperatura más elevada; el calor total va a ser la sumatoria del calor extraído del exterior más el calor que aporta el trabajo eléctrico.

El uso de una bomba de calor en sistemas convencionales de agua sanitaria caliente es una alternativa eficiente para el ahorro de energía. El coeficiente de funcionamiento (COP) de una bomba de calor [59, 60, 61] es afectado por varias variables de operación, tales como la temperatura ambiental, la temperatura de descarga de agua, la presión de salida; al incrementar el COP del equipo, el consumo de electricidad disminuye. El refrigerante empleado es uno de los desafíos más grandes; éste debe cumplir con los requerimientos termodinámicos, y a la vez ser seguro para el ambiente; se lleva a cabo investigaciones para el uso de refrigerantes naturales. En comparación con un sistema con CO<sub>2</sub>, un sistema con

propano puede calentar agua de 30 °C a 90 °C con una mejora del 11% en el COP. La implementación del propano en general puede aumentar el COP entre un 5% a un 20%, dependiendo de la temperatura del agua [62].

### **1.10 PARTES DE UNA BOMBA DE CALOR**

Rey *et al.* [63] definen los siguientes elementos principales en una bomba de calor:

**Compresor:** Dispositivo que aumenta la presión del refrigerante que viene del evaporador en estado gaseoso y sobrecalentado, hasta una presión favorable del paso de gas a líquido en el condensador [63].

**Condensador:** Intercambiador de calor al que ingresa el refrigerante como vapor sobrecalentado, cediendo calor hacia el medio exterior; por tanto, al enfriarse, el fluido refrigerante se condensa [63].

**Evaporador:** Intercambiador de calor en el cual el refrigerante en estado de vapor húmedo, debido a la expansión, absorbe el calor del medio para cambiar su estado completamente a gas [63].

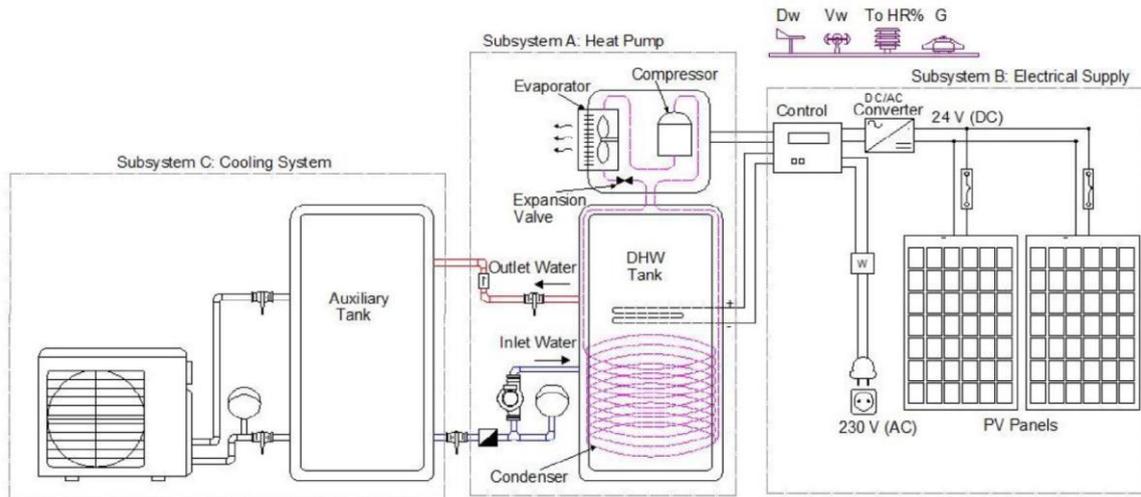
**Dispositivo de expansión:** Válvula que separa el lado de alta presión del de baja. Permite la regulación del flujo del refrigerante hacia el evaporador, así como la reducción en la presión de éste [63].

### **1.11 BOMBA DE CALOR ASISTIDA POR ENERGÍA SOLAR**

Una bomba de calor puede tener diferentes maneras en que puede ser acoplado un colector solar: bombas de calor energizadas fotovoltaicamente, bombas de calor asistida por energía solar, bombas de calor de consumo fotovoltaico térmico separado, bombas de calor de consumo fotovoltaico térmico simultáneo.

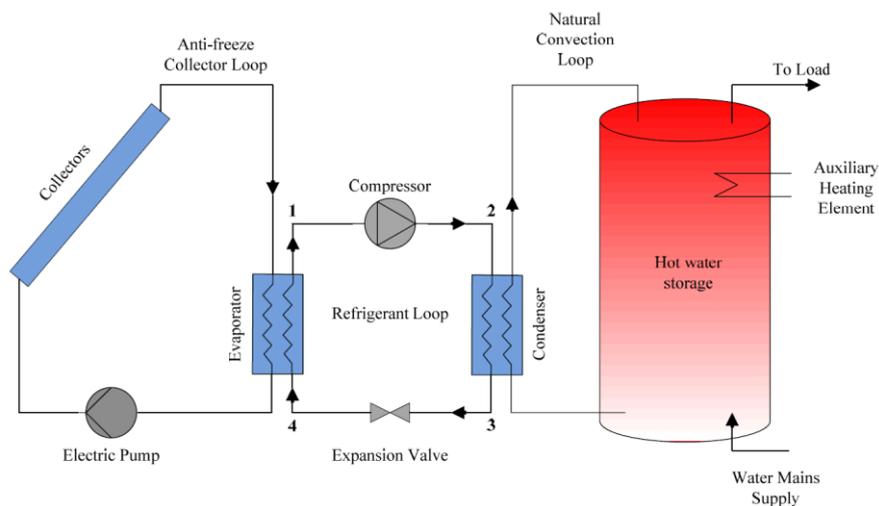
El caso por desarrollar es una bomba de calor asistida por energía solar; conlleva el uso de un colector solar térmico como fuente de energía calórica para el ciclo de la bomba de calor.

Fine *et al.* [64] consideran que la implementación de este sistema en la producción doméstica de agua caliente puede tener una reducción del consumo de energía eléctrica del 12%.



**Figura 11.** Contribución solar fotovoltaica para la producción de agua caliente sanitaria [65].

Cuando la radiación solar alcanza el colector solar, la mayor parte de esta radiación es absorbida por las celdas fotovoltaicas; una parte es convertida en electricidad y la restante es convertida en energía calórica. La energía térmica es transferida al evaporador por el tablero del colector. Esto produce que el fluido de trabajo en las tuberías de calor se evapore y se dirija al condensador. Por último, el vapor es condensado y libera calor en esta zona, para que la energía calórica sea transferida al agua que circula. El sistema solar es combinado con la bomba de calor mediante el evaporador [66].

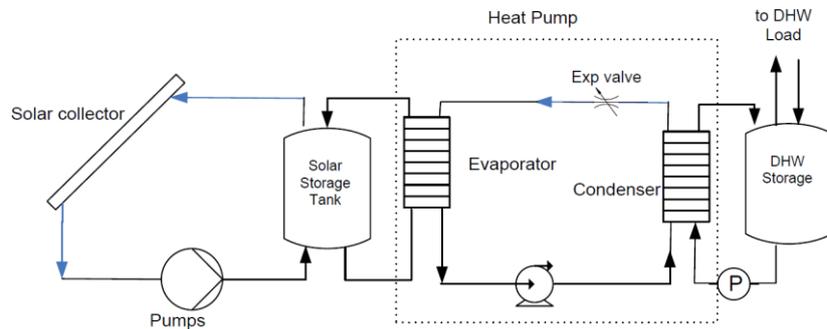


**Figura 12.** Diagrama de una bomba de calor asistida para calentamiento de agua [67].

En la actualidad, el sector residencial tiene un consumo energético, en primer lugar, en aire acondicionado, al que le sigue el agua caliente. El desarrollo de nuevas fuentes de energía permite reemplazar los calentadores convencionales de agua eléctricos o de combustible, para reducir el consumo de energía. En comparación con un calentador de agua por resistencia, una bomba de calor asistida por energía solar puede ahorrar entre un 40% a 60% en el consumo energético [68]; cabe indicar que el funcionamiento de este tipo de bomba depende directamente de la temperatura del ambiente, así que el principal inconveniente viene a ser un bajo rendimiento causado por la baja temperatura ambiental.

### 1.12 BOMBA DE CALOR SOLAR ASISTIDA DE EXPANSIÓN INDIRECTA

A diferencia de la bomba de calor solar asistida de expansión directa, en una bomba de expansión indirecta el colector solar no es el evaporador de la bomba de calor; puede tener diferentes configuraciones [69]. Si bien, la bomba de calor y el evaporador están combinados, se los considera como dos sistemas diferentes. Estas bombas están divididas en tres tipos de sistemas: serie, paralelo y dual.



**Figura 13.** Diagrama de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión indirecta [70].

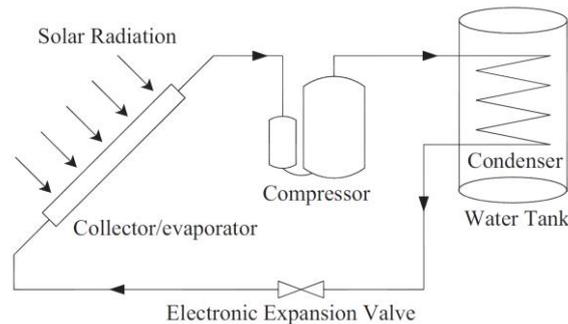
La principal ventaja de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión indirecta es su instalación; este proceso no es complejo, ya que cada componente es viene fabricado, lo cual reduce costos.

Este sistema consta de un tanque alrededor del cual está un evaporador cilíndrico. Sobre el tanque está montado un compresor y la válvula de expansión termostática; el condensador está envuelto alrededor del intercambiador de calor dentro del tanque. En una investigación realizada [67] se obtuvo agua a temperatura de 57 °C durante 20 000 horas sin fallas mecánicas. A esta temperatura, el consumo de electricidad tuvo un promedio de

$0,019 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{l}^{-1}$ , más económico que un calentador de agua eléctrico que tiene un valor promedio de  $0,06 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{l}^{-1}$ .

### 1.13 BOMBA DE CALOR SOLAR ASISTIDA DE EXPANSIÓN DIRECTA

Una de las aplicaciones más importantes de la energía solar es en una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa; una bomba de calor solar asistida combina una bomba de calor con un colector solar. La energía solar puede ser utilizada para calentar el refrigerante en el evaporador de la bomba de calor empleando un colector solar como evaporador. Esta bomba opera a una temperatura de evaporación elevada debido a la efectividad de absorción de energía solar térmica, que posteriormente brinda un mayor COP en la bomba [71]; el refrigerante cambia de fase a temperatura baja que produce una eficiencia alta en el colector, además tiene una temperatura de evaporación en el rango de  $10\text{-}15 \text{ }^\circ\text{C}$  [72].



**Figura 14.** Diagrama de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa [71].

Para mejorar el funcionamiento de la bomba se puede tomar en cuenta varios aspectos: emplear R12 como refrigerante, modificar la diferencia de temperatura del colector al ambiente, cambiar el área del colector, usar un evaporador de tipo fotovoltaico [73].

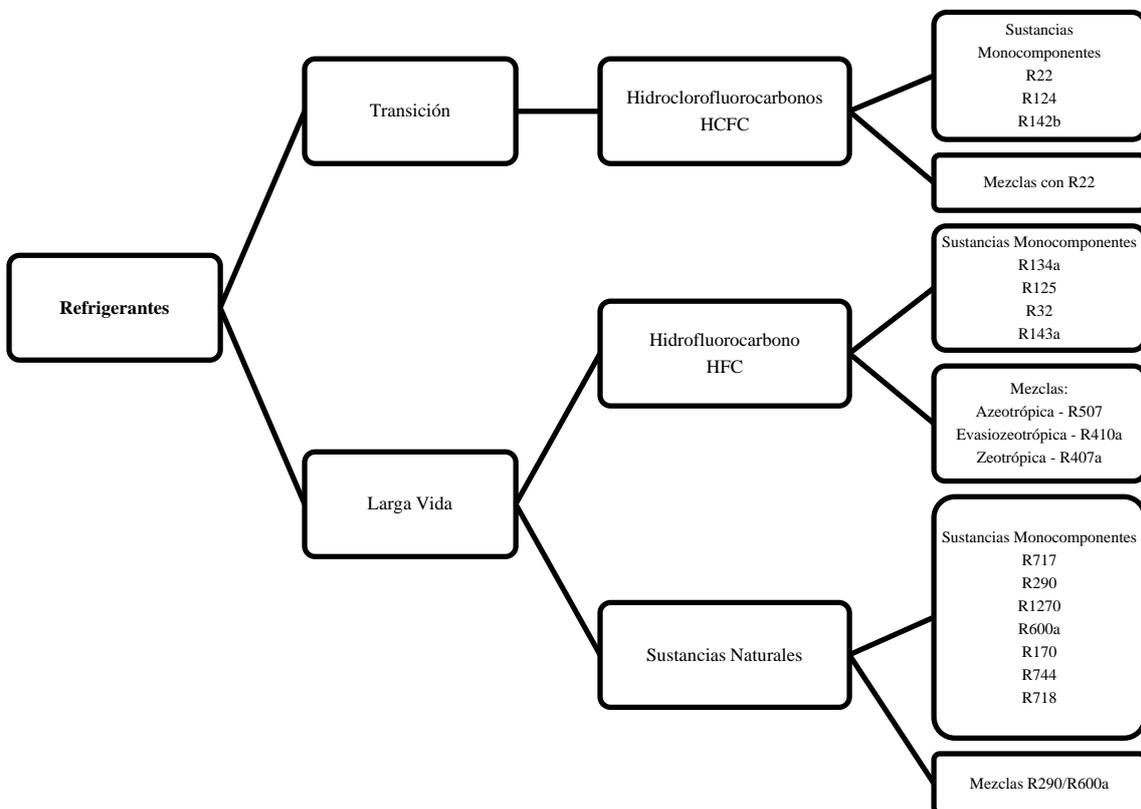
El refrigerante es directamente evaporado cuando se dispone de radiación solar absorbiendo calor del aire del ambiente; la energía solar absorbida en el colector/evaporador a la vía de carga del condensador de la bomba [69].

### 1.13 FLUIDO DE TRABAJO

La refrigeración desempeña un papel fundamental en el desarrollo de muchas aplicaciones en un sinnúmero de campos; los sistemas de refrigeración que emplean el ciclo de

compresión de vapor desarrollado por Parkin en 1830 son responsables del 30% del consumo mundial de energía, valor que se incrementa cuando existen fugas que disminuyen el rendimiento del sistema [74].

Los sistemas de refrigeración de compresión de vapor consumen una alta cantidad de energía y contribuyen al calentamiento global, así como a la disminución de la capa de ozono debido a los refrigerantes ambientalmente degradantes. El uso de hidrocarburos ofrece una alternativa de remplazo para los refrigerantes halogenados existentes; como resultado del Protocolo de Montreal, la producción de clorofluorocarbonos se eliminó en 1996 en países desarrollados, y para el 2010 en países en desarrollo, para emplear en su lugar hidrofluorocarbonos, los cuales son menos dañinos [74].



**Figura 15.** Estrategia de sustitución de refrigerantes [74].

En una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa, el fluido de trabajo es llamado refrigerante [9], el cual circula a través del compresor, el condensador, la válvula de expansión y es directamente expandido en el colector/evaporador donde tiene una transición de fase de líquido a vapor por acción de la energía solar [8].

A continuación, se presenta la clasificación de los hidrocarburos empleados como refrigerantes y su potencial de calentamiento global (*GWP*):

**Tabla 1.** Propiedades de inflamabilidad de los hidrocarburos [74].

Refrigerante	Número de Refrigerante	Fórmula Química	GWP (100 años)	T [°C] de Autoignición
Propano	R290	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3,3	466
Butano	R600	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	4	420
Isobutano	R600a	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3	462
Etano	R170	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5,5	515
Propileno	R1270	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1,8	455
Ciclopropano	RC270	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1,8	495
Dimethyl Ether	RE170	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	1	235

El tetrafluoroetano es el refrigerante conocido como HFC 134a. Es un hidrofluorocarbono constituido por hidrógeno, fluorina y carbono; al no contener clorina, no lo hace dañino ante la capa de ozono. Este refrigerante es un conocido sustituto para el R12, en el que las moléculas son más grandes, por lo que va a ser necesario emplear mayor cantidad de R134a en un sistema. [75].

**Tabla 2.** Propiedades del refrigerante R134a [51].

Fórmula		CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F
Masa molar $M$	[ $kg/kmol$ ]	102,03
Constante de gas $R$	[ $kJ/kg \cdot K$ ]	0,08149
Calor específico $c_p$	[ $kJ/kg \cdot K$ ]	1,23
Densidad (líquido) $\rho$	[ $kg/m^3$ ]	1443
Propiedades de Punto Crítico	Temperatura [ $K$ ]	374,2
	Presión [ $MPa$ ]	4,059
	Volumen [ $m^3/kmol$ ]	0,1993
Ebullición	Punto Normal de Ebullición [ $^{\circ}C$ ]	-26,1
[1 atm]	Calor latente vaporización $h_{fg}$ [ $kJ/kg$ ]	217,0
Punto de Congelación	[ $^{\circ}C$ ]	-96,6

### 1.13 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Chen *et al.* [14] han analizado los tipos de bombas de calor asistidas por energía solar para el calentamiento de agua sanitaria, dentro de las cuales se las puede clasificar principalmente en dos tipos: expansión directa y expansión indirecta.

A continuación, se presenta la información correspondiente a cada tipo de bomba de calor asistida por energía solar:

**Tabla 3.** Tipos de bomba de calor asistidas por energía solar.

Tipo	Expansión Directa	Expansión Indirecta
<b>Esquema</b>		
<b>Característica</b>	El refrigerante es calentado en un evaporador por energía solar, al emplear un colector solar al mismo tiempo como evaporador [71].	Configuración en serie entre el colector solar hacia el evaporador de la bomba de calor [67].
<b>COP</b>	3,9 – 6,1 [71]. 2,6 – 3,3 [10]. 2,1 – 3,5; 4,7 (estacional) [76]. 3,6 – 5,6 [7].	4,5 [77]. 2,3 – 3,3 [67]. Mayor a 5,5 [69].
<b>Temperatura de Operación</b>	-10 °C – 20 °C [7].	0 °C – -40 °C [67].
<b>Temperatura Generada</b>	20 °C – 42 °C [76]. 50 °C – 70 °C [7].	7,2 °C – 37,8 °C [67].
<b>Refrigerante</b>	R410a [71]. R134a – R600a [76].	Glicol [67]. R12 - R134a [67].
<b>Capacidad del Compresor</b>	1,48 kg – 2,28 kg [71]. 0,005304 m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> [7].	7 kg · h <sup>-1</sup> – 154 kg · h <sup>-1</sup> [67].

Previo a la implementación de un tipo de bomba de calor solar asistida, existen varias consideraciones a analizar:

**Construcción:** Accesibilidad a los materiales establecidos en el diseño con respecto a los existentes en el mercado, así como a la maquinaria, herramientas y material de aporte disponibles.

**Ensamblaje:** Facilidad de acoplar los elementos constituyentes del dispositivo para ponerlo en un funcionamiento adecuado.

**Costo:** Disponibilidad de los recursos económicos en base al presupuesto establecido.

**Rendimiento:** Capacidad que posee el equipo de acuerdo al propósito requerido.

**Mantenimiento:** Consideración del tiempo de vida útil de los componentes, y de igual manera la prevención ante agentes dañinos, además del funcionamiento del dispositivo.

De acuerdo con estos parámetros, se va a realizar la selección más adecuada del tipo de bomba de calor asistida por energía solar, tomando en cuenta la escala de valoración y el análisis cuantitativo establecida a continuación:

**Tabla 4.** Escala de valoración.

<b>Parámetro</b>		<b>Descripción</b>				
<b>Construcción</b>	Sencilla	3	Compleja	2	Difícil	1
<b>Ensamblaje</b>	Fácil	3	Moderado	2	Complicado	1
<b>Costo</b>	Barato	3	Económico	2	Costos	1
<b>Rendimiento</b>	Muy eficiente	3	Eficiente	2	Poco eficiente	1
<b>Mantenimiento</b>	Rápido	3	Moderado	2	Tardío	1

**Tabla 5.** Evaluación de alternativas.

<b>Parámetros</b>	<b>Factor de Ponderación</b>	<b>Alternativas</b>			
		<b>Bomba de Expansión Directa</b>		<b>Bomba de Expansión Indirecta</b>	
Construcción	0,15	2	0,30	2	0,30
Ensamblaje	0,35	3	1,05	2	0,70
Costo	0,15	2	0,30	1	0,15
Rendimiento	0,20	2	0,40	3	0,60
Mantenimiento	0,15	2	0,30	1	0,15
<b>Total</b>	<b>1,00</b>		<b>2,35</b>		<b>1,90</b>

Finalmente, se indica que una bomba de calor de expansión directa consta de un colector solar, un tanque de almacenamiento, una válvula de expansión; en el colector fluye el refrigerante como fluido de transferencia de calor [78]; emplea un colector solar lleno de refrigerante para remplazar el evaporador de aire convencional [9]. Esta es la principal ventaja con respecto a la construcción de una bomba de calor de expansión indirecta, ya que en ésta el evaporador es un sistema individual respecto a la bomba [69]; la bomba de calor almacena energía por un intercambiador conectado a la línea anticongelante del colector en lugar que fluya a través del colector; esto elimina las largas líneas de refrigeración [79].

El rendimiento de la bomba de calor es determinado principalmente por el refrigerante usado; el refrigerante R410a es más eficiente que otros como R404a o R407c, aunque produce valores de COP que son de 15 a 20% más bajos que los obtenidos con el R134a [7]. Otro factor influyente en el rendimiento es la situación climática [10]; una bomba de calor de expansión directa no absorbe suficiente calor del aire para complementar la energía solar y el funcionamiento se ve afectado [14]. Por otra parte, una bomba de calor de expansión indirecta utiliza tanto la energía solar colectada, así como la energía del aire del ambiente como recurso [67];

La bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa será la seleccionada, por ser la más viable al obtener la más alta puntuación. Ésta deberá ser desarrollada para satisfacer la necesidad del proyecto.

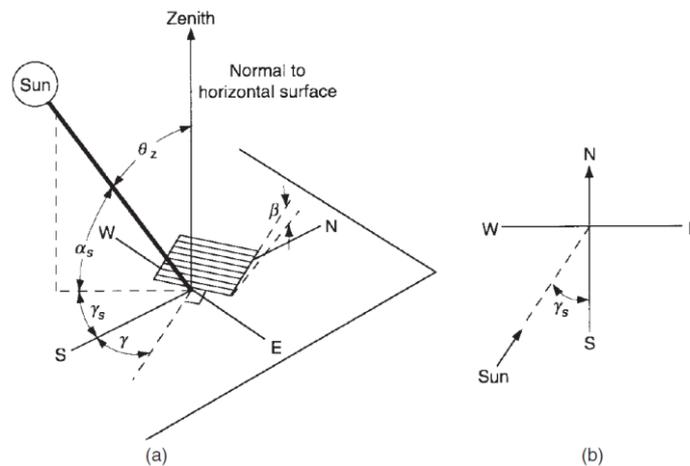
## CAPÍTULO II

### DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA EMPLEANDO ENERGÍA SOLAR

A continuación, se realiza el análisis numérico de los elementos del equipo, presentando los modelos matemáticos que permiten comprender su funcionamiento.

#### 2.1 DIRECCIÓN DEL HAZ DE RADIACIÓN

Las relaciones geométricas entre el plano de cualquier orientación relativa a la tierra a cualquier hora y el haz de radiación solar entrante son descritas en términos de varios ángulos [80].



**Figura 16.** (a) Ángulos solares para una superficie inclinada (b) Ángulo Azimut [80].

Latitud ( $\phi$ ): Localización angular, al norte (positiva) o al sur (negativa) del ecuador ( $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ ); la irradiación solar incide de forma vertical sobre la superficie en el ecuador, por tanto la latitud influye considerablemente sobre la cantidad de radiación [81].

Declinación ( $\delta$ ): Posición angular del sol al medio día (cuando el sol está en el meridiano local) con respecto al ecuador, positivo al norte ( $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ ) [80]. Se puede conocer su valor aproximado mediante la ecuación de Cooper [82, 83, 84, 85, 86]:

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + N}{365} \right) \quad (1)$$

Donde:

$N$  : Número del día del año (1 el primero de enero y 365 el 31 de diciembre)

Ángulo horario ( $\omega$ ): Desplazamiento angular del sol al este u oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a por hora (positivo en la mañana y negativo en la tarde). Puede ser calculado de la hora local solar correcta [82, 84, 87]:

$$\omega = 15 (H_s - 12) \quad (2)$$

Donde:

$H_s$ : Hora solar (de 1 a 24)

A los rayos solares les toma cuatro minutos atravesar  $1^\circ$  de longitud. Si la ubicación está al este del meridiano estándar, la corrección se suma a la hora; si está al oeste, se la resta. Según Duffie [80] y Kalogirou [82], la hora solar es calculada mediante:

$$H_s = H_L + ET \pm 4 \cdot (L_S - L_M) \quad (3)$$

Donde:

$H_L$ : Hora local

$L_S$ : Longitud Estándar de la ubicación

$L_M$ : Longitud del meridiano más cercano (para Ecuador,  $-80^\circ$ )

La ecuación del tiempo ( $ET$ ) es una variación de tiempo debido a la velocidad orbital de la Tierra a lo largo del año, así que la hora solar ( $H_s$ ) varía ligeramente del tiempo marcado por un reloj [82]. Este valor puede ser obtenido mediante:

$$ET = 9,87 \sin(2 \cdot B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (4)$$

El factor B depende está en función del día del año, y se calcula por:

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \quad (5)$$

Ángulo de inclinación ( $\beta$ ): Ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal. Puede ser calculado empleando [88]:

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (6)$$

Ángulo azimut ( $\gamma$ ): Desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local; cero al sur, negativo al este y positivo al oeste.

Ángulo de incidencia ( $\theta$ ): Ángulo entre los rayos del sol en la superficie y la normal a la superficie [82].

Adicionalmente, se define ángulos que describen la posición del sol en el cielo:

Ángulo zenit ( $z$ ): Ángulo entre la vertical y la línea al sol, que es el ángulo de incidencia del haz de radiación sobre la superficie horizontal.

Ángulo de altitud solar ( $\varphi$ ): Ángulo entre el plano horizontal y los rayos del sol; es el complemento del ángulo zenit ( $z + \varphi = 90^\circ$ ). La expresión matemática es [82, 87]:

$$\sin \varphi = \cos z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (7)$$

Ángulo azimut solar ( $\gamma_s$ ): Desplazamiento angular desde el sur de la proyección del haz de radiación sobre el plano horizontal [82].

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \varphi} \quad (8)$$

Existe una serie de relaciones útiles entre estos ángulos. La relación entre el ángulo de incidencia del haz de radiación en la superficie ( $\theta$ ) con otros ángulos es [84, 80, 82, 85]:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (9)$$

Para superficies inclinadas, el ángulo azimut es cero ( $\gamma = 0^\circ$ ); la ecuación 9 puede ser reducir a:

$$\cos \theta = \sin(\phi - \beta) \sin(\delta) + \cos(\phi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (10)$$

El número de horas diarias de luz solar es dado por [82, 80, 86]:

$$D = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (11)$$

Mientras que la hora de salida del sol ( $S_{rise}$ ) y la hora de puesta del sol ( $S_{set}$ ) están en función de la duración diaria de luz solar [83, 84]; entonces se tiene que:

$$S_{rise} = 12 - 0,5 \cdot D \quad (12)$$

$$S_{set} = S_{rise} + D \quad (13)$$

El ángulo horario de puesta de sol ( $\psi$ ) también es empleado en los cálculos de radiación solar; viene dado por [80, 82]:

$$\psi = -\tan \phi \tan \delta \quad (14)$$

## 2.2 RADIACIÓN SOLAR

Los cálculos emplean niveles de radiación teóricos de valores posibles de radiación si no existiese la atmósfera. En cualquier punto, la radiación solar incidente sobre un plano horizontal fuera de la atmósfera, según Duffie [80], Kalogirou [82] y Chwieduk [84], viene dada por:

$$G_x = G_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360 N}{365} \right) \right] \cos(z) \quad (15)$$

Donde:

$G_x$ : Radiación extraterrestre medida en el plano normal; [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$N$ : Número del día del año (1 el primero de enero y 365 el 31 de diciembre)

$z$ : Ángulo solar zenit; [ $^\circ$ ]

$G_{sc}$ : Constante solar; [ $W \cdot m^{-2}$ ]

En el año 2000, la American Society for Testing and Material (ASTM) desarrolló un espectro de referencia AM0 (ASTM E-490) basado en datos de satélites, misiones espaciales, sondeos de cohetes, telescopios solares e irradiancia espectral modelada para determinar el valor más reciente de la constante solar,  $G_{sc} = 1\,366,1 [W \cdot m^{-2}]$  [82].

La radiación solar en cualquier momento sobre una superficie horizontal puede ser obtenida al integrar la ecuación 15 desde la salida hasta la puesta del sol [80, 82]. Entonces se tiene que:

$$I_x = 24 \frac{3600}{\pi} \frac{G_x}{\cos(z)} \left( \cos \phi \cos \delta \sin \psi + \frac{\pi}{180} \psi \sin \phi \sin \delta \right) \quad (16)$$

Donde:

$I_x$ : Radiación solar extraterrestre diaria; [ $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ ]

$\psi$ : Ángulo horario de puesta de sol: [ $^\circ$ ]

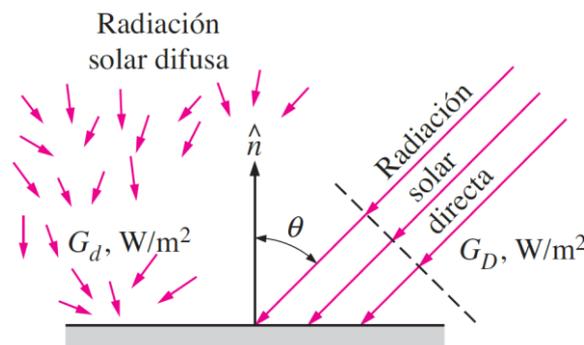
El índice promedio de claridad ( $k_T$ ) es la relación entre la radiación diaria promedio sobre una superficie horizontal, y la radiación extraterrestre promedio [84, 82, 80]. El índice promedio de calidad está definido por:

$$k_T = \frac{I}{I_x} \quad (17)$$

Donde:

$I$ : Radiación total diaria sobre una superficie horizontal terrestre; [ $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ ]

Los colectores solares son instalados con un ángulo respecto a la superficie horizontal, con la finalidad de incrementar la cantidad de radiación incidente, así como para reducir el reflejo [82]. La radiación emitida es la componente dominante en la radiación solar global [84]. Liu *et al.* [89] presentaron un modelo isotrópico difuso, el cual indica que la irradiación solar total sobre una superficie inclinada un ángulo  $\beta$ , en referencia a un plano horizontal, consta de tres componentes: radiación emitida, radiación difusa y radiación reflejada.



**Figura 17.** Radiación incidente en una superficie horizontal [90].

La radiación difusa ( $I_d$ ) considera diversos factores para determinar su valor.

a) Si  $\psi \leq 81,4^\circ$ , la relación  $I_d/I = 0,143$  cuando  $k_T \geq 0,715$ . Si  $k_T < 0,715$ , entonces se tiene que [80]:

$$\frac{I_d}{I} = 1 - 0,2727 k_T + 2,4495 k_T^2 - 11,9514 k_T^3 + 9,3879 k_T^4 \quad (18)$$

a) Si  $\psi > 81,4^\circ$ , la relación  $I_d/I = 0,175$  cuando  $k_T \geq 0,722$ . Si  $k_T < 0,722$ , entonces se tiene que [80]:

$$\frac{I_d}{I} = 1 - 0,2832 k_T + 2,5557 k_T^2 - 0,8448 k_T^3 \quad (19)$$

La ecuación 20 describe la radiación total [84, 82, 89, 80, 91]:

$$I_T = I R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I + I_d) \rho_o \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (20)$$

Donde:

$I_T$ : Radiación solar global; [ $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ ]

$\rho_o$ : Reflectancia de la superficie (suelo)

Camargo *et. al.* [92] consideran que el valor de la reflectancia ( $\rho_o$ ) está entre 0,20 y 0,25 considerando el índice de reflexión de la mayoría de superficies.

$R_b$  es un factor geométrico que relaciona la radiación emitida sobre una superficie inclinada y una superficie horizontal a cualquier hora. La expresión para calcular este factor es [84, 80, 82]:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (21)$$

La atmósfera emite una radiación, pero no tiene una temperatura constante; el análisis se realiza en base a una temperatura ficticia, la temperatura del cielo ( $T_{sky}$ ) [84, 82]:

$$T_{sky} = 0,0552 T_a^{1,5} \quad (22)$$

Donde:

$T_a$ : Temperatura ambiente; [K]

Por tanto, esta emisión de radiación atmosférica puede ser expresada por [90, 84]:

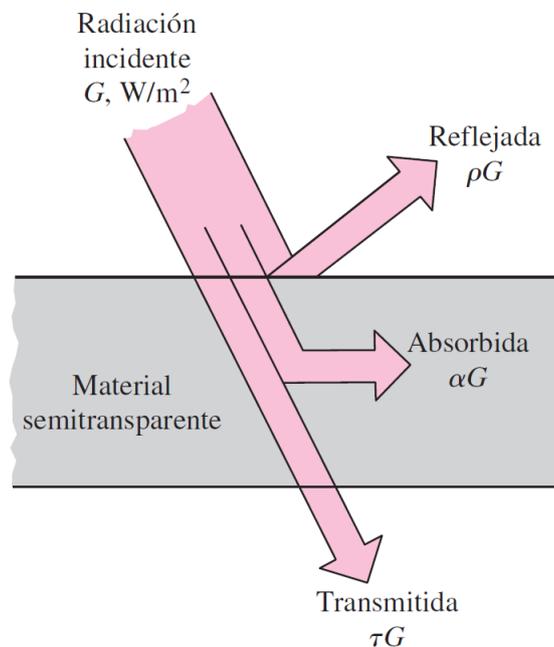
$$I_{sky} = \sigma T_{sky}^4 \quad (23)$$

Donde:

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann;  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

Cuando un haz de radiación termal incide en la superficie de un cuerpo, una parte es reflejada por la superficie, parte es absorbida por el cuerpo y otra parte es transmitida a través del cuerpo. El fenómeno relacionado con la radiación reflejada se llama reflectividad ( $\rho$ ); la fracción de radiación absorbida es la absorptividad ( $\alpha$ ); la radiación que es transmitida es conocida como transmitividad ( $\tau$ ). Estas tres cantidades se relacionan mediante [82]:

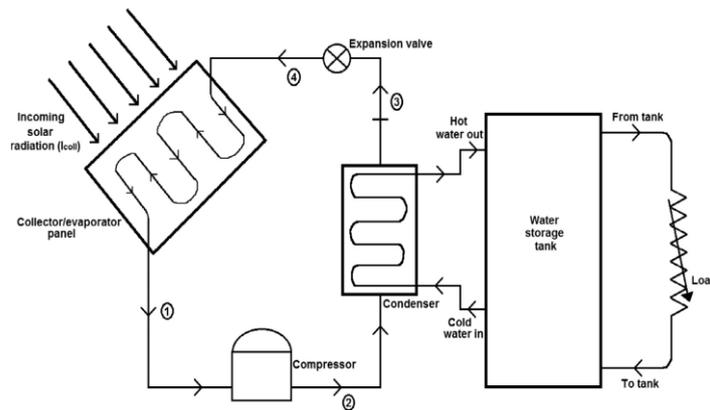
$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (24)$$



**Figura 18.** Absorción, reflexión y transmisión de radiación por un material [90].

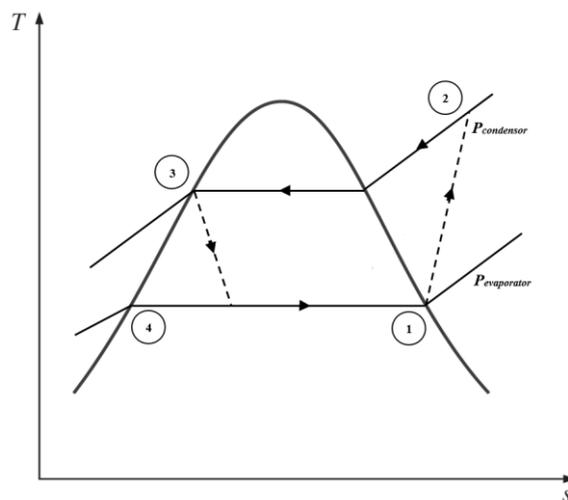
## 2.1 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA BOMBA

El vapor saturado resultante (estado 1) es comprimido hasta la presión de condensación (estado 2). Luego del intercambio de calor entre el refrigerante y el agua fría proveniente del tanque de almacenamiento, el refrigerante sale del condensador como líquido saturado (estado 3). La válvula de expansión genera un proceso expansivo (estado 4) para llevar el refrigerante a la unidad colector-evaporador, donde es evaporado mientras absorbe energía solar mediante el panel del colector [7].



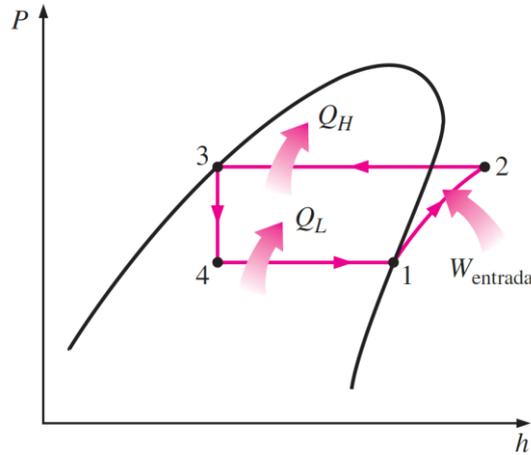
**Figura 19.** Bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa [7].

La primera ley de la termodinámica es el análisis energético, enfocado en la transferencia de calor y balance energético para la bomba; la segunda ley mide el máximo trabajo útil realizado por el equipo interactuando con su entorno [76].



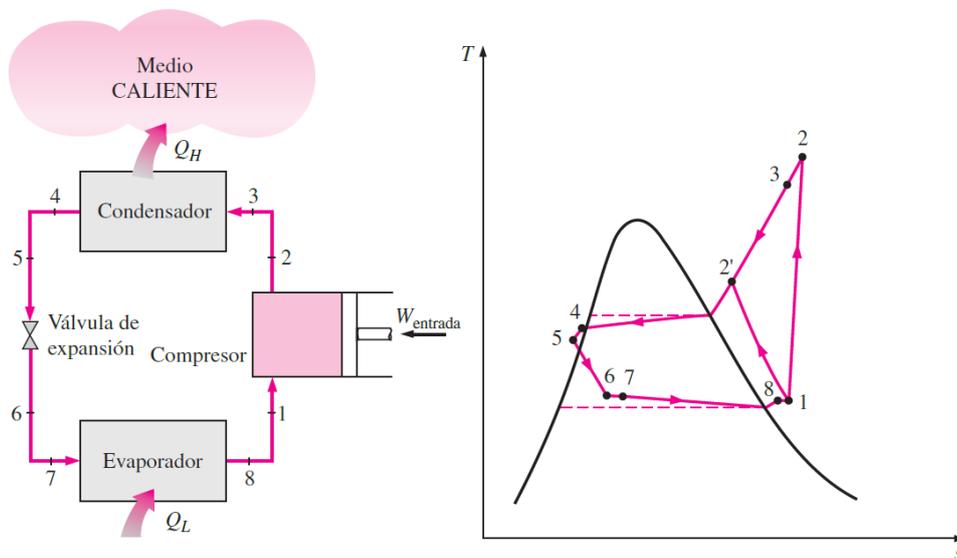
**Figura 20.** Diagrama T-s del ciclo de la bomba de calor de expansión directa [7].

Para el análisis termodinámico de una bomba de calor, adicionalmente se emplea el diagrama presión-entalpía (P-h). La Figura 21 muestra que la adición y rechazo de calor se realiza en un proceso isobárico, mientras que el proceso de estrangulamiento se lleva a cabo isoentálpicamente.



**Figura 21.** Diagrama P-h del ciclo de la bomba de calor de expansión directa [51].

Un ciclo ideal conlleva asumir varias condiciones que en la realidad no se cumplen; la Figura 22 presenta un ciclo de refrigeración por compresión de vapor real, en el cual, el vapor entra en un punto de sobrecalentamiento al compresor, y el proceso 1-2' es más deseable que el isentrópico, ya que se reduce el trabajo requerido por el compresor [51]; de igual manera, se presenta una caída de presión entre, la salida del compresor y la salida del condensador, y entre la entrada al evaporador y la entrada al compresor. Además, la temperatura de salida del condensador es inferior al punto de líquido saturado.



**Figura 22.** Diagrama T-s de un ciclo real de refrigeración [51].

## 2.2 ANÁLISIS DEL COLECTOR-EVAPORADOR

A continuación, se presenta el análisis matemático de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa que utiliza un colector solar de placas planas descubierto y sin aislamiento [71]. A pesar de ser dos configuraciones distintas, un colector solar descubierto y un colector solar con una cubierta presentan resultados similares para el dimensionamiento del colector, así como para seleccionar el compresor [8].

El calor ganado por el refrigerante en el colector-evaporador según [71, 12, 67] es:

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_r (h_{col,o} - h_{col,i}) \quad (25)$$

Donde:

$\dot{Q}_r$ : Tasa de calor ganado por el refrigerante en el colector-evaporador; [W]

$\dot{m}_r$ : Flujo másico del refrigerante en la placa; [kg · s<sup>-1</sup>]

$h_{col,i}$ : Entalpía del refrigerante a la entrada del colector; [J · kg<sup>-1</sup>]

$h_{col,o}$ : Entalpía del refrigerante a la salida del colector; [J · kg<sup>-1</sup>]

El calor útil ganado por el colector-evaporador es expresado por [71, 76, 8, 93, 13] como:

$$\dot{Q}_{col} = A_{col} F' [S - U_L (T_{rm} - T_a)] \quad (26)$$

Donde:

$\dot{Q}_{col}$ : Tasa de calor útil ganado por el colector-evaporador; [W]

$A_{col}$ : Área de la sección del colector-evaporador; [m<sup>2</sup>]

$F'$ : Factor de eficiencia del colector; [adimensional]

$S$ : Diferencia entre la radiación solar absorbida por el colector por unidad de área y la pérdida total de calor de radiación de la superficie del colector; [W · m<sup>-2</sup>]

$U_L$ : Coeficiente global de pérdida de calor de la placa colectora; [W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup>]

$T_{rm}$ : Temperatura promedio del refrigerante a la entrada y salida; [K]

$T_a$ : Temperatura absoluta del aire del ambiente; [K]

Al asumir que la resistencia térmica de la junta entre el colector y el tubo es despreciable, el factor de eficiencia del colector según [71, 94, 13] es:

$$F' = F + (1 - F)(d/w) \quad (27)$$

Donde:

$F$  : Eficiencia de la aleta; [adimensional]

$d$  : Diámetro externo del tubo; [m]

$w$  : Distancia entre los tubos; [m]

$F$  es evaluada por Kong *et al.* [71] y Duffie [80] usando la siguiente correlación:

$$F = \frac{\tanh U_b}{U_b} \quad (28)$$

Donde:

$U_b$  : Número adimensional

Este número adimensional expresado en concepto de la eficiencia de la aleta es [80, 71]:

$$U_b = \frac{w-d}{2} \sqrt{\frac{U_L}{\lambda \cdot \delta_p}} \quad (29)$$

Donde:

$\lambda$  : Conductividad térmica de la placa del colector; [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\delta_p$  : Espesor de la placa del colector; [m]

El coeficiente conductivo de transferencia de calor ( $\lambda$ ) para el aluminio puro tiene un valor de 237 [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] [90, 95, 96].

El símbolo  $S$ , según Kong *et al.* [71] e Ito *et al.* [94] es calculado mediante:

$$S = \alpha I_T - \varepsilon \dot{Q}_{sky} \quad (30)$$

Donde:

$\alpha$  : Absortividad del colector; [adimensional]

$I_T$  : Intensidad de la radiación solar global en el colector; [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$\varepsilon$  : Emisividad de la placa del colector; [adimensional]

Para la lámina comercial de aluminio, el valor de emisividad ( $\varepsilon$ ) es 0,1 [71]; mientras que el valor de la absorptividad ( $\alpha$ ) es de 0,09 [90, 96].

La diferencia entre la potencia emisiva por unidad de área de un cuerpo negro a la temperatura del aire ambiente y la potencia emisiva del cielo ( $\dot{Q}_{sky}$ ) es definida [71, 94]

mediante:

$$\dot{Q}_{sky} = \sigma T_a^4 - I_{sky} \quad (31)$$

Donde:

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann;  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

$I_{sky}$  : Radiación solar del cielo;  $[W \cdot m^{-2}]$

El símbolo  $U_L$ , para Kong *et al.* [71], Ito *et al.* [94], Paradeshi *et al.* [13] y Wang *et al.* [76] puede expresarse mediante:

$$U_L = c_v + 4 \varepsilon \sigma T_a^3 \quad (32)$$

Coefficiente convectivo de transferencia de calor ( $c_v$ ) es igual a [12, 80]:

$$c_v = 2,8 + 3 s_w \quad (33)$$

Donde:

$s_w$  : velocidad del viento;  $[m \cdot s^{-1}]$

### 2.3 ANÁLISIS DEL COMPRESOR

El método de parámetros agrupados se utiliza para establecer el modelo matemático del compresor. Para un tipo rotativo de pequeña escala y un compresor hermético, el flujo másico de refrigerante ( $\dot{m}_r$ ) es dado por [71, 94, 14, 97]:

$$\dot{m}_r = \frac{s_{rot} \eta_V V_d}{60 v_{suc}} \quad (34)$$

Donde:

$s_{rot}$ : Velocidad rotativa del compresor; [rpm]

$v_{suc}$ : Volumen específico del refrigerante a la entrada del compresor; [ $m^3 \cdot kg^{-1}$ ]

$\eta_V$ : Eficiencia volumétrica del compresor; [adimensional]

$V_d$ : Volumen de desplazamiento del compresor; [ $m^3$ ]

La eficiencia volumétrica asumida por Chen *et al.* [14], Den *et al.* [97] y Brunin *et al.* [98] es:

$$\eta_V = 0,959 - 0,00642 \frac{P_{dis}}{P_{suc}} \quad (35)$$

Donde:

$p_{suc}$ : Presión de succión del compresor; [Pa]

$p_{dis}$ : Presión de descarga del compresor; [Pa]

En un balance de energía, el consumo eléctrico del compresor ( $\dot{W}_{comp}$ ) según Bridgeman [67], Chen *et al.* [14] y Yousefi *et al.* [12] se encuentra por:

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_r (h_{com,o} - h_{com,i}) \quad (36)$$

Donde:

$h_{comp,i}$ : Entalpía del refrigerante a la entrada del compresor; [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$h_{comp,o}$ : Entalpía del refrigerante a la salida del compresor; [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

La caída de presión a la entrada y salida del compresor es despreciable; Kong *et al.* [71], Hawlader *et al.* [99] y Yu [100] obtienen el consumo eléctrico del compresor mediante:

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_r \frac{p_{suc} v_{suc}}{\eta_{com}} \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_{dis}}{p_{suc}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (37)$$

Donde:

$\eta_{comp}$  : Eficiencia total del compresor; [adimensional]

$k$  : Relación de calores específicos del refrigerante; [adimensional]

La relación  $k$ , para el refrigerante R134a tiene un valor de 1,23 [71].

La temperatura de descarga del compresor, según a Kong *et al.* [71], Kokila *et al.* [93] y Keliang *et al.* [91] es dada por:

$$T_{dis} = T_{suc} \left( \frac{p_{dis}}{p_{suc}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (38)$$

Donde:

$T_{suc}$  : Temperatura absoluta de succión del compresor; [K]

$T_{dis}$  : Temperatura absoluta de descarga del compresor; [K]

## 2.4 ANÁLISIS DEL CONDENSADOR

Un condensador está compuesto por un tubo serpentín de cobre inmerso en el tanque de agua caliente. El balance de energía en el condensador, según Ito *et al.* [94], Bridgeman [67] y Huang *et al.* [10] permite conocer el calor ganado por:

$$\dot{Q}_{con} = \dot{Q}_{col} + \dot{W}_{comp} \quad (39)$$

Donde:

$\dot{Q}_{con}$  : Flujo de calor ganado por el condensador; [W]

$\dot{Q}_{col}$  : Tasa de calor útil ganado por el colector-evaporador; [W]

$\dot{W}_{comp}$  : Tasa de energía consumida por el compresor; [W]

El calor ganado por el agua en el tanque del condensador [71, 68, 61, 52, 94, 101] es:

$$\dot{Q}_w = M_w c_p \frac{dT_w}{dt} = M_w c_p \frac{T_{w,o} - T_{w,i}}{t} \quad (40)$$

Donde:

$\dot{Q}_w$  : Flujo de calor ganado por el agua del tanque del condensador; [W]

$M_w$  : Masa total de agua en el tanque; [kg]

$c_p$  : Calor específico del agua; [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$T_{w,i}$  : Temperatura inicial del agua; [ $^{\circ}C$ ]

$T_{w,o}$  : Temperatura final del agua; [ $^{\circ}C$ ]

$t$  : Intervalo de tiempo desde  $T_{w,i}$  hasta  $T_{w,o}$ ; [s]

Un balance térmico el tanque de almacenamiento de agua es realizado por Li *et al.* [102], Kokila *et al.* [93] y Triphati *et al.* [52], obteniendo la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_{con} - U_L A_{tan} (T_{w,i} - T_a) \quad (41)$$

Donde:

$A_{tan}$  : Área total de transferencia de calor de las paredes del tanque; [ $m^2$ ]

El coeficiente global de transferencia de calor basado en el área exterior del tubo del condensador ( $U_{con}$ ), para Kong *et al* [71] puede ser calculado mediante:

$$U_{con} = \frac{1}{\frac{A_{con,o}}{c_{v,i} A_{con,i}} + \frac{e_{con} A_{con,o}}{\lambda_{con} A_{con,m}} + \frac{1}{c_{v,w}}} \quad (42)$$

Donde:

$c_{v,i}$  : Coeficiente convectivo de transferencia de calor entre el refrigerante y la superficie de la pared interior del tubo del condensador; [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$c_{v,w}$  : Coeficiente convectivo de transferencia de calor entre el agua y la pared exterior del tubo del condensador; [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$A_{con,i}$  : Área interior del tubo del condensador; [ $m^2$ ]

$A_{con,o}$  : Área exterior del tubo del condensador; [ $m^2$ ]

$A_{con,m}$  : Área media del tubo del condensador; [ $m^2$ ]

$e_{con}$  : Espesor del tubo del condensador; [ $m$ ]

$\lambda_{con}$  : Conductividad térmica del tubo del condensador; [ $W \cdot m^{-1} \cdot K$ ]

El coeficiente de conductividad térmica del cobre (bronce comercial, 90% Cu, 10% Al) tiene un valor de  $52 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  [96, 90].

El coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $c_{v,i}$ ) del refrigerante R134a, según Wattelet *et al.* [103] y Dalkilic *et al.* [104], puede ser calculado mediante:

$$c_{v,i} = \frac{\dot{Q}_{col}}{A_{con,i} (T_{rm,con} - T_{w,i})} \quad (43)$$

## 2.5 ANÁLISIS DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN

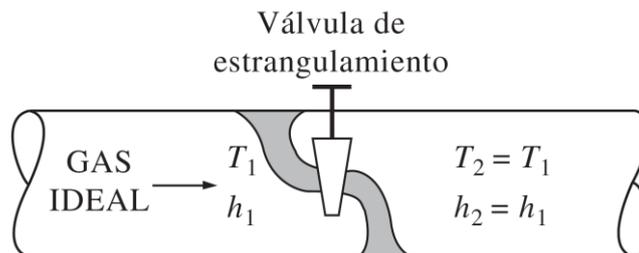
En una válvula termostática [67], el proceso de expansión se considera aproximadamente isoentálpico. Entonces se tiene que [71, 94, 39, 105, 106]:

$$h_{val,i} = h_{val,o} \quad (44)$$

Donde:

$h_{val,i}$  : Entalpía específica del refrigerante a la entrada a la válvula de expansión; [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$h_{val,o}$  : Entalpía específica del refrigerante a la salida de la válvula de expansión; [ $J \cdot kg^{-1}$ ]



**Figura 23.** Proceso de estrangulamiento [51].

## 2.6 RENDIMIENTO DEL SISTEMA

Estudios de Malali *et al.* [7] han demostrado que una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa puede alcanzar valores de COP muy altos, en el rango de 2 a 6, dependiendo del aire del ambiente, así como de la temperatura de descarga. El coeficiente de funcionamiento (COP) de la bomba de calor es obtenido mediante [71, 94, 14, 68, 61]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{W}_{comp}} = \frac{h_{con,o} - h_{con,i}}{h_{comp,o} - h_{comp,i}} \quad (45)$$

Donde:

$COP$ : Coeficiente de funcionamiento de la bomba de calor; [adimensional]

$\dot{Q}_{con}$ : Calor ganado en el condensador; [W]

$\dot{W}_{comp}$ : Potencia instantánea del compresor; [W]

$h_{con,i}$ : Entalpía del refrigerante a la entrada del colector; [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$h_{con,o}$ : Entalpía del refrigerante a la salida del colector; [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$h_{comp,i}$ : Entalpía del refrigerante a la entrada del compresor; [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$h_{comp,o}$ : Entalpía del refrigerante a la salida del compresor; [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

Entonces, la bomba de calor a diseñar es asistida por energía solar, por lo que depende directamente de la radiación solar que incide sobre el colector; este valor debe ser determinado tomando los valores de ángulos solares y la radiación medida, para el posterior análisis de la radiación solar extraterrestre, atmosférica, difusa, y así calcular el valor de la radiación solar global.

Una bomba de calor debe ser estudiada dentro de un ciclo de refrigeración ideal; a partir de esto, se puede establecer la concordancia que deben tener los valores obtenidos con respecto a la gráfica T-s del refrigerante R-134a. Dentro de la gráfica T-s, con los valores de presión y temperatura registrados en los ensayos, se puede verificar el estado del refrigerante en cada etapa: vapor sobrecalentado a la entrada y salida del compresor, líquido saturado o subenfriado a la salida del condensador y vapor condensado (mezcla) a la entrada al colector-evaporador.

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los ensayos y pruebas de funcionamiento para validar el correcto funcionamiento del equipo, así como los resultados comparativos de diferentes parámetros bajo diferentes condiciones horarias y climáticas.

#### 3.1 INFORMACIÓN TÉCNICA DE LA BOMBA DE CALOR

La bomba de calor en estudio está basada en un colector solar de placa plana, un condensador de tubo de cobre, una válvula de expansión electrostática y un compresor de velocidad variable, además el fluido de trabajo es refrigerante R-134a. Las características de cada uno de los componentes se detallan a continuación:

**Tabla 6.** Parámetros empleados en la bomba de calor.

SISTEMA	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
COMPRESOR	Sistema: tipo un pistón	velocidad variable
	Velocidad rotacional (máx)	3 500 [r.p.m.]
	Desplazamiento	$2 \cdot 10^{-6}$ [ $m^3$ ]
	Refrigerante R134a (carga)	0,1 [kg]
CONDENSADOR	Masa de agua en el tanque	5 [kg]
	Área del tanque	0,1261 [ $m^2$ ]
	Área exterior del tubo	0,0349 [ $m^2$ ]
	Área interior del tubo	0,0301 [ $m^2$ ]
	Espesor del tubo	$7,62 \cdot 10^{-4}$ [m]
	Conductividad térmica (bronce comercial, 90% Cu, 10% Al)	52 [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
	COLECTOR - EVAPORADOR	Área de la placa
Espesor de la placa		0,0015 [m]
Absortividad de la placa		0,09
Emisividad de la placa		0,1
Diámetro externo de los tubos		0,01 [m]
Distancia entre los tubos		0,026 [m]
Conductividad térmica (aluminio puro)		237 [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

### 3.2 ENSAYOS

Para las pruebas de funcionamiento del equipo se realizaron cuatro procesos de calentamiento por día cada 45 minutos, con un intervalo de 5 minutos entre cada toma de datos. Los valores máximos, mínimos y promedio se presentan a continuación:

**Tabla 7.** Información de los días de ensayos

	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
Fecha	26/Oct/2017	30/Oct/2017	02/Nov/2017	6/Nov/2017	09/Nov/2017
Condición Climática	Despejado	Lluvioso	Nublado	Nublado	Despejado
Compresor [r.p.m.]	3 600	2 400	1 200	3 600	2 400
T. Ambiente [°C]	22,8	16,4	21,4	23,4	25,3
Rad. Mínima [ $W \cdot m^{-2}$ ]	265,8	42,8	236,8	308,1	451,5
Rad. Máxima [ $W \cdot m^{-2}$ ]	1074,0	708,8	769,7	911,0	822,7
Rad. Promedio [ $W \cdot m^{-2}$ ]	642,2	210,5	466,0	678,7	665,7
Temp. Máxima del Agua [°C]	41,9188	34,8899	31,3820	39,9954	40,4553

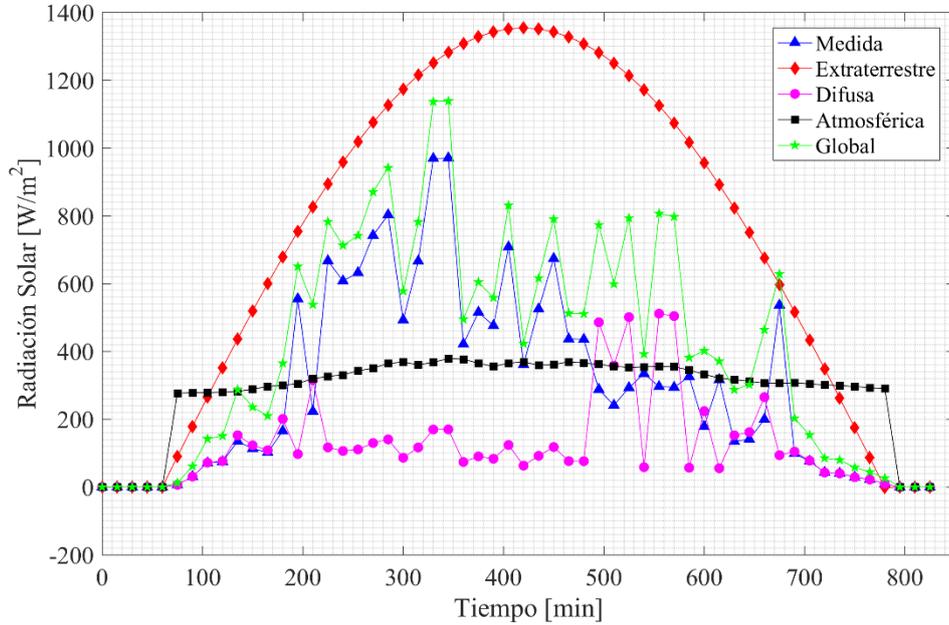
### 3.3 DATOS DE RADIACIÓN

Una estación meteorológica inalámbrica alimentada con energía solar fue empleada para tomar medida de la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad de viento. Referente al estudio realizado en el Capítulo II, la radiación global total disponible es la sumatoria de varias componentes, en la cual se considera la radiación difusa, la radiación medida y otros factores, tales como la reflectancia de la superficie, el ángulo de inclinación y un factor geométrico entre una superficie inclinada ante una horizontal.



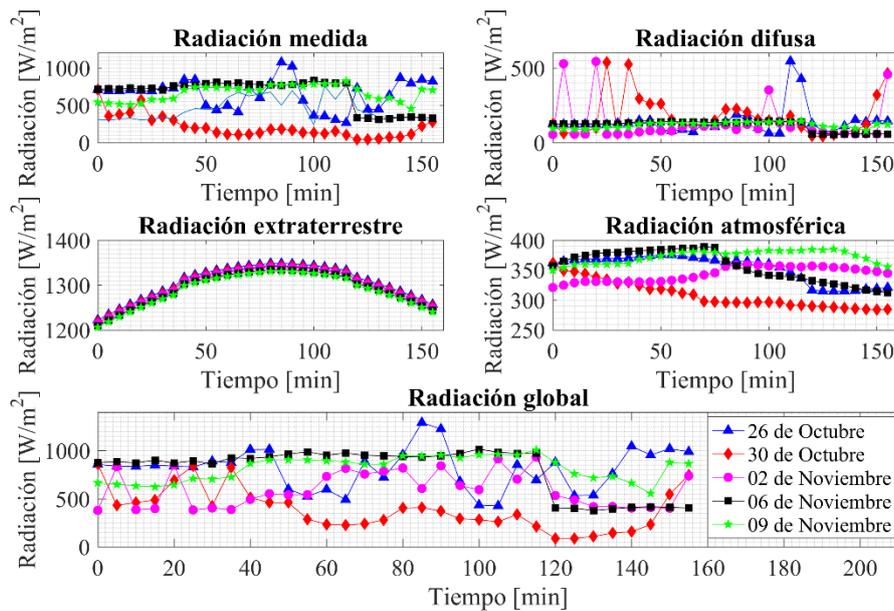
**Figura 24.** Estación meteorológica WS-1201 [107].

En resumen, datos tomados el 16 de septiembre, reflejan un valor máximo de radiación medida de  $970,5 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}]$  a las 10:46; por otro lado, la radiación global total, con referencia a la medida, toma un valor de  $1138,3883 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}]$ . La Figura 25 presenta la variación de la radiación solar, y la comparación entre sus componentes:



**Figura 25.** Variación de la radiación solar (16-Sep-2017).

A partir de la utilización de los ángulos solares, en conjunto con la temperatura ambiente y la radiación medida, es posible determinar la radiación global. A continuación, la Figura 26 muestra la variación de cada una de las componentes de la radiación solar:



**Figura 26.** Radiación solar.

### 3.4 DATOS DE TEMPERATURA AMBIENTE Y VELOCIDAD DEL VIENTO

La temperatura ambiente influye directamente en la determinación del valor de radiación global total. A continuación, en la Figura 27 se presentan los resultados de las pruebas:

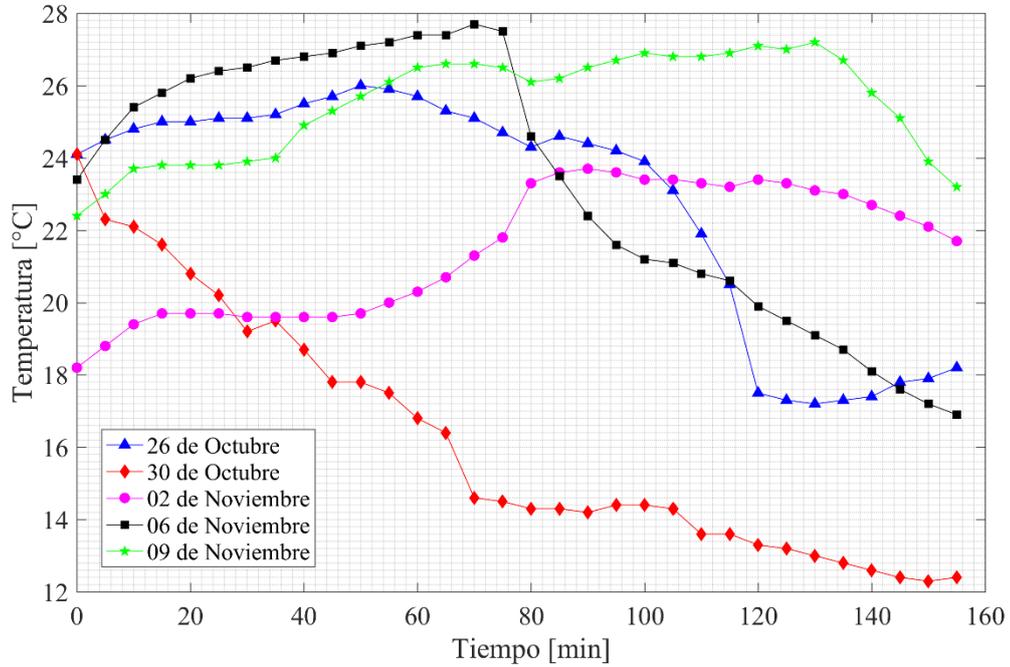


Figura 27. Variación de la temperatura ambiente.

La velocidad del viento es el parámetro determinante para determinar el coeficiente convectivo entre el medio y el colector-evaporador.

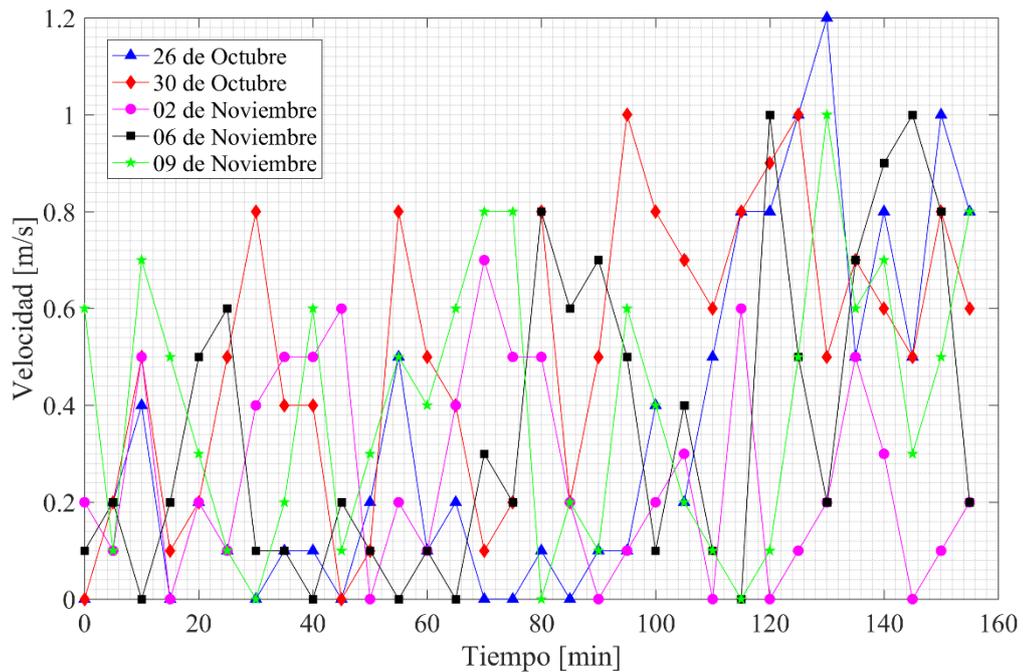
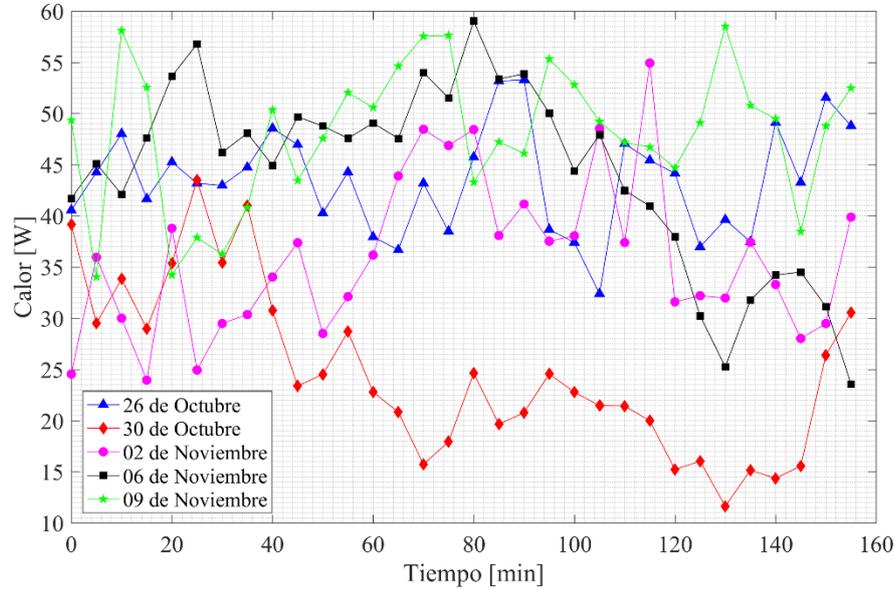


Figura 28. Variación de la velocidad del viento.

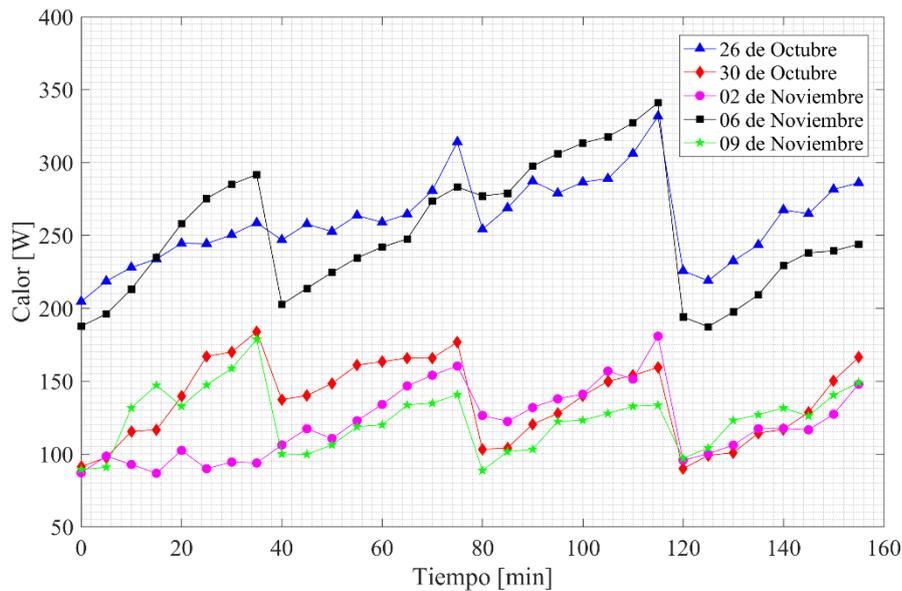
### 3.5 DATOS DE CALOR

La radiación solar incide sobre el colector-evaporador, dentro del cual, el refrigerante R134a se encuentra circulando; éste gana calor al enfriar la placa plana. Los resultados de este valor se presentan en la Figura 29:



**Figura 29.** Calor ganado por el R-134a en el colector.

El fluido de trabajo es transmitido del colector-evaporador hacia el condensador; el condensador es un serpentín de tubería de cobre dentro del cual el refrigerante va a liberar el calor adquirido hacia el tanque de almacenamiento de agua. La Figura 30 muestra la variación de este valor en el período de ensayo:



**Figura 30.** Calor total ganado en el condensador

### 3.6 DATOS DEL COMPRESOR

El compresor utilizado es de velocidad variable, presenta un desplazamiento de  $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ ; la potencia que requiere el compresor para su funcionamiento en cada instante de análisis es presentada en la Figura 31:

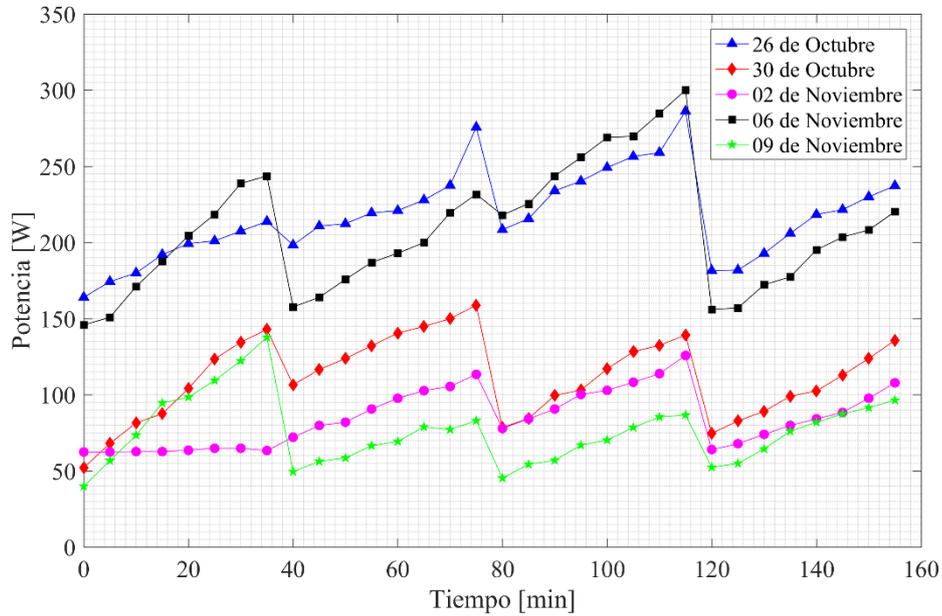


Figura 31. Potencia requerida por el compresor.

Debido a la característica de velocidad rotacional variable del compresor, el flujo másico de refrigerante que circula también varía dependiendo de otros parámetros. A continuación, en la Figura 32 se presenta esta variación de flujo másico en los ensayos:

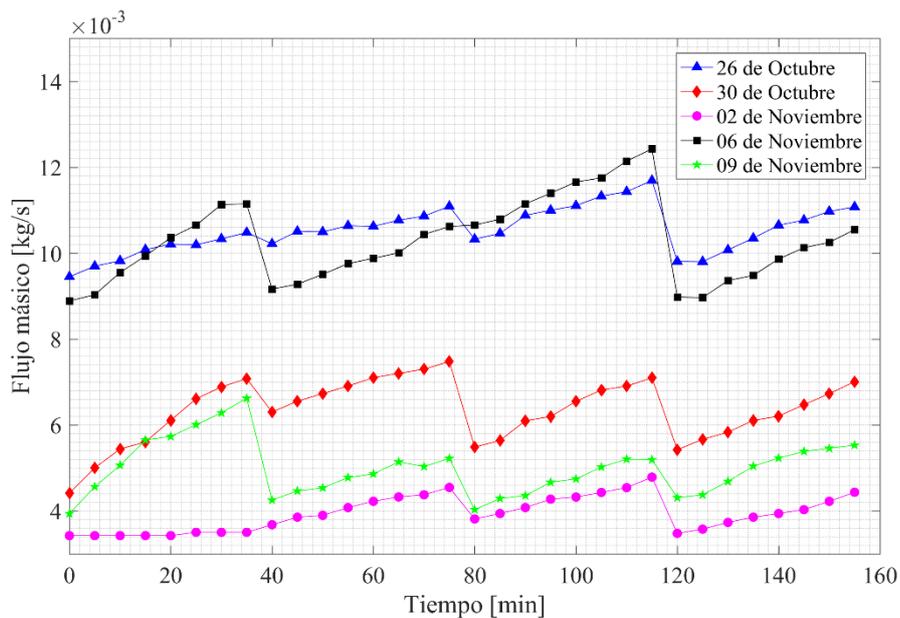
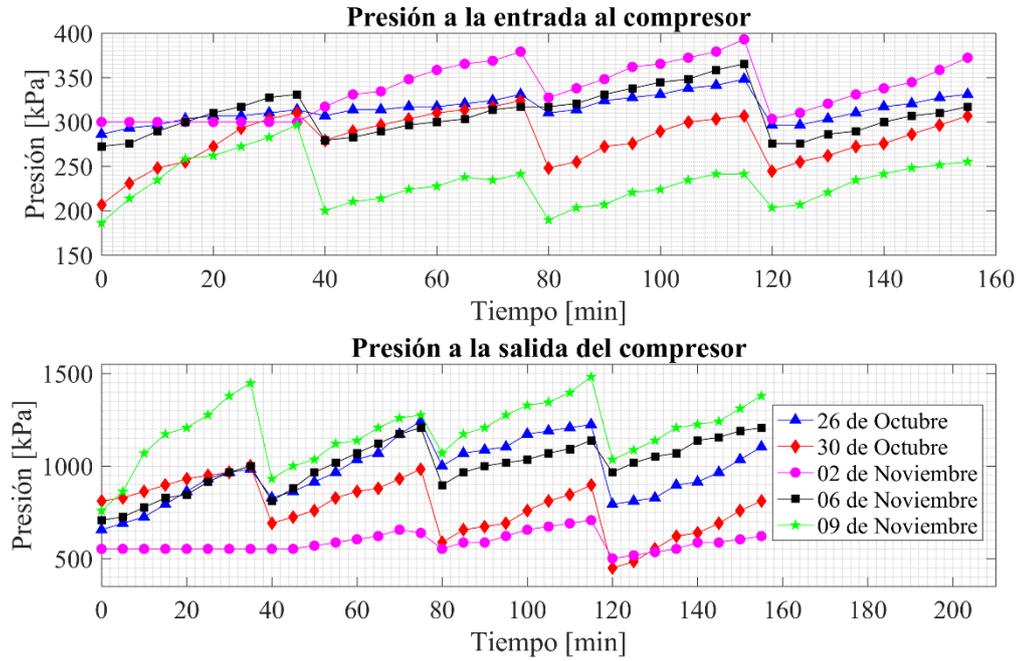


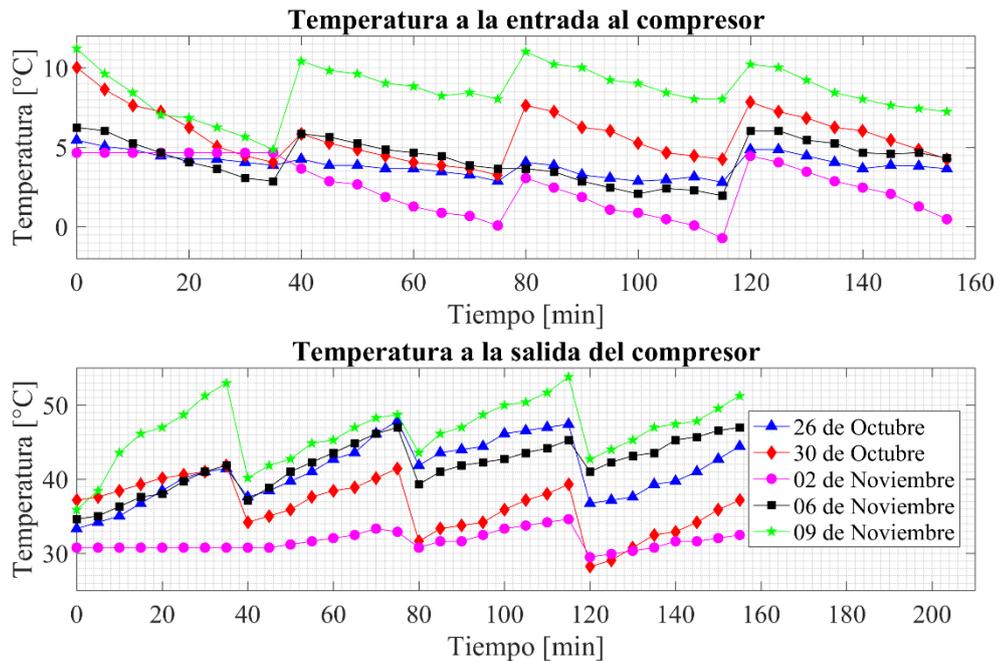
Figura 32. Variación de flujo másico del R-134a.

El compresor trabaja con refrigerante sobrecalentado, por lo que presenta presiones elevadas durante su funcionamiento. La Figura 33 muestra la variación de las presiones durante los ensayos:



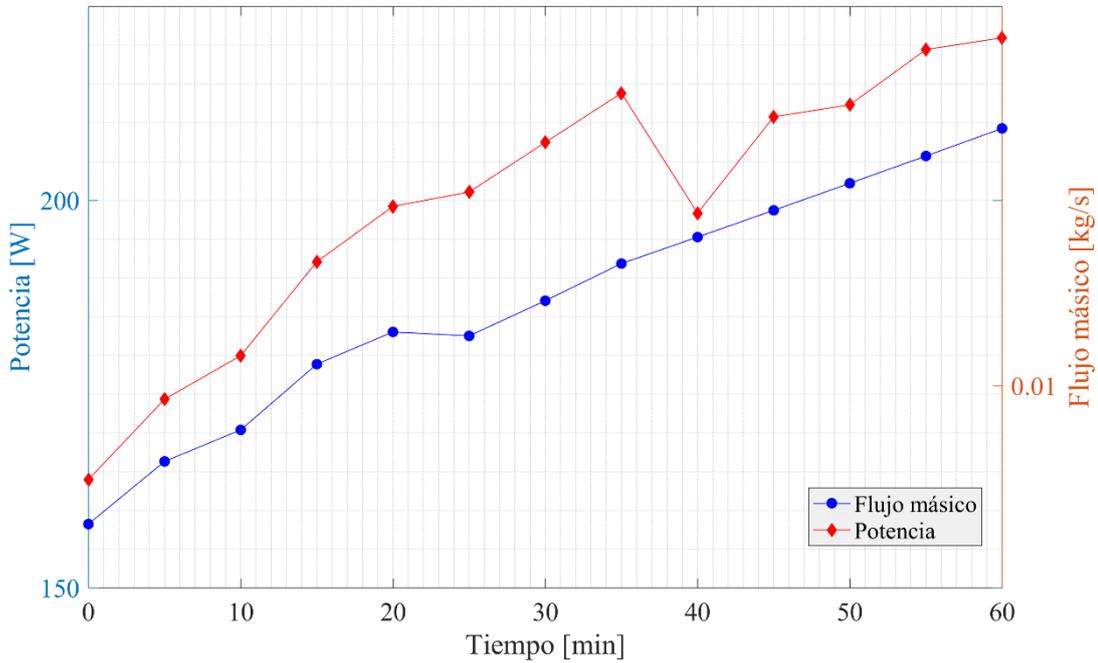
**Figura 33.** Presiones de operación en el compresor.

El proceso de compresión eleva la temperatura y presión del refrigerante; la variación de temperaturas en el compresor es presentada a continuación en la Figura 34.



**Figura 34.** Temperaturas de operación del compresor.

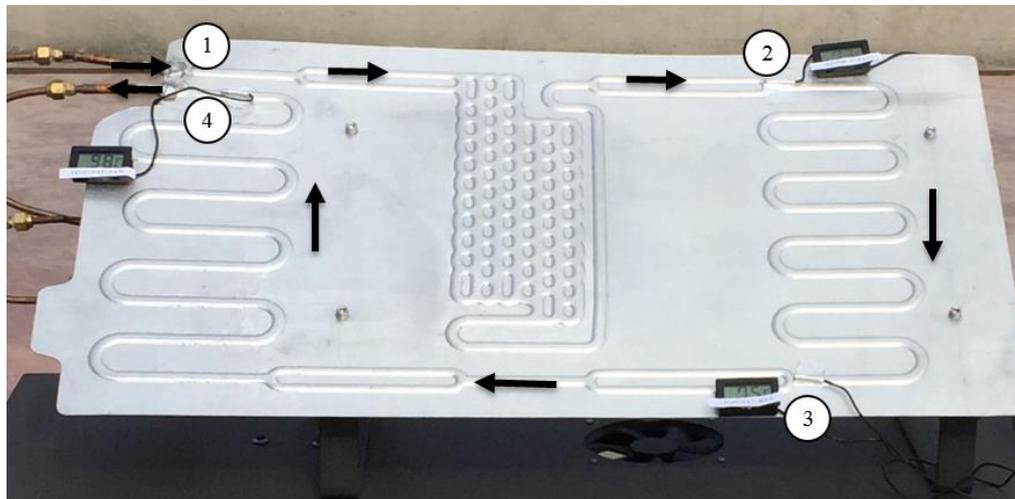
Adicionalmente, la Figura 35 presenta la comparación del trabajo requerido por el compresor y el flujo másico de refrigerante circulante.



**Figura 35.** Relación entre la potencia del compresor y el flujo másico.

### 3.7 TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE EN EL COLECTOR

El accionamiento del compresor permite el flujo de refrigerante a través de todos los dispositivos que componen el sistema; en el colector-evaporador se hallan ubicadas cuatro termocuplas, por medio de las cuales se puede apreciar la variación en la temperatura del R.134a. El refrigerante entra a baja temperatura y va elevando su temperatura al absorber el calor que la placa plana recibe por la radiación solar.



**Figura 36.** Termocuplas colocadas en el colector.

La variación de cada una de estas temperaturas se presenta en la Figura 37:

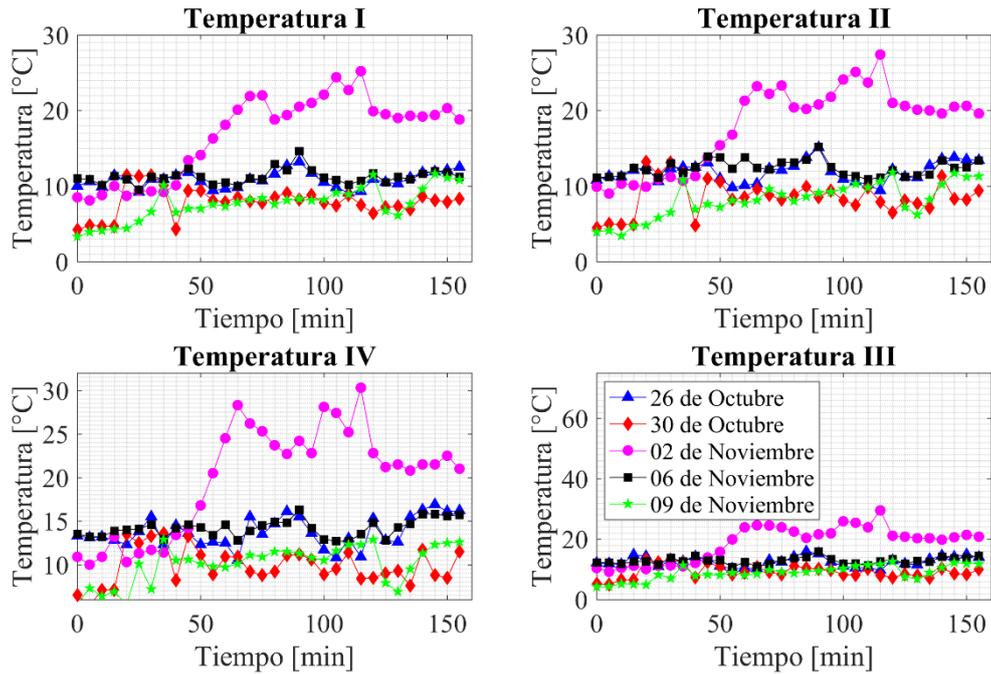


Figura 37. Variación de la temperatura del R-134a en el colector.

### 3.8 TEMPERATURA DEL AGUA

El proceso para obtener agua caliente empieza al llenar el tanque con agua fría, a una temperatura inicial promedio de 17 °C; la capacidad de la bomba puede llegar a calentar agua hasta 47,6 °C, sin embargo, se puede definir una temperatura límite; la temperatura a tener de referencia fue determinada en 37 °C. Una vez alcanzada la temperatura requerida, se procede a vaciar el tanque y llenarlo nuevamente con agua fría.

La Figura 38 indica el incremento de temperatura que presenta el agua en un intervalo de tiempo determinado, cada 45 minutos.

La caída en el valor es el indicativo que se inicia un nuevo proceso de calentamiento:

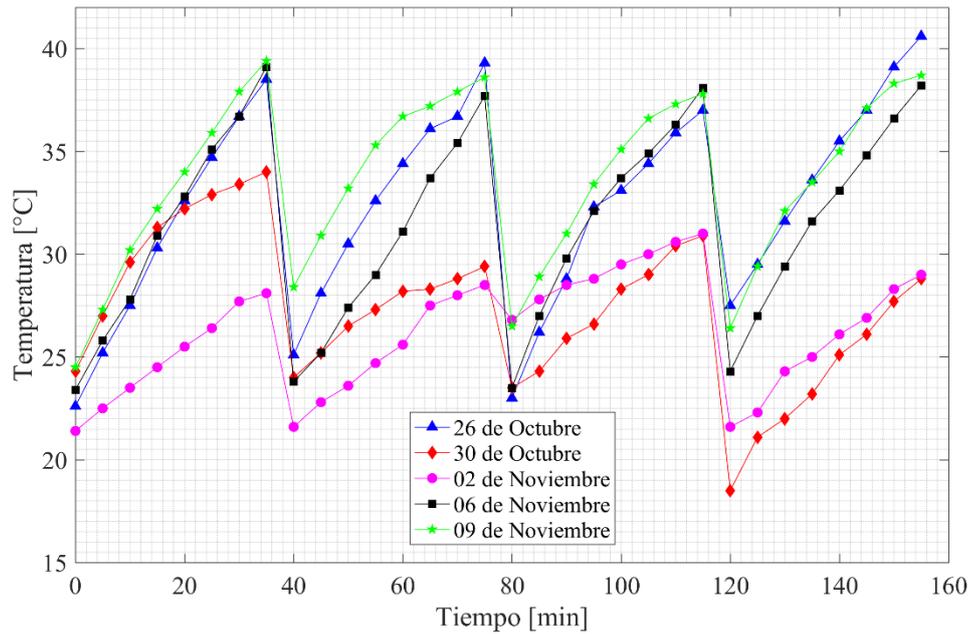


Figura 38. Incremento en la temperatura del agua.

### 3.9 RENDIMIENTO DEL SISTEMA

El coeficiente de desempeño (COP) relaciona la cantidad de calor cedida al medio, con respecto a la cantidad de entrada que se requiere para realizar el trabajo.

En la Figura 39 se presenta la variación de COP durante las pruebas:

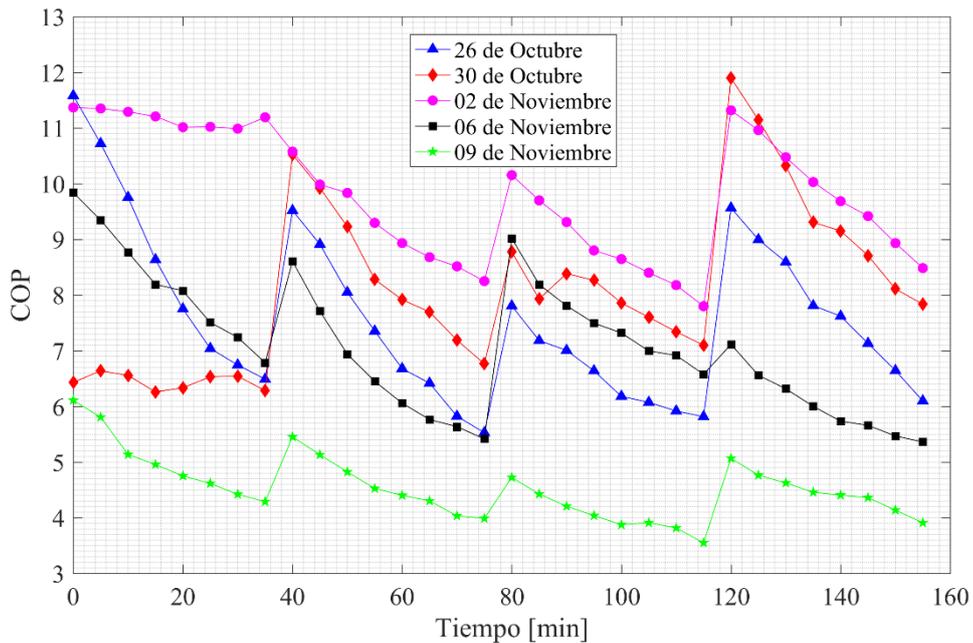
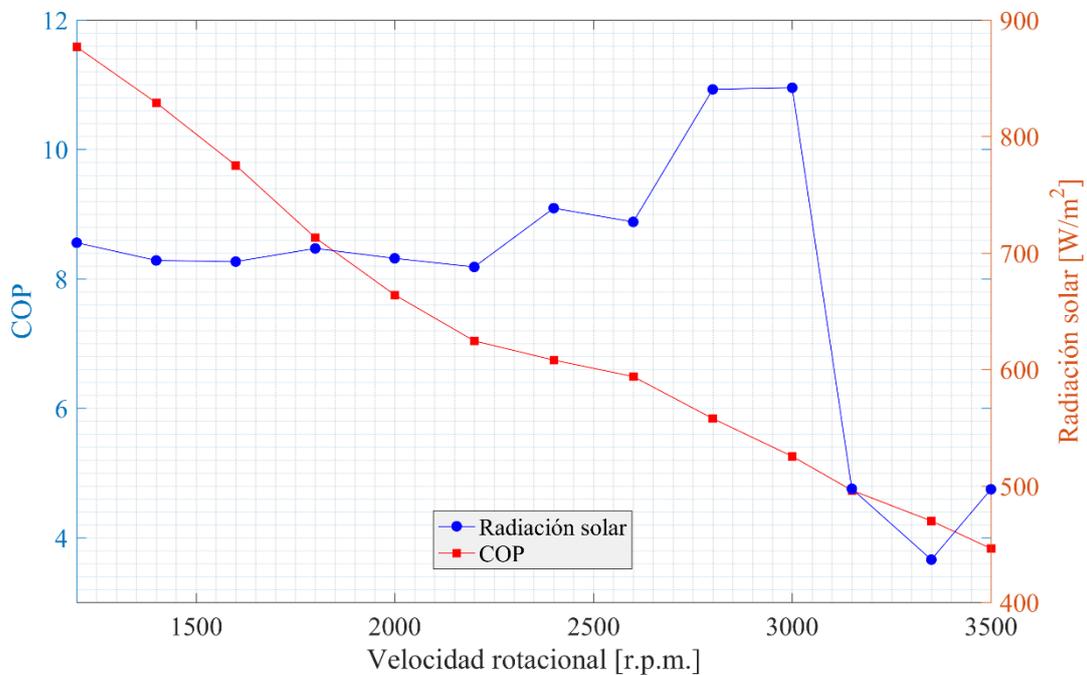


Figura 39. Coeficiente de desempeño (COP).

El COP del sistema disminuye conforme se aumenta la velocidad rotacional del compresor, y de igual manera, va a depender de la intensidad de radiación solar que incide sobre el colector-evaporador. La Figura 40 presenta la variación del COP ante estos parámetros:



**Figura 40.** Variación del COP vs la velocidad rotacional vs radiación solar.

De las pruebas realizadas se puede afirmar que, sin importar las condiciones climáticas, la bomba de calor puede seguir calentando agua debido a las propiedades del refrigerante R-134a. Sin embargo, se puede apreciar que, con altos niveles de radiación, la temperatura ambiente va a tener valores elevados, así como el colector-evaporador va a mantener una temperatura alta, lo que conlleva a un proceso de calentamiento más rápido, y logrando alcanzar valores de temperatura final del agua superiores.

La regulación de la velocidad de giro del compresor permite reducir la potencia requerida a bajas revoluciones, pero el compresor necesita esforzarse más para desplazar una cantidad de refrigerante por el sistema; esto conlleva a un recalentamiento.

La temperatura máxima alcanzada por el agua es de 47,6 °C en un período de 90 minutos. Transcurrido este tiempo, el sistema trata de mantener un equilibrio térmico; como la temperatura del agua se mantiene estable, el calor ganado por el refrigerante es liberado en otros sistemas, ocasionando el calentamiento de la placa plana, así como del compresor.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS ECONÓMICO

El presente capítulo presenta el análisis económico correspondiente al equipo construido. Se detalla los costos de los equipos adquiridos, la materia prima y la mano de obra requeridos para la construcción y ensamblaje de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa.

#### 4.1 LISTADO DE EQUIPOS Y MATERIALES

El costo total de los equipos, materiales e insumos requeridos para la puesta en funcionamiento de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa es de *USD 7 300*

La Tabla 8 muestra los insumos y equipos necesarios para completar la construcción, ensamblaje y funcionamiento de la bomba de calor:

**Tabla 8.** Descripción y costo de los materiales, equipos y suministros comprados.

DESCRIPCIÓN	CANT	PRECIO UNITARIO [USD]	PRECIO TOTAL [USD]
Placas Roll bond	1	970,25	970,25
Compresor de velocidad variable BD35F Danfoss	1	908,76	908,76
Variador de frecuencia 101NO212	1	886,52	886,52
Banco de paneles fotovoltaicos	2	312,25	624,50
Batería GGFM100(12v100ah/10hr)	1	418,77	418,77
Estructura para colector de placas	1	400,00	400,00
Válvula de expansión para refrigerante 134A TE2	1	365,00	365,00
Placa impresión UPS	1	250,00	250,00
Controlador de temperatura PID con salida de 4 a 20 mm	5	48,00	240,00
Tanque acrílico transparente 1,45 m3	1	220,00	220,00
Refrigerante 134A Tanque	1	200,85	200,85
Estructura para paneles solares	1	200,00	200,00
Tuercas de bronce reforzada 1/4"	34	5,00	170,00

**Tabla 8.** Descripción y costo de los materiales, equipos y suministros comprados.  
(Continuación)

DESCRIPCIÓN	CANT	PRECIO UNITARIO [USD]	PRECIO TOTAL [USD]
Contador 24x48 mm 8 dígitos	1	141,12	141,12
Válvulas de bola de 1/4" Danfoss	5	28,00	140,00
Tubería de cobre flexible para línea de alta 15 metros 1/4"	1	130,35	130,35
Tubería de cobre flexible para línea de baja 15 metros 3 /16"	1	130,35	130,35
Presostato de alta y baja con reseteo manual Danfoss	1	119,65	119,65
Oxígeno	1	100,70	100,70
Manómetros de baja quality	2	36,00	72,00
Manómetros de alta quality	2	35,00	70,00
Cable flexible #12 negro	1	64,00	64,00
Filtro secador 1/4" conexión NTP	1	60,26	60,26
Rubatex 1/4"	5	10,80	54,00
Gas Worthington	1	50,00	50,00
Sueldas	10	5,00	50,00
Válvulas de bola paso total de 1/4" Danfoss	1	48,00	48,00
Relé G2R2SNDC12S	1	33,04	33,04
Ventilador 12V	1	33,00	33,00
Visor de 1/4" conexión NPT Danfoss	1	30,00	30,00
Cable flexible #16 rojo	1	27,00	27,00
Breaker para Riel DIM2x10A	4	6,00	24,00
Pitillos de toma de presión	8	3,00	24,00
Tee de 1/4" de bronce	5	3,77	18,85
Borneras para riel DIM	20	0,40	8,00
Canaleta ranurada 1 metro	1	3,30	3,30
Terminales punteras #12 (50 unidades)	1	3,10	3,10
Potenciómetro	1	3,00	3,00
Riel DIM	1	3,00	3,00
Terminales punteras #16 (50 unidades)	1	1,70	1,70

## 4.2 COSTO DE CALENTAMIENTO DE CADA m<sup>3</sup>

La Empresa Eléctrica Quito [108] presenta el pliego tarifario vigente a enero del 2016:

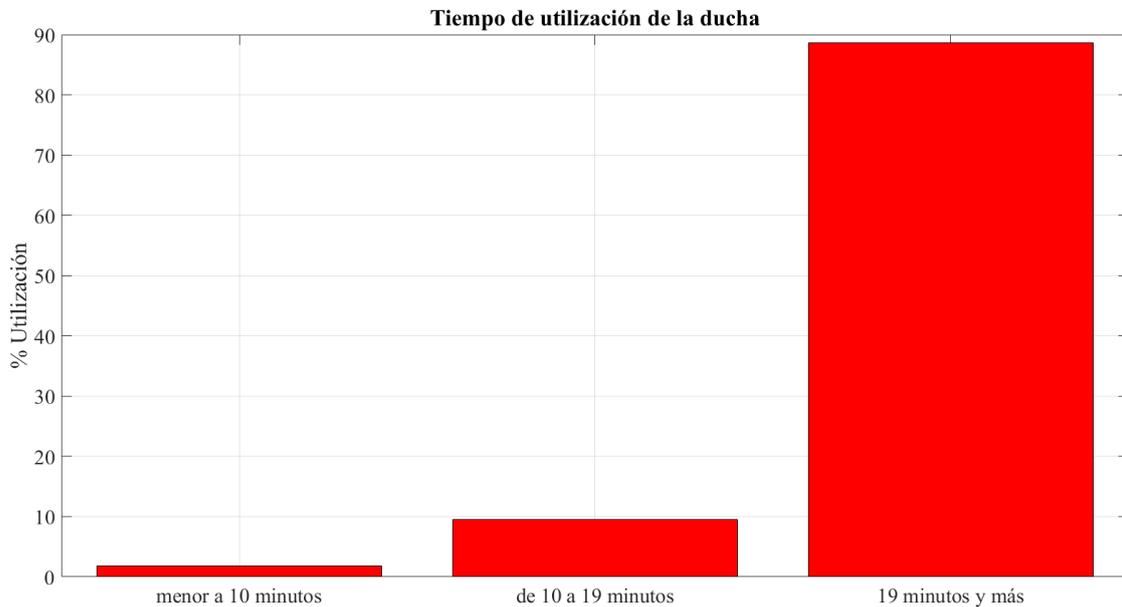
**Tabla 9.** Pliego Tarifario Vigente a enero del 2016 [108].

<b>RANGO DE CONSUMO</b> ( <i>kW·h</i> )	<b>CARGOS TARIFARIOS</b> ( <i>USD</i> )	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Residencial		Se aplica a los consumidores sujetos a la categoría de Tarifa Residencial, independiente de la carga conectada. Por cada <i>kW·h</i> de consumo en el mes
0 – 50	0,0784	Por cada <i>kW·h</i>
51 – 100	0,0814	Por cada uno de los siguientes 50 <i>kW·h</i>
101 – 150	0,0834	Por cada uno de los siguientes 50 <i>kW·h</i>
151 – 200	0,0904	Por cada uno de los siguientes 50 <i>kW·h</i>
201 – 250	0,0974	Por cada uno de los siguientes 50 <i>kW·h</i>
251 – 500	0,0994	Por cada uno de los siguientes 250 <i>kW·h</i>
501 – 700	0,1285	Por cada uno de los siguientes 200 <i>kW·h</i>
701 – 1000	0,145	Por cada uno de los siguientes 300 <i>kW·h</i>
1001 – 1500	0,1709	Por cada uno de los siguientes 500 <i>kW·h</i>
1501 – 2500	0,2752	Por cada uno de los siguientes 1000 <i>kW·h</i>
2501 – 3500	0,436	Por cada uno de los siguientes 1000 <i>kW·h</i>
3501 y superior	0,6812	Por cada uno de los siguientes <i>kW·h</i>

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), el promedio de consumo de energía eléctrica en el área urbana es 155 *kW·h*. Quito es la cuarta ciudad en el país que más paga por energía eléctrica, con un promedio mensual de *USD* 18,52 [109].

Al considerar el promedio de consumo mensual, un hogar ecuatoriano está ubicado en el rango de 151–200 *kW·h*, por tanto, se asume que 1 *kW·h* tiene un costo de *USD* 0,0904.

En la mayoría de hogares ecuatorianos, a diario se utiliza la ducha por alrededor de 20 minutos [110].



**Figura 41.** Tiempo de baño diario por hogar [110].

Una ducha eléctrica requiere  $5,5 \text{ kW}$  en su funcionamiento [111]. Entonces, el costo en Quito por usar una ducha eléctrica por 20 minutos al día es:

$$5,5 \text{ kW} \cdot 20 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 0,0904 \frac{\text{USD}}{\text{kW} \cdot \text{h}} = \text{USD } 0,17$$

Por lo que se concluye que el consumo eléctrico de una ducha eléctrica de  $5,5 \text{ kW}$  durante 20 minutos genera un gasto de  $\text{USD } 18,20$  al mes, al adicionar  $\text{USD } 13,10$ , que son los rubros presentados en la planilla de consumo eléctrico mensual: el costo de comercialización y de alumbrado público ( $\text{USD } 1,41$  y  $\text{USD } 2,43$ , respectivamente), así como el tributo cuerpo de bomberos de  $\text{USD } 1,88$  y la tasa de recolección de basura de  $\text{USD } 7,38$ .

El costo global que tiene el  $\text{kW} \cdot \text{h}$  puede ser definido, ya que  $5,5 \text{ kW}$  al día, durante cinco minutos es  $1,83 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , y por tanto  $55 \text{ kW} \cdot \text{h}$  al mes; de esta manera se tiene que:

$$\frac{18,20 \text{ USD}}{55 \text{ kW} \cdot \text{h}} = 0,34 \frac{\text{USD}}{\text{kW} \cdot \text{h}}$$

Y el costo de cada  $\text{kW} \cdot \text{h}$  es de  $\text{USD } 0,34$ .

Si una ducha de  $5,5 \text{ kW}$  gasta  $9,5 \text{ l}$  de agua por minuto [112], durante un período de utilización de 20 minutos va a emplear  $190 \text{ l}$ :

$$190 \frac{\text{l}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} = 5,70 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

Por tanto, si calentar  $5,70 \text{ m}^3$  de agua al mes tiene un costo de  $USD 18,20$ , se puede determinar que el costo de calentar  $1 \text{ m}^3$  de agua empleado energía eléctrica es  $USD 3,20$ .

El costo real del tanque de gas licuado de petróleo (GLP) es de  $USD 12$  [113]. Ecuador consta con un subsidio del 650% para el GLP; la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (ARCH) aclara que el precio oficial del tanque de  $15 \text{ kg}$  se mantiene en  $USD 1,60$  para el territorio ecuatoriano [114].

El GLP tiene un alto poder calorífico en comparación con los gases comerciales restantes; presenta un poder calorífico superior de  $12\,060 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$  y un poder calorífico inferior de  $11\,860 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$  [115, 116].

Si el costo real del tanque de  $15 \text{ kg}$  es de  $USD 12$ , entonces se tiene que el costo del GLP es de  $1,25 \text{ USD} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Entonces se puede determinar el costo por unidad de energía:

$$\frac{1,25 \text{ USD} \cdot \text{kg}^{-1}}{11\,860 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}} = 1,0539 \cdot 10^{-4} \text{ USD} \cdot \text{kcal}^{-1}$$

En otros términos, el consumo energético puede ser expresado en  $\text{kW} \cdot \text{h}$ :

$$c_{p, \text{GLP}} = 11\,860 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \frac{4,184 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \cdot \frac{1 \text{ kW} \cdot \text{h}}{3\,600 \text{ kJ}}$$

$$c_{p, \text{GLP}} = 13,784 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Y el consumo de energía tendría un costo de:

$$\frac{1,25 \text{ USD} \cdot \text{kg}^{-1}}{13,784 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}} = 0,0906 \text{ USD} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

El consumo energético para determinar el calentamiento desde una temperatura inicial de suministro hasta una temperatura final requerida se obtiene mediante:

$$Q = m_{\text{agua}} \cdot c_{p, \text{agua}} \cdot \Delta T$$

En Ecuador, los hogares del área urbana presentan un consumo de  $26,73 \text{ m}^3$ , mientras que los del área rural  $27,74 \text{ m}^3$  [110]; de este consumo, entre el 60% y 70% lo abarca el consumo de agua caliente [117]. Entonces, considerando que  $1 \text{ m}^3_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg}_{\text{agua}}$  [118, 119], se tiene que:

$$Q = 1 \text{ m}^3 \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} \cdot 4,184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (50 - 14) ^\circ\text{C} \cdot \frac{1 \text{ kW} \cdot \text{h}}{3600 \text{ kJ}}$$

$$Q = 41,84 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Se requiere una energía de  $41,84 \text{ kW} \cdot \text{h}$  para calentar  $1 \text{ m}^3$  de agua; esto tendrá un costo de:

$$0,0906 \text{ USD} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot 41,84 \text{ kW} \cdot \text{h} = \text{USD } 3,80$$

Entonces se puede afirmar que el costo para calentar  $1 \text{ m}^3$  de agua, empleando GLP, es de  $\text{USD } 3,80$ .

Por último, se procede a determinar el costo que genera calentar el 65% de  $26,73 \text{ m}^3$  para un hogar:

$$\text{USD } 3,80 \cdot 26,73 \text{ m}^3 \cdot \frac{65}{100} = \text{USD } 66,03$$

Con lo que se concluye que el costo, para calentar el 65% de  $26,73 \text{ m}^3$  de agua, empleando GLP en un hogar genera un gasto de  $\text{USD } 66,03$  al mes.

### 4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

A continuación, se presenta una comparación de cada uno de los costos con respecto a los métodos de calentamiento de agua:

**Tabla 10.** Análisis comparativo de costos para calentamiento de agua.

<b>Método de Calentamiento</b>	<b>Costo m<sup>3</sup> [USD]</b>	<b>Costo Mensual [USD]</b>
Ducha Eléctrica	0,90	18,20
Calefón con GLP	3,80	66,03
Bomba de Calor asistida por Energía Solar	0	0

Adicionalmente, se debe considerar la energía eléctrica proporcionada por los paneles solares, los cuales brindan la potencia al funcionamiento de los siguientes equipos:

**Tabla 11.** Equipos alimentados por los paneles solares.

<b>EQUIPO</b>	<b>POTENCIA [kW]</b>
Torre de enfriamiento	0,37
Ventilador centrífugo	0,55
Intercambiador de calor	0,16
Bomba de calor	0,085

Estos equipos de laboratorio van se utilizan para la realización de prácticas; haciendo una suposición de una práctica a la semana, dividida en dos grupos, con una hora para cada uno. Así que el consumo de  $kW \cdot h$  para los equipos del laboratorio puede ser:

$$(0,37 + 0,55 + 0,16 + 0,085) kW \cdot 2 h = 2,33 kW \cdot h$$

Entonces el costo mensual de energía eléctrica que estos equipos consumen es:

$$2,33 kW \cdot h \cdot 0,34 USD \cdot 4 semanas = USD 3,16$$

#### **4.4 ESTUDIO AMBIENTAL**

El factor de emisión de CO<sub>2</sub> por cada unidad de electricidad disponible para consumo se obtiene al dividir, las emisiones totales de CO<sub>2</sub> generadas por el consumo de combustibles para su producción, para los valores de producción bruta de electricidad; el valor más alto fue en 2010, alcanzando 397,5 g CO<sub>2</sub> por cada MW · h. El valor registrado para el 2014 fue de 0,3426 kg CO<sub>2</sub> por cada kW · h, anualmente [120].

La ciudad de Quito tuvo una generación de 5,1 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> para el 2014; esta cantidad es denominada Huella de Carbono, proyecto implementado además en las capitales de Bolivia y Perú [121]; después del sector del transporte, el segundo lugar lo ocupa el sector residencial, con el 20% (1 016 305 ton CO<sub>2</sub>) generado por el consumo energético que producen de los habitantes [122].

Irónicamente, tras la Cumbre del Clima de París, el precio por emitir una tonelada de CO<sub>2</sub> se redujo en un 40%; a finales del 2015 tuvo un costo de € 8,22 (USD 9,70), mientras que a mediados de febrero del 2016 estuvo en € 4,75 (USD 5,61), precios aún debatibles, ya que deberían acercarse más a un costo real de la emisión. La explicación que se presentó fue que el mercado energético es el motor de la economía: el precio del gas natural con respecto al carbono, por ejemplo. Generar 1 kW·h con carbón emite el doble de CO<sub>2</sub> que el generado con gas natural [123].

Los equipos de laboratorio consumen 2,33 kW·h al mes, así que:

$$2,33 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \frac{0,34326 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kW} \cdot \text{h}} \cdot 12 \text{ meses} = 9,5975 \text{ kg CO}_2$$

Además, una ducha eléctrica de 5,5 kW consume 55 kW·h mensualmente, entonces la producción anual de CO<sub>2</sub> va a ser:

$$55 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \frac{0,34326 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kW} \cdot \text{h}} \cdot 12 \text{ meses} = 226,552 \text{ kg CO}_2$$

Por otro lado, un hogar ecuatoriano consume 2,04 cilindros de gas mensualmente [113]; el factor de emisión para el GLP es de 2,96 kg CO<sub>2</sub> por cada kg al año [124].

$$15 \text{ kg} \cdot 2 \cdot \frac{2,96 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg}} \cdot 12 \text{ meses} = 1065,6 \text{ kg CO}_2$$

Las toneladas de CO<sub>2</sub> que pueden dejar de ser emitidas mediante la implementación de una bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa son 1,3018; el proyecto tiene un propósito de promover el desarrollo de energías renovables, empleando la energía solar para su aplicación fotovoltaica y térmica.

#### 4.5 COSTO DE MANTENIMIENTO

Una vez que la bomba de calor esté instalada y puesta en funcionamiento, requiere de una revisión periódica en sus sistemas principales, para lo que se requiere realizar un mantenimiento preventivo dos veces al año, con un costo de *USD* 150 , en el cual se incluirá:

- Vaciado del sistema refrigerante
- Cambio de filtro
- Carga de gas
- Verificación de fugas
- Calibración
- Limpieza y mano de obra
- Puesta en funcionamiento

#### 4.6 ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO

La viabilidad de un proyecto debe considerar: la financiación de la inversión, la adaptación a los recursos financieros disponibles, así como los costos y beneficios que el proyecto genere [125, 126].

Para junio del 2016, la inflación anual alcanzó el valor más bajo desde 2007; en 2015, al haber llegado a 4,87%, la inflación ha ido disminuyendo hasta llegar a 1,59% [127].

**Tabla 12.** Evolución de la inflación en el Ecuador [127].

2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
2,19%	9,69%	4,54%	3,30%	4,28%	5,00%	2,68%	3,67%	4,87%	1,59%

#### 4.7 AHORRO ECONÓMICO

Mediante la implementación de una bomba de calor para el calentamiento de agua, se va a generar un ahorro económico, el que puede ser obtenido al determinar el ahorro anual, del cual se le restan los costos por mantenimiento, y adicionalmente se considera el beneficio que se genera en sustitución de un sistema térmico convencional que emplea GLP para el calentamiento de agua.

**Tabla 13.** Proyección de ahorros.

<b>Año</b>	<b>Inflación Anual</b>	<b>Ahorro [USD] <i>kW · h</i> <b>(Eq. Lab)</b></b>	<b>Ahorro [USD] <i>kW · h</i> <b>(E. Eléc.)</b></b>	<b>Ahorro [USD] <i>kW · h</i> <b>(GLP)</b></b>	<b>Ahorros Anuales [USD]</b>	<b>Gastos [USD]</b>	<b>Flujo Neto [USD]</b>
1	2,19%	3,16	18,20	66,03	1.071,65	7.447,07	- 6.375,42
2	9,69%	3,16	18,20	66,03	1.150,30	150,00	1.000,30
3	4,54%	3,16	18,20	66,03	1.096,29	150,00	946,29
4	3,30%	3,16	18,20	66,03	1.083,29	150,00	933,29
5	4,28%	3,16	18,20	66,03	1.093,56	150,00	943,56
6	5,00%	3,16	18,20	66,03	1.101,11	150,00	951,11
7	2,68%	3,16	18,20	66,03	1.076,78	150,00	926,78
8	3,67%	3,16	18,20	66,03	1.087,17	150,00	937,17
9	4,87%	3,16	18,20	66,03	1.099,75	150,00	949,75
10	1,59%	3,16	18,20	66,03	1.065,35	150,00	915,35

#### 4.8 CÁLCULO DEL VALOR ACTUAL NETO (V.A.N.)

Este parámetro permite determinar la diferencia entre el valor actualizado de los flujos de beneficio y el valor actualizado de las inversiones y otros egresos de efectivo [128]; es la sumatoria de todos los flujos actualizados de efectivo futuro de una inversión o un proyecto, menos las salidas [129]. Puede ser determinado mediante:

$$VAN = -Inv + \sum_{\Omega=1}^{N^{\circ}} \frac{F_t}{(1+i)^{\Omega}} \quad (46)$$

Donde:

*Inv* : Inversión inicial;

$\Omega$  : Períodos;

$N^{\circ}$  : Número de períodos;

$F_t$  : Flujos de dinero en cada período  $\Omega$  ;

*i* : Tipo de interés exigido a la inversión;

Con base en una tasa de interés del 5%, se obtienen los resultados de V.A.N. presentados en la tabla 14:

**Tabla 14.** Cálculo del V.A.N.

<b>Año</b>	<b>Flujo Neto [USD]</b>	<b>Flujo Activo [USD]</b>
1	-6.375,42	-6.071,83
2	1.000,30	907,30
3	946,29	817,44
4	933,29	767,82
5	943,56	739,31
6	951,11	709,74
7	926,78	658,65
8	937,17	634,31
9	949,75	612,22
10	915,35	561,95
	<b>VAN</b>	<b>336,89</b>

El obtener un valor de V.A.N. mayor a 0 (cero), indica que el proyecto va a generar ganancias en el período establecido.

#### **4.9 CÁLCULO DE LA TASA INTERNA DE RETORNO (T.I.R.)**

Es la tasa de descuento que hace que el valor actual de los flujos de beneficio sea igual al valor actual de los flujos de inversión negativo [130]. Es un instrumento para evaluar el rendimiento de una inversión en base a los fondos netos, siendo la tasa de interés más alta que un productor puede pagar sin perder dinero [131]. Esta tasa de descuento hace que el V.A.N. sea igual a cero y es calculada por:

$$VAN = 0 = \sum_{\Omega=1}^{N^{\circ}} \frac{F_t}{(1 + TIR)^{\Omega}} - Inv \quad (47)$$

**Tabla 15.** Cálculo de T.I.R.

<b>Año</b>	<b>Flujo Neto [USD]</b>	<b>Flujo Acumulado [USD]</b>
1	-6.375,42	-6375,42
2	1.000,30	-5375,13
3	946,29	-4428,84
4	933,29	-3495,55
5	943,56	-2551,99
6	951,11	-1600,87
7	926,78	-674,09
8	937,17	263,08
9	949,75	1212,83
10	915,35	2128,18
	<b>T.I.R.</b>	<b>6%</b>

#### **4.10 RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN**

El período de recuperación es el tiempo en años que tarda en un proyecto en recuperar la inversión realizada [130]. Para determinar este valor se aplica:

$$PR = NA + \frac{|FA|}{F_{A+1}} \quad (48)$$

Donde:

$PR$ : Período de recuperación; [años]

$NA$ : Número de años donde se presentó flujo negativo; [años]

$FA$ : Flujo acumulado de  $NA$ ; [\$]

$F_{A+1}$ : Flujo acumulado siguiente a  $NA$ ; [\$]

Entonces, tomando de referencia la Tabla 15, se tiene los siguientes valores:

$$PR = 7 + \frac{|-674,09|}{263,08} = 9,5623 \text{ años}$$

Por lo que se concluye que el tiempo en el que se va a poder recuperar la inversión es de 9 años y 6,75 meses.

## CONCLUSIONES

- En el presente documento se desarrolló una investigación sobre una bomba de calor asistida por energía solar en la cual se investigó el principio de funcionamiento de cada uno de sus componentes que son el compresor, evaporador, válvula de expansión y condensador, de lo cual se puede resaltar que el sistema planteado es mejor al ser comparado con un sistema normal de bomba de calor además de generar muy poca contaminación.
- La calidad del refrigerante al entrar al colector-evaporador presenta porcentajes entre 62% a 91%. El análisis termodinámico realizado ratifica el sobresaliente desempeño del sistema; sin embargo, debido a la presencia de varios dispositivos de control ubicados a lo largo de las tuberías del sistema, se generan caídas de presión considerables; un máximo de 5 psi entre la entrada al colector-evaporador y la entrada al compresor. Situación similar ocurre entre los valores de salida del compresor y salida del condensador, pudiendo llegar a alcanzar una caída de presión de 10 psi.
- Las condiciones climatológicas influyen directamente en el rendimiento del equipo; bajo condiciones ideales, en un día despejado, con una radiación promedio de  $642,2 [W \cdot m^{-2}]$  y temperatura ambiente de  $22,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , el agua alcanzó una temperatura máxima de  $40,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por otro lado, en condiciones desfavorables, en un día nublado e incluso con lluvia, a una radiación promedio de  $216,5 [W \cdot m^{-2}]$  y temperatura ambiente de  $14,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , se logró calentar agua hasta  $34,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . De esto se afirma que la bomba de calor depende de la temperatura y radiación solar, pero además aprovecha las propiedades del refrigerante al ser comprimido.
- El sistema de bomba de calor por compresión de vapor de R-134a asistida por energía solar de expansión directa puede ser empleado para calentamiento de agua doméstica sanitaria, ya que, en un período de 90 minutos, al calentar un volumen de 5 litros de agua desde los  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  se llega a alcanzar una temperatura de  $47,6 \text{ }^\circ\text{C}$  con un consumo térmico de  $300 \text{ W}$ , además el valor de COP promedio puede ser de 12 al inicio de las pruebas de funcionamiento.

- El valor de COP varía con respecto a la velocidad rotacional, conforme ésta va aumentando, el COP del sistema desciende. Iniciando a 1 200 rpm se tiene un COP de 11,5843, mientras que tras 60 minutos de funcionamiento y llegando a 3 500 rpm, el valor de COP obtenido fue de 3,8323, es decir, el COP a 1 200 rpm es 44,93% más alto que a 3 500 rpm.

## RECOMENDACIONES

- El refrigerante R-134a es un gas a temperatura ambiente; para proceder con la carga de refrigerante en el compresor se recomienda realizar este proceso a una temperatura entre 23°C a 26 °C, para evitar el congelamiento del colector-evaporador.
  
- Antes de poner en funcionamiento el equipo es necesario: verificar que no existan fugas de refrigerante por las líneas de circulación, porque puede producir caídas de presión activando el presostato y apagando el compresor; de igual importancia, el amperaje del compresor no debe superar un amperio, ya que esto genera el calentamiento interno de sus bobinados. También se debe revisar el voltaje de la batería; debe ser superior a 12 V para garantizar el funcionamiento correcto del sistema.
  
- El mantenimiento preventivo es de suma importancia para que el sistema trabaje en óptimas condiciones, además de extender la vida útil del mismo; es recomendable colocar válvulas de paso, antes y después del filtro; esto ayuda a reducir las pérdidas de refrigerante al momento de realizar el cambio de filtro y reduce las emisiones contaminantes al medio ambiente.
  
- El sistema puede ser mejorado añadiendo una línea de recirculación de agua; el condensador debe interactuar como un intercambiador de calor de contraflujo, así el agua calentada puede pasar a un tanque de almacenamiento y de esta manera aumentar, tanto la eficiencia del sistema al evitar el sobrecalentamiento de sus componentes, como incrementar el volumen de agua caliente generado al día.
  
- La instrumentación, así como los dispositivos de control instalados en el equipo deben ser analizados, para definir su correcta ubicación, así como su aplicación; de este modo se van a obtener mediciones más precisas y además se pueden evitar caídas de presión innecesarias.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Mondani, S. Aleagha, M. Khoramivafa y R. Ghobadi, «Evaluation of greenhouse gases emission based on energy consumption in wheat Agroecosystems,» *Elsevier - Energy Reprts*, pp. 37-45, 2017.
- [2] M. Shahbaz, A. Chaudhary y I. Ozturk, «Does urbanization cause increasing energy demand in Pakistan? Empirical evidence from STIRPAT model,» *Elsevier - Energy*, pp. 83-93, 2017.
- [3] A. Araujo, «Grupo EL COMERCIO,» [En línea]. Available: <http://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/proyectos-fotovoltaicos-se-estancaron.html>. [Último acceso: 14 Marzo 2017].
- [4] J. Lim, A. Chinnici, B. Dally y G. Nathan, «Assessment of the potential benefits and constraints of a hybrid solar receiver and combustor operated in the MILD combustion regime,» *Elsevier - Energy*, pp. 735-745, 2016.
- [5] C. Leaman, «The Benefits of Solar Energy,» *Elsevier - Renewable Energy Focus*, pp. 113-115, 2015.
- [6] Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, Plan Nacional del Buen Vivir, Quito: El Conejo, 2009.
- [7] P. Malali, S. Chaturvedi y T. Abdel-salam, «An approximate method for prediction of thermal performance of direct expansion-solar assisted heat pump (DX-SAHP) systems for water heating applications,» *Elsevier - Energy Conversion and Management*, vol. 127, pp. 416-423, 2016.
- [8] F. Chata, S. Chatuverdi y A. Almogbel, «Analysis of a direct expansion solar assisted heat pump using different refrigerants,» *Elsevier - Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 2614-2624, 2005.
- [9] D. Zhang, Q. B. Wu, J. P. Li y X. Q. Kong, «Effects of refrigerant charge and structural parameters on the performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump system,» *Elsevier - Applied Thermal Engineering*, n° 73, pp. 522-528, 2014.
- [10] W. Huang, J. Ji, N. Xu y G. Li, «Frosting characteristics and heating performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump for space heating under frosting conditions,» *Elsevier - Applied Energy*, n° 171, pp. 656-666, 2016.
- [11] M. Zhu, H. Xie, B. Zhang y X. Guan, «The Characteristics of the Evaporator/Evaporator for Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump System,» *Scientific Research - Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 1, pp. 73-76, 2013.
- [12] M. Yousefi y M. Moradali, «Thermodynamic analysis of a direct expansion solar assisted heat pump water heater,» *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 26, pp. 110-117, 2015.
- [13] L. Paradeshi, M. Srinivas y S. Jayaraj, «Parametric studies of a Simple Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump Operating in a Hot and Humid Environment,» *Elsevier - Energy Procedia*, vol. 90, pp. 635-644, 2016.
- [14] J. Chen y L. Yu, «Theoretical analysis on a new direct expansion solar assisted ejector-compression heat pump cycle for water heater,» *ELSEVIER - Solar Energy*, n° 142, pp. 299-307, 2017.
- [15] J. Aguilar Peris, El Efecto Invernadero, el Cambio Climático, la Crisis Medioambiental y el Futuro de la Tierra, Madrid: Instituto de España, 2003.
- [16] W. Ciesla, Cambio Climático, Bosques y Ordenación Forestal, Roma: FAO, 1996.
- [17] R. Parra, «Factor de emisión de CO2 debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001 – 2011,» *Avances en Ciencias e Ingenierías*, vol. 5, n° 1, pp. 39-42, 2013.
- [18] Grupo Banco Mundial, «BANCO MUNDIAL BIRF - AIF,» [En línea]. Available: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT>. [Último acceso: 03 Abril 2017].
- [19] INEC, «Instituto Nacional de Estadística y Censo,» [En línea]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/vdatos/>. [Último acceso: 14 Marzo 2017].
- [20] P. Sadorsky, «Energy consumption, output and trade in South America,» *ELSEVIER - Energy Economics*, n° 34, pp. 476-488, 2012.
- [21] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, «Agencia de Regulación y Control de Electricidad,» 23 Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/ecuador-posee-un-5155-de-energia-renovable/>. [Último acceso: 03 Abril 2017].
- [22] N. Apergis y J. Payne, «Renewable energy, output, CO2 emissions, and fossil fuel prices in Central America: Evidence from a nonlinear panel smooth transition vector error correction model,» *ELSEVIER - Energy Economics*, n° 42, pp. 226-232, 2014.

- [23] C. Özkale, C. Celik, A. C. Turkemen y E. Sena Cakmaz, «Decision analysis application intended for selection of a power plant running on renewable energy sources,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1011-1021, 2017.
- [24] M. Orhan, H. Kahraman y B. Babu, «Approaches for integrated hydrogen production based on nuclear and renewable energy sources: Energy and exergy assessments of nuclear and solar energy sources in the United Arab Emirates,» *Elsevier - International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 2601-2616, 2016.
- [25] P. Goncalves, V. Sampaio y M. Aguirre González, «Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 590-601, 2017.
- [26] S. Rashidi, J. Abolfazli Esfahani y A. Rashidi, «A review on the applications of porous materials in solar energy systems,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1198-1210, 2017.
- [27] B. Nastasi y U. Di Matteo, «Solar energy technologies in Sustainable Energy Action Plans of Italian big cities,» *ELSEVIER - Energy Procedia*, nº 101, pp. 1064-1071, 2016.
- [28] Y. Li y C. Liu, «Estimating solar energy potentials on pitched roofs,» *Elsevier - Energy and Buildings*, pp. 101-107, 2017.
- [29] F. Vera García, J. García y Z. Hernández, Atlas de Irradiación Solar y Temperatura Ambiental de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, Murcia: ARGEM, 2005.
- [30] I. Font Tullot, Climatología de España y Portugal, Salamanca: Salamanca, 2007.
- [31] L. Valladares-Rendón, G. Schmid y S.-L. Lo, «Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of facade shading systems,» *Elsevier - Energy and Buildings*, pp. 458-479, 2017.
- [32] D. Rodríguez y D. Arroyo, «Energía Solar Fotovoltaica en Ecuador,» *El Telégrafo*, 08 Julio 2016.
- [33] CONELEC, Plan Maestro de Electrificación - Aspectos de Sustentabilidad y Sostenibilidad Social y Ambiental, Quito: Advantlogic Ecuador S.A., 2013.
- [34] ASHRAE Committee, ASHRAE Handbook - Fundamentals, Atlanta: ASHRAE Communications and Publications, 2001.
- [35] ASHRAE, «ASHRAE - Shaping Tomorrow's Built Environment Today,» [En línea]. Available: <https://www.ashrae.org/standards-research--technology/standards--guidelines/titles-purposes-and-scopes#std95>. [Último acceso: 2017 Julio 26].
- [36] INEN, «Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización,» [En línea]. Available: [http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/nte\\_inen\\_2507.pdf](http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/nte_inen_2507.pdf). [Último acceso: 14 Marzo 2017].
- [37] INEN, «Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización,» [En línea]. Available: [https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjJxe2PjdfSAhVCySYKHRsZBEsQFggeMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fwp-content%2Fuploads%2Fdownloads%2F2014%2F02%2Fgpe\\_inen\\_18.pdf&usg=AFQjCNH9ggwob4oda](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjJxe2PjdfSAhVCySYKHRsZBEsQFggeMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fwp-content%2Fuploads%2Fdownloads%2F2014%2F02%2Fgpe_inen_18.pdf&usg=AFQjCNH9ggwob4oda). [Último acceso: 14 Marzo 2017].
- [38] V. Tam, K. Le, S. Zeng, X. Wang, I. Chethana y S. Illankoon, «Regenerative practice of using photovoltaic solar systems for residential dwellings: An empirical study in Australia,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 1-10, 2017.
- [39] A. Youssef, M. El-Telbany y A. Zekry, «The role of artificial intelligence in photo-voltaic systems design and control: A review,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 72-79, 2017.
- [40] S. Titri, C. Larbes, K. Toumi y K. Benaychba, «A new MPPT controller based on the Ant colony optimization algorithm for Photovoltaic systems under partial shading conditions,» *Elsevier - Applied Soft Computing*, vol. 58, pp. 465-479, 2017.
- [41] S. Anand y A. Rao, «Models for Deployment of Solar PV Lighting Applications in Rural India,» *Elsevier - Energy Procedia*, vol. 90, pp. 455-462, 2016.
- [42] A. Bridgewater y G. Bridgewater, Energías Alternativas - Handbook, Madrid: Paraninfo, 2008.
- [43] R. Guerrero Pérez, Replanteo y Funcionamiento de Instalaciones Fotovoltaicas, Antequera: IC, 2013.
- [44] J. Cegarra Sánchez, Metodología de la Investigación Científica y Tecnológica, Madrid: Díaz de Santos, S.A., 2004.

- [45] M. Humood, A. Beheshti, J. Meyer y A. Polycarpou, «Normal impact of sand particles with solar panel glass surfaces,» *Elsevier - Tribology International*, pp. 237-248, 2016.
- [46] F. Balo y L. Sagbansua, «The selection of the best solar panel for the photovoltaic system design by using AHP,» *Elsevier - Energy Procedia*, pp. 50-53, 2016.
- [47] F. Rasool, M. Drieberg, N. Badruddin, B. Singh y M. Singh, «PV panel modeling with improved parameter extraction technique,» *Elsevier - Solar Energy*, vol. 153, pp. 519-530, 2017.
- [48] MEER, «Ministerio de Electricidad y de Energía Renovable,» [En línea]. Available: <http://www.energia.gob.ec/planta-fotovoltaica-y-de-almacenamiento-de-energia-baltra-mantiene-su-ejecucion/>. [Último acceso: 15 Junio 2017].
- [49] D. Zhang, H. Tao, M. Wnag, Z. Sun y C. Jiang, «Numerical simulation investigation on thermal performance of heat pipe flat-plate solar collector,» *Elsevier - Applied Thermal Engineering*, pp. 113-126, 2017.
- [50] A. Mahash, «Solar collectors and adsorption materials aspects of cooling system,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1300-1312, 2017.
- [51] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, México D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2006.
- [52] R. Tripathi y G. Tiwari, «Annual performance evaluation (energy and exergy) of fully covered concentrated photovoltaic thermal (PVT) water collector: An experimental validation,» *Elsevier - Solar Energy*, pp. 180-190, 2017.
- [53] A. Kabeel, M. Khairat Dawood y A. Shehata, «Augmentation of thermal efficiency of the glass evacuated solar tube collector with coaxial heat pipe with different refrigerants and filling ratio,» *ELSEVIER - Energy Conversion and Management*, n° 138, pp. 286-298, 2017.
- [54] J. Ghaderian y N. Che Sidik, «An experimental investigation on the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/distilled water nanofluid on the energy efficiency of evacuated tube solar collector,» *Elsevier - International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 972-987, 2017.
- [55] J. Cerón Muñoz, *Análisis del mecanismo de Transferencia de Calor en Colectores Solares Térmicos*, Cartagena: UPCT, 2012.
- [56] A. Cabrera, P. Franco y C. Da Cunha Faria, *Manual Energía Solar Térmica e Instalaciones Asociadas*, Montevideo: Grafinel, 2009.
- [57] A. Kiss y C. Infante Ferreira, *Heat Pumps in Chemical Process Industry*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- [58] J. González Velasco, *Energías Renovables*, Barcelona: Reverté, 2009.
- [59] B. Hu, Y. Li, F. Cao y Z. Xing, «Extremum seeking control of COP optimization for air-source transcritical CO<sub>2</sub> heat pump water heater system,» *ELSEVIER - Applied Energy*, n° 147, pp. 361-372, 2015.
- [60] S. Graf, F. Lanzerath, A. Sapienza, A. Frazzica, A. Freni y A. Bardow, «Prediction of SCP and COP for adsorption heat pumps and chillers by combining the large-temperature-jump method and dynamic modeling,» *ELSEVIER - Applied Thermal Engineering*, n° 98, pp. 900-909, 2016.
- [61] A. Girard, E. Jadraque Gago, T. Muneer y G. Caceres, «Higher ground source heat pump COP in a residential building through the use of solar thermal collectors,» *ELSEVIER - Renewable Energy*, n° 80, pp. 26-39, 2015.
- [62] M. Pitarch, E. Navarro-Peris, J. González.Maciá y J. Croberán, «Evaluation of different heat pump systems for sanitary hot water production using natural refrigerants,» *Elsevier - Applied Energy*, pp. 911-919, 2017.
- [63] F. J. Rey Martínez y E. Velasco Gómez, *Bombas de Calor y Energías Renovables en Edificios*, Madrid: Paraninfo, 2005.
- [64] J. P. Fine, J. Friedman y S. B. Dworkin, «Detailed modeling of a novel photovoltaic thermal cascade heat pump,» *Elsevier - Renewable Energy*, pp. 500-513, 2016.
- [65] F. Aguilar, S. Aledo y P. Quiles, «Experimental study of the solar photovoltaic contribution for the domestic hot water production with heat pumps in dwellings,» *Elsevier - Applied Thermal Engineering*, vol. 101, pp. 379-389, 2016.
- [66] H. Chen, L. Zhang, P. Jie, Y. Xiong, P. Xu y H. Zhai, «Performance study of heat-pipe solar photovoltaicthermal heat pump,» *Elsevier - Applied Energy*, pp. 960-980, 2016.

- [67] A. G. Bridgeman, *Experimental Analysis of an Indirect Solar Assisted Heat Pump for Domestic Water Heating*, Ontario: Queen's University, 2010.
- [68] X. Sun, Y. Dai, V. Novakovic, J. Wu y R. Wang, «Performance comparison of direct expansion solar-assisted heat pump and conventional air source heat pump for domestic hot water,» *Elsevier - Energy Procedia*, pp. 394-401, 2015.
- [69] R. S. Kamel y A. S. Fung, «Solar systems and their integration with heat pumps: a review,» *ELSEVIER - Energy and Buildings*, pp. 1-41, 2014.
- [70] M. Aziz, S. Mat y K. Sopian, «Technology Review of Solar Assisted Heat Pump System for Hot Water Production,» *Latest Trends in Renewable Energy and Environmental Informatics*, vol. 8, pp. 65-75, 2013.
- [71] X. Q. Kong, Y. Li, L. Lin y Y. G. Yang, «Modeling evaluation of a direct-expansion solar assisted,» *ELSEVIER - International Journal of Refrigeration*, n° 76, pp. 136-146, 2017.
- [72] J. Zhou, X. Zhao, X. Ma, Z. Qiu, J. Ji, Z. Du y M. Yu, «Experimental investigation of a solar driven direct-expansion heat pump system employing the novel PV/micro-channels-evaporator modules,» *ELSEVIER - Applied Energy*, n° 178, pp. 484-495, 2016.
- [73] K. Kumar, L. Paradeshi, M. Srinivas y S. Jayaraj, «Parametric Studies of a Simple Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump Using ANN and GA,» *ELSEVIER - Energy Procedia*, n° 90, pp. 625-634, 2016.
- [74] K. Harby, «Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1247-1264, 2017.
- [75] S. Daly, *Automotive Air-conditioning and Climate Control Systems*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [76] Z. Wang, P. Guo, H. Zhang, W. Yang y S. Mei, «Comprehensive review on the development of SAHP for domestic hot water,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 871-881, 2017.
- [77] T. T. Chow, Y. Bai, K. Fong y Z. Lin, «Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating,» *Elsevier - Applied Energy*, vol. 100, pp. 309-317, 2012.
- [78] J. Facao y M. Carvalho, «New test methodologies to analyse direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water,» *Elsevier - Solar Energy*, n° 100, pp. 66-75, 2014.
- [79] A. Bridgeman y S. Harrison, «Preliminary Experimental Evaluations of Indirect Solar Assisted Heat Pump Systems,» *Solar Calorimetry Laboratory - Department of Mechanical and Materials Engineering*, 2010.
- [80] J. Duffie y W. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, New Jersey: Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [81] S. Gliessman, *Agroecología - Procesos Ecológicos en Agricultura Sostenible*, Turrialba, Costa Rica: Litocat, 2002.
- [82] S. Kalogirou, *Solar Energy Engineering - Processes and Systems*, Oxford: Elsevier, Inc. Academic Print, 2014.
- [83] M. Ebrahimi y A. Keshavarz, *Combinated Cooling, Heating and Power*, Philadelphia: Elsevier Ltd., 2014.
- [84] D. Chwieduk, *Solar Energy in Buildings - Thermal Balance for Efficient Heating and Cooling*, Oxford: Elsevier, Inc., 2014.
- [85] B. Jamil, A. Siddiqui y N. Akhtar, «Estimation of solar radiation and optimum tilt angles for south-facing surfaces in Humid Subtropical Climatic Region of India,» *Elsevier - Engineering Science and Technology, an International Journal*, pp. 1-10, 2016.
- [86] M. Despotovic, V. Nedic, D. Despotovic y S. Cvetanovic, «Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1869-1880, 2015.
- [87] A. Koochaki y H. Hosseini, «Application of swarm based optimization algorithms to maximize output energy of photovoltaic panels,» *Technical Gazette*, vol. 23, pp. 1571-1578, 2016.

- [88] S. Sengar, A. Mohod, Y. Khandetod, S. Modak y D. Gupta, «Design and development of wick type solar distillation system,» *Journal of Soil Science and Enviromental Management*, vol. 2, pp. 125-133, 2011.
- [89] B. Liu y R. Jordan, «The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors,» *Elsevier - Solar Energy*, vol. 7, pp. 53-74, 1963.
- [90] Y. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa - Un Enfoque Práctico*, México D.F.: McGraw-Hill, 2007.
- [91] L. Keliang, J. Jie, C. Tin-tai, P. Gang, H. Hanfeng, J. Aiguo y Y. Jichun, «Performance study of a photovoltaic solar assisted heat pump with variable-frequency compressor – A case study in Tibet,» *Elsevier - Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2680-2687, 2009.
- [92] C. Camargo Nogueira, M. Vidotto, F. Toniazzo y G. Debastiani, «Software for designing solar water heating systems,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 361-375, 2016.
- [93] R. Kokila y S. Rajakumar, «Thermal Performance Analysis and Optimization of Solar Assited Heat Pump Water Heater,» *Applied Mechanics and Materials*, vol. 592, pp. 2416-2421, 2014.
- [94] S. Ito, N. Miura y K. Wang, «Performance of a Heat Pump Using Direct Expansion Solar Collectors,» *Elsevier - Solar Energy*, vol. 65, pp. 189-195, 1999.
- [95] Lienhard John, *A Heat Transfer Textbook*, Massachusetts: Phlogiston Press, 2003.
- [96] F. Incropera y D. DeWitt, *Fundamentos de Tranferencia de Calor*, México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1999.
- [97] W. Deng y Y. Jianlin, «Simulation analysis on dynamic performance of a combined solar/air dual source heat pump water heater,» *Elsevier - Energy Conversion and Management*, vol. 120, pp. 678-387, 2016.
- [98] O. Brunin, M. Feidt y B. Hivet, «Comparison of the working domains of some compression heat pumps and a compression-absorption heat pump,» *Elsevier - International Journal of Refrigeration*, vol. 20, pp. 308-318, 1997.
- [99] M. Hawlader, S. Chou y M. Ullah, «The performance of a solar assited heat pump water heating system,» *Elsevier - Applied Thermal Engineering*, vol. 21, pp. 1049-1065, 2001.
- [100] P. Yu Yu, T. Liang Hsiao, Y. Chang Cheng y Y. Choung Chang, «Performance Estimation of Hermetic Reciprocating Compressor with Computer Model,» *International Compressor Engineering Conference*, pp. 1-7, 2004.
- [101] P. Kjellsen, *Simulations and experiments on a Solar-Assisted Heat Pump Water Heater*, Trondheim: NTNU, 2016.
- [102] Y. Li, R. Wang, J. Wu y Y. Xu, «Experimental performance analysis on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater,» *Elsevier - Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 2858-2868, 2007.
- [103] J. Wattelet, J. Chato, A. Souza y B. Christoffersen, «Evaporative Characteristics of R-12, R-134a and MP-39 at low mass fluxes,» *ASHRAE Transactions*, vol. 100, pp. 603-615, 1994.
- [104] A. Dalkilic y S. Wongwise, «Two-Phase Heat Transfer Coefficients of R134a Condensation in Vertical Downward Flow at High Mass Flux,» de *Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems*, Viena, INTECH, 2011, pp. 15-32.
- [105] J. Fernandez-Seara, C. Piñeiro, A. Dopazo, F. Fernandes y P. Sousa, «Experimental analysis of a direct expansion solar assisted heat pump with integral storage tank for domestic water heating under zero solar radiation conditions,» *Elsevier - Energy Conversion and Management*, vol. 59, pp. 1-8, 2012.
- [106] O. Kara, K. Ulgen y A. Hepbasli, «Exergetic assessment of direct-expansion solar-assisted heat pump systems: Review and modeling,» *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 1383-1401, 2008.
- [107] Ambient Weather, «Ambient Weather WS-1201 OBSERVER Solar Powered Wireless Weather Station,» [En línea]. Available: <https://www.ambientweather.com/amws1200.html>. [Último acceso: 13 11 2017].
- [108] EEQ, «Empresa Eléctrica Quito,» [En línea]. Available: <http://www.eeq.com.ec:8080/servicios/pliego-tarifario>. [Último acceso: 22 Agosto 2017].

- [109] INEC, «Instituto Nacional de Estadística y Censos - Dic.2012,» [En línea]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Presentaciones/AmbienteHogares.pdf>. [Último acceso: 22 Agosto 2017].
- [110] INEC, «Instituto Nacional de Estadística y Censos - Jun.2012,» [En línea]. Available: [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Ambientales2012junio/Presentacio\\_Junio%202012.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Ambientales2012junio/Presentacio_Junio%202012.pdf). [Último acceso: 22 Agosto 2017].
- [111] Osinergmin, «Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería,» [En línea]. Available: [https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiVksWJ3uvVAhXM6SYKHcOQA8QFggpMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.osinergmin.gob.pe%2Fseccion%2Fcentro\\_documental%2FFolleteria%2F5%2520Quieres%2520saber%2520cuanto%2520consu](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiVksWJ3uvVAhXM6SYKHcOQA8QFggpMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.osinergmin.gob.pe%2Fseccion%2Fcentro_documental%2FFolleteria%2F5%2520Quieres%2520saber%2520cuanto%2520consu). [Último acceso: 22 Agosto 2017].
- [112] La Hora, «La Hora,» [En línea]. Available: <https://lahora.com.ec/noticia/1101921672/lc3adnea-deduchas-eco-amigables->. [Último acceso: 17 Octubre 2017].
- [113] IDE Business School, «Universidad de los Hemisferios,» [En línea]. Available: <http://investiga.ide.edu.ec/index.php/revista-perspectiva/114-marzo-2008/625-las-cifras-del-gas-en-ecuador>. [Último acceso: 11 Octubre 2017].
- [114] Ministerio de Hidrocarburos, «Ministerio de Hidrocarburos,» [En línea]. Available: <http://www.hidrocarburos.gob.ec/subsidio-y-precio-de-gas-licuado-de-petroleo-se-mantienen/>. [Último acceso: 09 Septiembre 2017].
- [115] J. Lluch Urpí, Tecnología y Mrgen de Refino del Petróleo, Madrid: Díaz de Santos, 2008.
- [116] E. Muñoz Camacho y M. Grau Ríos, Ingeniería Química, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.
- [117] J. Calle, J. Fajardo y L. Sánchez, «Agua caliente sanitaria de uso doméstico con Energía Solar, una alternativa para la ciudad de Cuenca,» *Ingenius - Revista de Ciencia y tecnología*, vol. 4, pp. 57-65, 2010.
- [118] P. Hewitt, Física Conceptual, Edo. de México: Pearson Educación, 2004.
- [119] J. Galán García, Sistemas de Unidades Físicas, Barcelona: Reverté, S.A., 1987.
- [120] R. Parra, «Factor de emisión de CO<sub>2</sub> debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001-2014,» *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 7, pp. 80-85, 2015.
- [121] El Comercio, «5,1 Millones de Toneladas de CO<sub>2</sub>, en el año,» [En línea]. Available: <http://www.elcomercio.com/actualidad/quito-produce-millones-dioxido-carbono.html>. [Último acceso: 2017 Octubre 25].
- [122] Secretaría del Ambiente, «Reducción y Compensación de la Huella de Carbono en el DMQ,» [En línea]. Available: <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/cambio-climatico/programas-y-proyectos/reduccion-y-compensacion-de-la-huella-de-carbono-en-el-dmq>. [Último acceso: 25 Octubre 2017].
- [123] E. P. d. I. E. L. Energías Renovables, «El precio del CO<sub>2</sub> cae casi un 40% pese a los objetivos de reducción tras la Cumbre de París,» [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/panorama/el-precio-del-co2-cae-casi-un-20160217>. [Último acceso: 25 Octubre 2017].
- [124] Comisión Interdepartamental de Cambio Climático, Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, Catalunya: Oficina Catalana del Canvi Climatic, 2011.
- [125] F. Guzmán Catsro, El Estudio Económico-Financiero y la Evaluación en Proyectos de la Industria Química, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2001.
- [126] I. d. P. E. y. S. ILPES, Guía para la Presentación de Proyectos, México: Siglo XXI Editores, S.A., 2006.
- [127] El Telégrafo, «El Telégrafo,» [En línea]. Available: <http://www.eltelgrafo.com.ec/noticias/economia/8/la-inflacion-anual-es-la-mas-baja-desde-2007>. [Último acceso: 11 Octubre 2017].
- [128] F. Jiménez Boulanger, C. Espinoza Gutiérrez y L. Fonseca Retana, Ingeniería Económica, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2007.

- [129] M. Hamilton Wilson y A. Pezo Paredes, *Formulación y Evaluación de Proyectos Tecnológicos Empresariales Aplicados*, Bogotá: Convenio Andrés Bello, 2005.
- [130] S. Fernández Espinoza, *Los Proyectos de Inversión*, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2007.
- [131] F. Herrera, C. Velasco, H. Denen y R. Radulovich, *Fundamentos de Análisis Económico*, Turrialba: CATIE, 1994.

## ANEXOS

**Anexo 1. Refrigerante 134a saturado. Tabla de temperatura [51].**

Temp., T °C	Volumen específico, m <sup>3</sup> /kg			Energía Interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía kJ/kg · K		
	Pres., sat., P <sub>sat</sub> kPa	Líqu., sat., v <sub>f</sub>	Vapor sat., v <sub>g</sub>	Líqu., sat., u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Vapor sat., u <sub>g</sub>	Líqu., sat., h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Vapor sat., h <sub>g</sub>	Líqu., sat., s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Vapor sat., s <sub>g</sub>
-40	51,25	0,00071	0,36081	-0,036	207,4	207,37	0	225,86	225,86	0	0,96866	0,96866
-38	56,86	0,00071	0,32732	2,475	206,04	208,51	2,515	224,61	227,12	0,01072	0,95511	0,96584
-36	62,95	0,00071	0,29751	4,992	204,67	209,66	5,037	223,35	228,39	0,02138	0,94176	0,96315
-34	69,56	0,00071	0,2709	7,517	203,29	210,81	7,566	222,09	229,65	0,03199	0,92859	0,96058
-32	76,71	0,00072	0,24711	10,05	201,91	211,96	10,1	220,81	230,91	0,04253	0,9156	0,95813
-30	84,43	0,00072	0,2258	12,59	200,52	213,11	12,65	219,52	232,17	0,05301	0,90278	0,95579
-28	92,76	0,00072	0,20666	15,13	199,12	214,25	15,2	218,22	233,43	0,06344	0,89012	0,95356
-26	101,73	0,00073	0,18946	17,69	197,72	215,4	17,76	216,92	234,68	0,07382	0,87762	0,95144
-24	111,37	0,00073	0,17395	20,25	196,3	216,55	20,33	215,59	235,92	0,08414	0,86527	0,94941
-22	121,72	0,00073	0,15995	22,82	194,88	217,7	22,91	214,26	237,17	0,09441	0,85307	0,94748
-20	132,82	0,00074	0,14729	25,39	193,45	218,84	25,49	212,91	238,41	0,10463	0,84101	0,94564
-18	144,69	0,00074	0,13583	27,98	192,01	219,98	28,09	211,55	239,64	0,11481	0,82908	0,94389
-16	157,38	0,00074	0,12542	30,57	190,56	221,13	30,69	210,18	240,87	0,12493	0,81729	0,94222
-14	170,93	0,00075	0,11597	33,17	189,09	222,27	33,3	208,79	242,09	0,13501	0,80561	0,94063
-12	185,37	0,00075	0,10736	35,78	187,62	223,4	35,92	207,38	243,3	0,14504	0,79406	0,93911
-10	200,74	0,00075	0,09952	38,4	186,14	224,54	38,55	205,96	244,51	0,15504	0,78263	0,93766
-8	217,08	0,00076	0,09235	41,03	184,64	225,67	41,19	204,52	245,72	0,16498	0,7713	0,93629
-6	234,44	0,00076	0,0858	43,66	183,13	226,8	43,84	203,07	246,91	0,17489	0,76008	0,93497
-4	252,85	0,00076	0,0798	46,31	181,61	227,92	46,5	201,6	248,1	0,18476	0,74896	0,93372
-2	272,36	0,00077	0,0743	48,96	180,08	229,04	49,17	200,11	249,28	0,19459	0,73794	0,93253
0	293,01	0,00077	0,06926	51,63	178,53	230,16	51,86	198,6	250,45	0,20439	0,72701	0,93139
2	314,84	0,00078	0,06461	54,3	176,97	231,27	54,55	197,07	251,61	0,21415	0,71616	0,93031
4	337,9	0,00078	0,06034	56,99	175,39	232,38	57,25	195,51	252,77	0,22387	0,7054	0,92927
6	362,23	0,00078	0,0564	59,68	173,8	233,48	59,97	193,94	253,91	0,23356	0,69471	0,92828
8	387,88	0,00079	0,05276	62,39	172,19	234,58	62,69	192,35	255,04	0,24323	0,6841	0,92733
10	414,89	0,00079	0,0494	65,1	170,56	235,67	65,43	190,73	256,16	0,25286	0,67356	0,92641
12	443,31	0,0008	0,0463	67,83	168,92	236,75	68,18	189,09	257,27	0,26246	0,66308	0,92554
14	473,19	0,0008	0,04342	70,57	167,26	237,83	70,95	187,42	258,37	0,27204	0,65266	0,9247
16	504,58	0,00081	0,04075	73,32	165,58	238,9	73,73	185,73	259,46	0,28159	0,6423	0,92389
18	537,52	0,00081	0,03827	76,08	163,88	239,96	76,52	184,01	260,53	0,29112	0,63198	0,9231
20	572,07	0,00082	0,03597	78,86	162,16	241,02	79,32	182,27	261,59	0,30063	0,62172	0,92234
22	608,27	0,00082	0,03383	81,64	160,42	242,06	82,14	180,49	262,64	0,31011	0,61149	0,9216
24	646,18	0,00083	0,03183	84,44	158,65	243,1	84,98	178,69	263,67	0,31958	0,6013	0,92088
26	685,84	0,00083	0,02998	87,26	156,87	244,12	87,83	176,85	264,68	0,32903	0,59115	0,92018
28	727,31	0,00084	0,02824	90,09	155,05	245,14	90,69	174,99	265,68	0,33846	0,58102	0,91948
30	772,31	0,00084	0,02662	92,93	153,22	246,14	93,58	173,08	266,66	0,34789	0,57091	0,91879
32	815,89	0,00085	0,02511	95,79	151,35	247,14	96,48	171,14	267,62	0,3573	0,56082	0,91811
34	863,11	0,00085	0,02369	98,66	149,46	248,12	99,4	169,17	268,57	0,3667	0,55074	0,91743
36	912,35	0,00086	0,02236	101,55	147,54	249,08	102,33	167,16	269,49	0,37609	0,54066	0,91675
38	963,68	0,00087	0,02112	104,45	145,58	250,04	105,29	165,1	270,39	0,38548	0,53058	0,91606
40	1017,1	0,00087	0,01995	107,38	143,6	250,97	108,26	163	271,27	0,39486	0,52049	0,91536
42	1072,8	0,00088	0,01886	110,32	141,58	251,89	111,26	160,86	272,12	0,40425	0,51039	0,91464
44	1130,7	0,00089	0,01782	113,28	139,52	252,8	114,28	158,67	272,95	0,41363	0,50027	0,91391
46	1191	0,00089	0,01685	116,26	137,42	253,68	117,32	156,43	273,75	0,42302	0,49012	0,91315
48	1253,6	0,0009	0,01594	119,26	135,29	254,55	120,39	154,14	274,53	0,43242	0,47993	0,91236
52	1386,2	0,00092	0,01427	125,33	130,88	256,21	126,59	149,39	275,98	0,45126	0,45941	0,91067
56	1529,1	0,00093	0,01277	131,49	126,28	257,77	132,91	144,38	277,3	0,47018	0,43863	0,9088
60	1682,8	0,00095	0,01143	137,76	121,46	259,22	139,36	139,1	278,46	0,4892	0,41749	0,90669
65	1891	0,00098	0,00995	145,77	115,05	260,82	147,62	132,02	279,64	0,5132	0,39039	0,90359
70	2118,2	0,001	0,00864	154,01	108,14	262,15	156,13	124,32	280,46	0,53755	0,36227	0,89982
75	2365,8	0,00104	0,00748	162,53	100,6	263,13	164,98	115,85	280,82	0,56241	0,33272	0,89512
80	2635,3	0,00108	0,00644	171,4	92,23	263,63	174,24	106,35	280,59	0,588	0,30111	0,88912
85	2928,2	0,00113	0,00549	180,77	82,67	263,44	184,07	95,44	279,51	0,61473	0,26644	0,88117
90	3246,9	0,00119	0,0046	190,89	71,29	262,18	194,76	82,35	277,11	0,64336	0,22674	0,8701
95	3594,1	0,00129	0,00373	202,4	56,47	258,87	207,05	65,21	272,26	0,67578	0,17711	0,85289
100	3975,1	0,00153	0,00263	218,72	29,19	247,91	224,79	33,58	258,37	0,72217	0,08999	0,81215

**Anexo 2. Refrigerante 134a saturado. Tabla de presión [51].**

Pres., sat., P <sub>sat</sub> kPa	Temp., sat., T °C	Volumen específico, m <sup>3</sup> /kg		Energía Interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía kJ/kg · K		
		Líqu., sat.,	Vapor sat.,	Líqu., sat.,	Evap.,	Vapor sat.,	Líqu., sat.,	Evap.,	Vapor sat.,	Líqu., sat.,	Evap.,	Vapor sat.,
		v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>	u <sub>f</sub>	u <sub>fg</sub>	u <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>fg</sub>	s <sub>g</sub>
60	-36,95	0,00071	0,31121	3,798	205,32	209,12	3,841	223,95	227,79	0,01634	0,94807	0,96441
70	-33,87	0,00071	0,26929	7,680	203,2	210,88	7,730	222	229,73	0,03267	0,92775	0,96042
80	-31,13	0,00072	0,23753	11	201,3	212,46	11	220,25	231,46	0,04711	0,90999	0,9571
90	-28,65	0,00072	0,21263	14	199,57	213,88	14	218,65	233,02	0,06008	0,89419	0,95427
100	-26,37	0,00073	0,19254	17,21	197,98	215,19	17,28	217,16	234,44	0,07188	0,87995	0,95183
120	-22,32	0,00073	0,16212	22,4	195,11	217,51	22,49	214,48	236,97	0,09275	0,85503	0,94779
140	-18,77	0,00074	0,14014	26,98	192,57	219,54	27,08	212,08	239,16	0,11087	0,83368	0,94456
160	-15,6	0,00074	0,12348	31,09	190,27	221,35	31,21	209,9	241,11	0,12693	0,81496	0,9419
180	-12,73	0,00075	0,11041	34,83	188,16	222,99	34,97	207,9	242,86	0,14139	0,79826	0,93965
200	-10,09	0,00075	0,09987	38,28	186,21	224,48	38,43	206,03	244,46	0,15457	0,78316	0,93773
240	-5,38	0,00076	0,0839	44,48	182,67	227,14	44,66	202,62	247,28	0,17794	0,75664	0,93458
280	-1,25	0,00077	0,07235	49,97	179,5	229,46	50,18	199,54	249,72	0,19829	0,73381	0,9321
320	2,46	0,00078	0,0636	54,92	176,61	231,52	55,16	196,71	251,88	0,21637	0,71369	0,93006
360	5,82	0,00078	0,05674	59,44	173,94	233,38	59,72	194,08	253,81	0,2327	0,69566	0,92836
400	8,91	0,00079	0,0512	63,62	171,45	235,07	63,94	191,62	255,55	0,24761	0,67929	0,92691
450	12,46	0,0008	0,04562	68,45	168,54	237	68,81	188,71	257,53	0,26465	0,66069	0,92535
500	15,71	0,00081	0,04112	72,93	165,82	238,75	73,33	185,98	259,3	0,28023	0,64377	0,924
550	18,73	0,00081	0,03741	77,1	163,25	240,35	77,54	183,38	260,92	0,29461	0,62821	0,92282
600	21,55	0,00082	0,0343	81,02	160,81	241,83	81,51	180,9	262,4	0,30799	0,61378	0,92177
650	24,2	0,00083	0,03165	84,72	158,48	243,2	85,26	178,51	263,77	0,32051	0,6003	0,92081
700	26,69	0,00083	0,02936	88,24	156,24	244,48	88,82	176,21	265,03	0,3323	0,58763	0,91994
750	29,06	0,00084	0,02737	91,59	154,08	245,67	92,22	173,98	266,2	0,34345	0,57567	0,91912
800	31,31	0,00085	0,02562	94,79	152	246,79	95,47	171,82	267,29	0,35404	0,56431	0,91835
850	33,45	0,00085	0,02407	97,87	149,98	247,85	98,6	169,71	268,31	0,36413	0,55349	0,91762
900	35,51	0,00086	0,02268	100,83	148,01	248,85	101,61	167,66	269,26	0,37377	0,54315	0,91692
950	37,48	0,00086	0,02144	103,69	146,1	249,79	104,51	165,64	270,15	0,38301	0,53323	0,91624
1000	39,37	0,00087	0,02031	106,45	144,23	250,68	107,32	163,67	270,99	0,39189	0,52368	0,91558
1200	46,29	0,00089	0,01672	116,7	137,11	253,81	117,77	156,1	273,87	0,42441	0,48863	0,91303
1400	52,4	0,00092	0,01411	125,94	130,43	256,37	127,22	148,9	276,12	0,45315	0,45734	0,9105
1600	57,88	0,00094	0,01212	134,43	124,04	258,47	135,93	141,93	277,86	0,47911	0,42873	0,90784
1800	62,87	0,00096	0,01056	142,33	117,83	260,17	144,07	135,11	279,17	0,50294	0,40204	0,90498
2000	67,45	0,00099	0,00929	149,78	111,73	261,51	151,76	128,33	280,09	0,52509	0,37675	0,90184
2500	77,54	0,00106	0,00694	166,99	96,47	263,45	169,63	111,16	280,79	0,57531	0,31695	0,89226
3000	86,16	0,00114	0,00528	183,04	80,22	263,26	186,46	92,63	279,09	0,62118	0,25776	0,87894

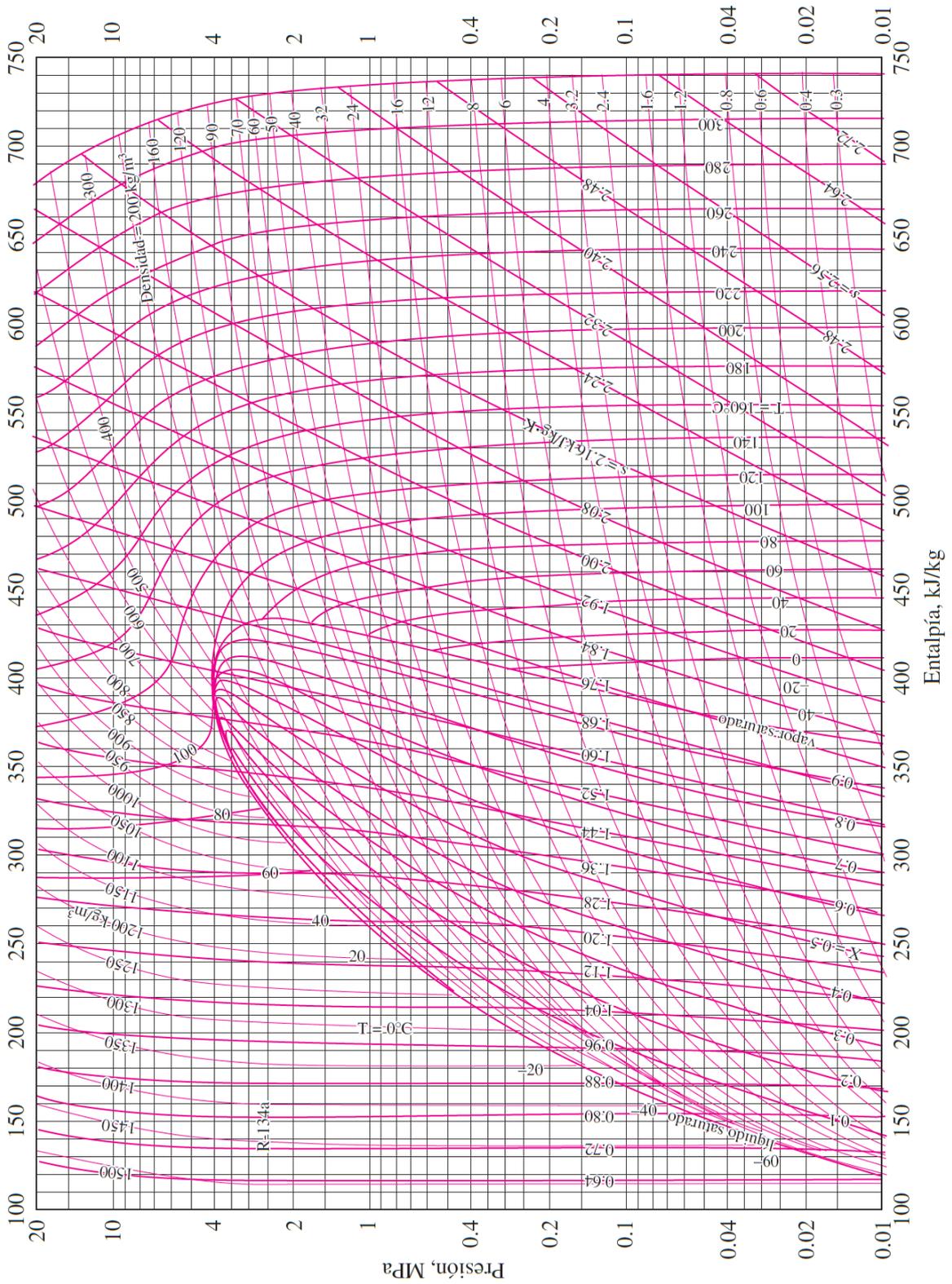
### Anexo 3. Refrigerante 134a sobrecalentado [51].

<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg,K	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg,K	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg,K
P = 0,06 MPa (T <sub>sat</sub> = -36,95 °C)				P = 0,10 MPa (T <sub>sat</sub> = -26,37 °C)				P = 0,14 MPa (T <sub>sat</sub> = -18,77 °C)				
Sat,	0,311210	209,12	227,79	0,9644	0,192540	215,19	234,44	0,9518	0,140140	219,54	239,16	0,9446
-20	0,336080	220,60	240,76	1,0174	0,198410	219,66	239,50	0,9721				
-10	0,350480	227,55	248,58	1,0774	0,207430	226,75	247,49	1,0030	0,146050	225,91	246,36	0,9724
0	0,364760	234,66	256,54	1,0774	0,216300	233,95	255,58	1,0332	0,152630	233,23	254,60	1,0031
10	0,378930	241,92	264,66	1,1066	0,225060	241,30	263,81	1,0628	0,159080	240,66	262,93	1,0331
20	0,393020	249,35	272,94	1,1353	0,233730	248,79	272,17	1,0918	0,165440	248,22	271,38	1,0624
30	0,407050	256,95	281,37	1,1636	0,242330	256,44	280,68	1,1203	0,171720	255,93	279,97	1,0912
40	0,421020	264,71	289,97	1,1915	0,250880	264,25	289,34	1,1484	0,177940	263,79	288,70	1,1195
50	0,434950	272,64	298,74	1,2191	0,259370	272,22	298,16	1,1762	0,184120	271,79	297,57	1,1474
60	0,448830	280,73	307,66	1,2463	0,267830	280,35	307,13	1,2035	0,190250	279,96	306,59	1,1749
70	0,462690	288,99	316,75	1,2732	0,276260	288,64	316,26	1,2305	0,196350	288,28	315,77	1,2020
80	0,476510	297,41	326,00	1,2997	0,284650	297,08	325,55	1,2572	0,202420	296,75	325,09	1,2288
90	0,490320	306,00	335,42	1,3260	0,293030	305,69	334,99	1,2836	0,208470	305,38	334,57	1,2553
100	0,504100	314,74	344,99	1,3520	0,301380	314,46	344,60	1,3096	0,214490	314,17	344,20	1,2814
P = 0,18 MPa (T <sub>sat</sub> = -12,73 °C)				P = 0,20 MPa (T <sub>sat</sub> = -10,09 °C)				P = 0,24 MPa (T <sub>sat</sub> = -5,38 °C)				
Sat,	0,110410	222,99	242,86	0,9397	0,099870	224,48	244,46	0,9377	0,083900	227,14	247,28	0,9346
-10	0,111890	225,02	245,16	0,9484	0,099910	224,55	244,54	0,9380				
0	0,117220	232,48	253,58	0,9798	0,104810	232,09	253,05	0,9698	0,086170	231,29	251,97	0,9519
10	0,122400	240,00	262,04	1,0102	0,109550	239,67	261,58	1,0004	0,090260	238,98	260,65	0,9831
20	0,127480	247,64	270,59	1,0399	0,114180	247,35	270,18	1,0303	0,094230	246,74	269,36	1,0134
30	0,132480	255,41	279,25	1,0690	0,118740	255,14	278,89	1,0595	0,098120	254,61	278,16	1,0429
40	0,137410	263,31	288,05	1,0975	0,123220	263,08	287,72	1,0882	0,101930	262,59	287,06	1,0718
50	0,142300	271,36	296,98	1,1256	0,127660	271,15	296,68	1,1163	0,105700	270,71	296,08	1,1001
60	0,147150	279,56	306,05	1,1532	0,132060	279,37	305,78	1,1441	0,109420	278,97	305,23	1,1280
70	0,151960	287,91	315,27	1,1805	0,136410	287,73	315,01	1,1714	0,113100	287,36	314,51	1,1554
80	0,156730	296,42	324,63	1,2074	0,140740	296,25	324,40	1,1983	0,116750	295,91	323,93	1,1825
90	0,161490	305,07	334,14	1,2339	0,145040	304,92	333,93	1,2249	0,120380	304,60	333,49	1,2092
100	0,166220	313,88	343,80	1,2602	0,149330	313,74	343,60	1,2512	0,123980	313,44	343,20	1,2356
P = 0,28 MPa (T <sub>sat</sub> = -1,25 °C)				P = 0,32 MPa (T <sub>sat</sub> = 2,46 °C)				P = 0,40 MPa (T <sub>sat</sub> = 8,91 °C)				
Sat,	0,072350	229,46	249,72	0,9321	0,063600	231,52	251,88	0,9301	0,051201	235,07	255,55	0,9269
0	0,072820	230,44	250,83	0,9362								
10	0,076460	238,27	259,68	0,9680	0,066090	237,54	258,69	0,9544	0,051506	235,97	256,58	0,9305
20	0,079970	246,13	268,52	0,9987	0,069250	245,50	267,66	0,9856	0,054213	244,18	265,86	0,9628
30	0,083380	254,06	277,41	1,0285	0,072310	253,50	276,65	1,0157	0,056796	252,36	275,07	0,9937
40	0,086720	262,10	286,38	1,0576	0,075300	261,60	285,70	1,0451	0,059292	260,58	284,30	1,0236
50	0,090000	270,27	295,47	1,0862	0,078230	269,82	294,85	1,0739	0,061724	268,90	293,59	1,0528
60	0,093240	278,56	304,67	1,1142	0,081110	278,15	304,11	1,1021	0,064104	277,32	302,96	1,0814
70	0,096440	286,99	314,00	1,1418	0,083950	286,62	313,48	1,1298	0,066443	285,86	312,44	1,1094
80	0,099610	295,57	323,46	1,1690	0,086750	295,22	322,98	1,1571	0,068747	294,53	322,02	1,1369
90	0,102750	304,29	333,06	1,1958	0,089530	303,97	332,62	1,1840	0,071023	303,32	331,73	1,1640
100	0,105870	313,15	342,80	1,2222	0,092290	312,86	342,39	1,2105	0,073274	312,26	341,57	1,1907
110	0,108970	322,16	352,68	1,2483	0,095030	321,89	352,30	1,2367	0,075504	321,33	351,53	1,2171
120	0,112050	331,32	362,70	1,2742	0,097750	331,07	362,35	1,2626	0,077717	330,55	361,63	1,2431
130	0,115120	340,63	372,87	1,2997	0,100450	340,39	372,54	1,2882	0,079913	339,90	371,87	1,2688
140	0,118180	350,09	383,18	1,3250	0,103140	349,86	382,87	1,3135	0,082096	349,41	382,24	1,2942

**Anexo 3. Refrigerante 134a sobrecalentado (continuación) [51].**

<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg,K	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg,K	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg,K
P = 0,50 MPa (T <sub>sat</sub> = 15,71 °C)				P = 0,60 MPa (T <sub>sat</sub> = 21,55 °C)				P = 0,70 MPa (T <sub>sat</sub> = 26,69 °C)				
Sat,	0,041118	238,75	259,30	0,9240	0,034295	241,83	262,40	0,9218	0,029361	244,48	265,03	0,9199
20	0,042115	242,40	263,46	0,9383								
30	0,044338	250,84	273,01	0,9703	0,035984	249,22	270,81	0,9499	0,029966	247,48	268,45	0,9313
40	0,046456	259,26	282,48	1,0011	0,037865	257,86	280,58	0,9816	0,031696	256,39	278,57	0,9641
50	0,048499	267,72	291,96	1,0309	0,039659	266,48	290,28	1,0121	0,033322	265,20	288,53	0,9954
60	0,050485	276,25	301,50	1,0599	0,041389	275,15	299,98	1,0417	0,034875	274,01	298,42	1,0256
70	0,052427	284,89	311,10	1,0883	0,043069	283,89	309,73	1,0705	0,036373	282,87	308,33	1,0549
80	0,054331	293,64	320,80	1,1162	0,044710	292,73	319,55	1,0987	0,037829	291,80	318,28	1,0835
90	0,056205	302,51	330,61	1,1436	0,046318	301,67	329,46	1,1264	0,039250	300,82	328,29	1,1114
100	0,058053	311,50	340,53	1,1705	0,047900	310,73	339,47	1,1536	0,040642	309,95	338,40	1,1389
110	0,059880	320,63	350,57	1,1971	0,049458	319,91	349,59	1,1803	0,042010	319,19	348,60	1,1658
120	0,061687	329,89	360,73	1,2233	0,050997	329,23	359,82	1,2067	0,043358	328,55	358,90	1,1924
130	0,063479	339,29	371,03	1,2491	0,052519	338,67	370,18	1,2327	0,044688	338,04	369,32	1,2186
140	0,065256	348,83	381,46	1,2747	0,054027	348,25	380,66	1,2584	0,046004	347,66	379,86	1,2444
150	0,067021	358,51	392,02	1,2999	0,055522	357,96	391,27	1,2838	0,047306	357,41	390,52	1,2699
160	0,068775	368,33	402,72	1,3249	0,057006	367,81	402,01	1,3088	0,048597	367,29	401,31	1,2951
P = 0,80 MPa (T <sub>sat</sub> = 31,31 °C)				P = 0,90 MPa (T <sub>sat</sub> = 35,51 °C)				P = 1,00 MPa (T <sub>sat</sub> = 39,37 °C)				
Sat,	0,025621	246,79	267,29	0,9183	0,022683	248,85	269,26	0,9169	0,020313	250,68	270,99	0,9156
40	0,027035	254,82	276,45	0,9480	0,023375	253,13	274,17	0,9327	0,020406	251,30	271,71	0,9179
50	0,028547	263,86	286,69	0,9802	0,024809	262,44	284,77	0,9660	0,021796	260,94	282,74	0,9525
60	0,029973	272,83	296,81	1,0110	0,026146	271,60	295,13	0,9976	0,023068	270,32	293,38	0,9850
70	0,031340	281,81	306,88	1,0408	0,027413	280,72	305,39	1,0280	0,024261	279,59	303,85	1,0160
80	0,032659	290,84	316,97	1,0698	0,028630	289,86	315,63	1,0574	0,025398	288,86	314,25	1,0458
90	0,033941	299,95	327,10	1,0981	0,029806	299,06	325,89	1,0860	0,026492	298,15	324,64	1,0748
100	0,035193	309,15	337,30	1,1258	0,030951	308,34	336,19	1,1140	0,027552	307,51	335,06	1,1031
110	0,036420	318,45	347,59	1,1530	0,032068	317,70	346,56	1,1414	0,028584	316,94	345,53	1,1308
120	0,037625	327,87	357,97	1,1798	0,033164	327,18	357,02	1,1684	0,029592	326,47	356,06	1,1580
130	0,038813	337,40	368,45	1,2061	0,034241	336,76	367,58	1,1949	0,030581	336,11	366,69	1,1846
140	0,039985	347,06	379,05	1,2321	0,035302	346,46	378,23	1,2210	0,031554	345,85	377,40	1,2109
150	0,041143	356,85	389,76	1,2577	0,036349	356,28	389,00	1,2467	0,032512	355,71	388,22	1,2368
160	0,042290	366,76	400,59	1,2830	0,037384	366,23	399,88	1,2721	0,033457	365,70	399,15	1,2623
170	0,043427	376,81	411,55	1,3080	0,038408	376,31	410,88	1,2972	0,034392	375,81	410,20	1,2875
180	0,044554	386,99	422,64	1,3327	0,039423	386,52	422,00	1,3221	0,035317	386,04	421,36	1,3124
P = 1,20 MPa (T <sub>sat</sub> = 46,29 °C)				P = 1,40 MPa (T <sub>sat</sub> = 52,40 °C)				P = 1,60 MPa (T <sub>sat</sub> = 57,88 °C)				
Sat,	0,016715	253,81	273,87	0,9130	0,014107	256,37	276,12	0,9105	0,012123	258,47	277,86	0,9078
50	0,017201	257,63	278,27	0,9267								
60	0,018404	267,56	289,64	0,9614	0,015005	264,46	285,47	0,9389	0,012372	260,89	280,69	0,9163
70	0,019502	277,21	300,61	0,9938	0,016060	274,62	297,10	0,9733	0,013430	271,76	293,25	0,9535
80	0,020529	286,75	311,39	1,0248	0,017023	284,51	308,34	1,0056	0,014362	282,09	305,07	0,9875
90	0,021506	296,26	322,07	1,0546	0,017923	294,28	319,37	1,0364	0,015215	292,17	316,52	1,0194
100	0,022442	305,80	332,73	1,0836	0,018778	304,01	330,30	1,0661	0,016014	302,14	327,76	1,0500
110	0,023348	315,38	343,40	1,1118	0,019597	313,76	341,19	1,0949	0,016773	312,07	338,91	1,0795
120	0,024228	325,03	354,11	1,1394	0,020388	323,55	352,09	1,1230	0,017500	322,02	350,02	1,1081
130	0,025086	334,77	364,88	1,1664	0,021155	333,41	363,02	1,1504	0,018201	332,00	361,12	1,1360
140	0,025927	344,61	375,72	1,1930	0,021904	343,34	374,01	1,1773	0,018882	342,05	372,26	1,1632
150	0,026753	354,56	386,66	1,2192	0,022636	353,37	385,07	1,2038	0,019545	352,17	383,44	1,1900
160	0,027566	364,61	397,69	1,2449	0,023355	363,51	396,20	1,2298	0,020194	362,38	394,69	1,2163
170	0,028367	374,78	408,82	1,2703	0,024061	373,75	407,43	1,2554	0,020830	372,69	406,02	1,2421
180	0,029158	385,08	420,07	1,2954	0,024757	384,10	418,76	1,2807	0,021456	383,11	417,44	1,2676

Anexo 4. Diagrama de Mollier del refrigerante 134a [51].



## Anexo 5. Simbología

### Nomenclatura

$A$  : Colector-evaporador; [ $m^2$ ]

$c_p$  : Calor específico del agua; [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K$ ]

$c_v$  : Coeficiente convectivo de transferencia de calor; [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$COP$  : Coeficiente de funcionamiento de la bomba de calor;

$U_L$  : Coeficiente global de pérdida de calor de la placa colectora; [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$d$  : Diámetro externo del tubo; [ $m$ ]

$S$  : Diferencia entre la radiación solar absorbida por el colector por unidad de área y la pérdida total de calor de radiación de la superficie del colector; [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$w$  : Distancia entre los tubos; [ $m$ ]

$ET$  : Ecuación del tiempo;

$F$  : Eficiencia de la aleta

$\eta_{comp}$  : Eficiencia total del compresor

$\eta_v$  : Eficiencia volumétrica del compresor

$h$  : Entalpía del refrigerante; [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ]

$\delta_p$  : Espesor de la placa del colector; [ $m$ ]

$e$  : Espesor del tubo; [ $m$ ]

$B$  : Factor adimensional

$F'$  : Factor de eficiencia del colector

$R_p$  : Factor geométrico

$\dot{Q}$  : Flujo de calor ganado; [ $W$ ]

$\dot{m}$  : Flujo másico; [ $kg \cdot s^{-1}$ ]

$S_{set}$  : Hora de puesta del sol

$S_{rise}$  : Hora de salida del sol

$H_L$  : Hora local

$H_s$  : Hora solar

$k_T$  : Índice de claridad

$t$  : Intervalo de tiempo desde  $T_{w,i}$  hasta  $T_{w,o}$ ; [s]  
 $L_M$  : Longitud del meridiano más cercano  
 $L_S$  : Longitud Estándar de la ubicación  
 $M_w$  : Masa total de agua en el tanque; [kg]  
 $U_b$  : Número adimensional  
 $N$  : Número del día del año  
 $D$  : Número horas diarias luz solar  
 $p$  : Presión de descarga del compresor; [Pa]  
 $I$  : Radiación; [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $G_x$  = Radiación solar extraterrestre; [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $\dot{W}$  : Tasa de energía consumida; [W]  
 $T$  : Temperatura; [°C]  
 $s_w$  : Velocidad del viento; [ $m \cdot s^{-1}$ ]  
 $s_{rot}$  : Velocidad rotativa del compresor; [r.p.m.]  
 $V_d$  : Volumen de desplazamiento del compresor; [ $m^3$ ]  
 $v$  : Volumen específico del refrigerante; [ $m^3$ ]

### **Símbolos griegos**

$\alpha$  : Absortividad del colector  
 $\gamma$  : Ángulo azimuth  
 $\gamma_s$  : Ángulo azimuth solar  
 $\varphi$  : Ángulo de altitud solar  
 $\theta$  : Ángulo de incidencia  
 $\beta$  : Ángulo de inclinación  
 $\omega$  : Ángulo Horario  
 $\psi$  : Ángulo horario de puesta de sol  
 $z$  : Ángulo zenith  
 $\lambda$  : Conductividad térmica; [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]  
 $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzman; [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ]

$\delta$  : Declinación

$\phi$  : Latitud

$\rho_o$  : Reflectancia del suelo

### **Subíndices**

*w* : Agua

*a* : Ambiente

*atm* : Atmosférica

*sky* : Cielo

*col* : Colector-evaporador

*comp* : Compresor

*cond* : Condensador

*dis* : Descarga

*d* : Difusa

$\varepsilon$  : Emisividad del colector

*i* : Entrada

*x* : Extraterrestre

*m* : Promedio

*r* : Refrigerante

*k* : Relación de calores específicos del refrigerante

*o* : Salida

*suc* : Succión

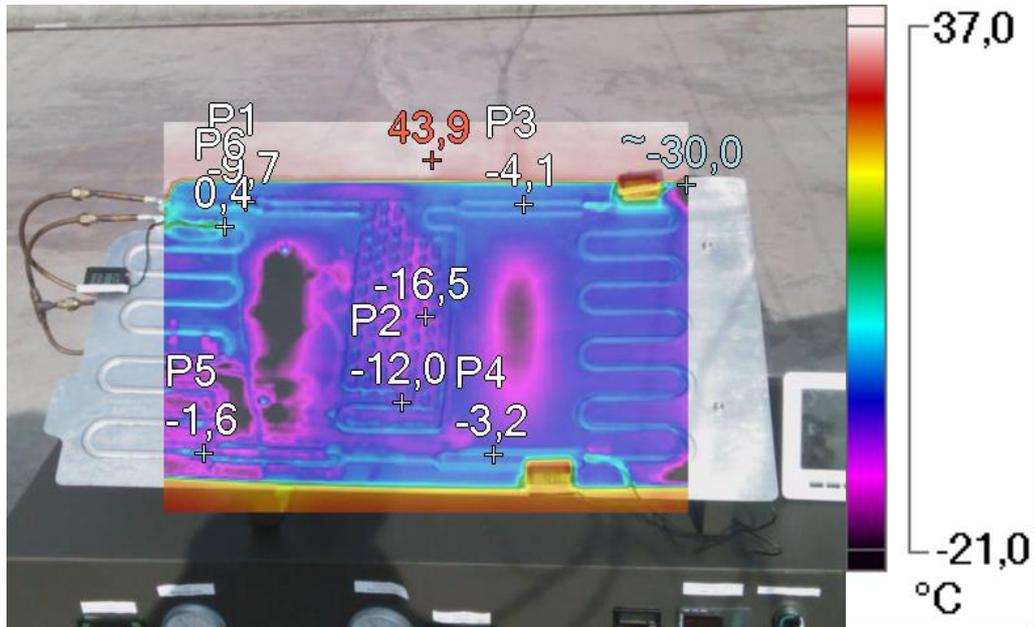
*T* : Total

*val* : Válvula de expansión

## Anexo 6. Imágenes termográficas.

**Tabla A 6.1.** Información del colector- evaporador.

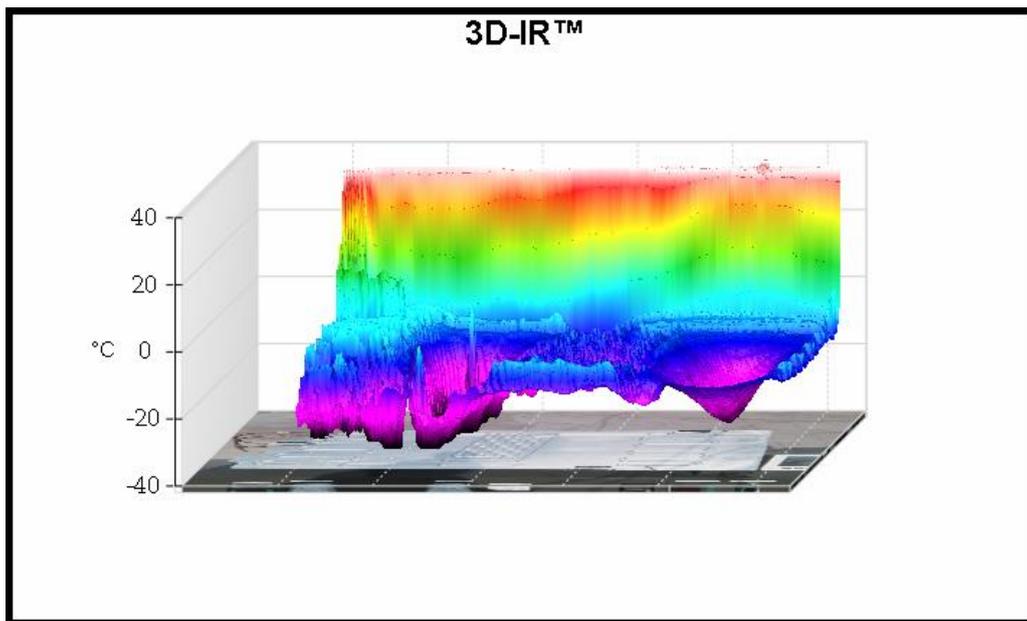
Fecha de inspección:	10/11/2017 15:47:30	Ubicación	GONZALES SUAREZ
Equipo	BOMBA DE CALOR	Nombre del equipo:	Colector-evaporador
Emisividad:	0,70	Temperatura reflejada:	19,0 °C
Fabricante	Fluke Thermography	Cámara:	Ti200-16090393



**Figura A 6.1.** Temperatura del colector-evaporador.



**Figura A 6.2.** Imagen de luz visible del colector-evaporador.



**Figura A 6.3.** Imagen principal del colector-evaporador.

**Tabla A 6.2.** Marcadores de la imagen principal de la temperatura del colector-evaporador.

Nombre	Temperatura	Emisividad
Punto central	-16,5°C	0,70
Caliente	43,9°C	
Frío	~-30,0°C	0,70
P1	-9,7°C	0,70
P2	-12,0°C	0,70
P3	-4,1°C	0,70
P4	-3,2°C	0,70
P5	-1,6°C	0,70
P6	0,4°C	0,70

**Tabla A 6.3.** Información de la imagen del colector-evaporador.

Parámetro	Valor
Temperatura promedio	0,2°C
Rango de la imagen	~-30,0°C a 43,9°C
Modelo de cámara	Ti200
Tamaño de sensor IR	200 x 150
Versión DSP	3.14.0
Hora de la imagen	10/11/2017 15:47:30
Ubicación del archivo	D:\ Imagenes\ CAM FLIR\ IR_00342.IS2
Rango de calibración	-20,0°C a 80,0°C
Distancia al objetivo	2,96m

**Tabla A 6.4.** Información de la temperatura del agua.

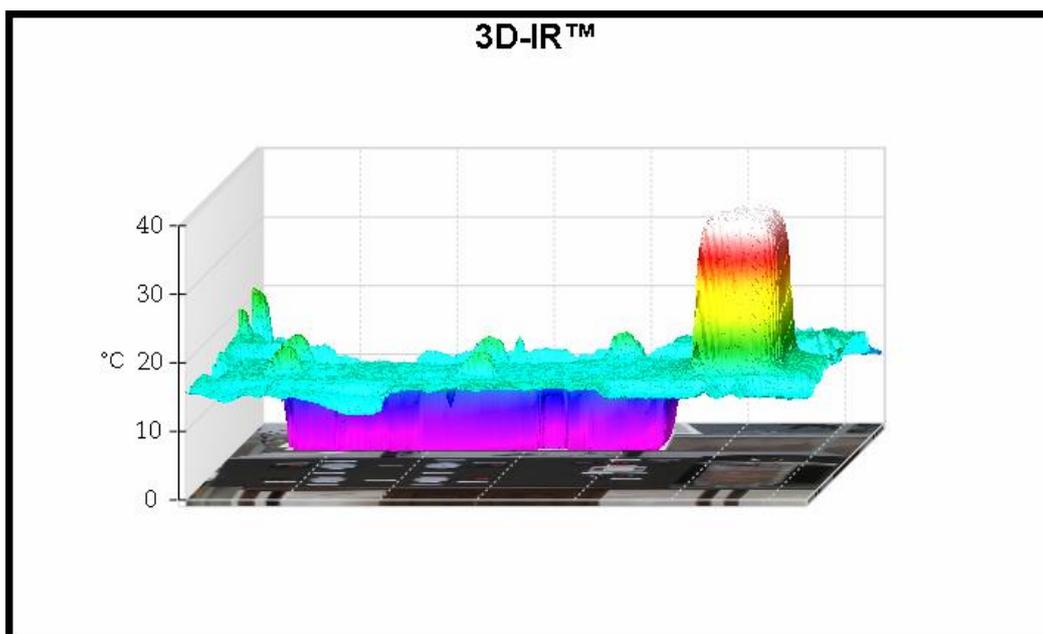
Fecha de inspección:	10/11/2017 15:47:30	Ubicación	GONZALES SUAREZ
Equipo	Bomba de Calor	Nombre del equipo:	Temperatura del agua
Emisividad:	0,70	Temperatura reflejada:	19,0 °C
Fabricante	Fluke Thermography	Cámara:	Ti200-16090393



**Figura A 6.4.** Temperatura del agua.



**Figura A 6.5.** Imagen de luz visible del tanque de almacenamiento.



**Figura A 6.6.** Imagen principal del tanque de almacenamiento.

**Tabla A 6.5.** Marcadores de la imagen principal de la temperatura del agua.

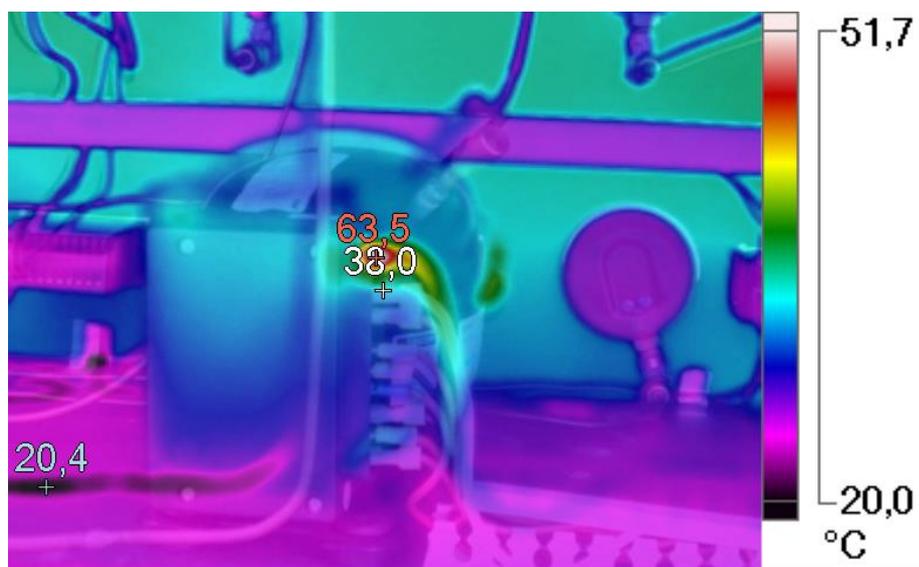
Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo Plano
Punto central	14,1°C	0,70	19,0°C
Caliente	39,3°C	0,70	19,0°C
Frío	-5,2°C	0,70	19,0°C

**Tabla A 6.6.** Información de la imagen de la temperatura del agua.

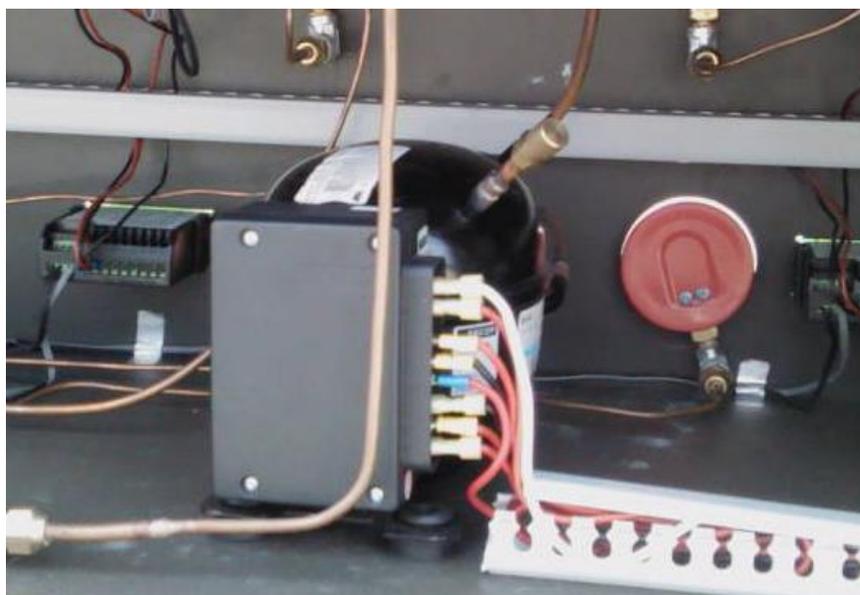
Parámetro	Valor
Temperatura promedio	12,0°C
Rango de la imagen	-5,2°C a 39,3°C
Modelo de cámara	Ti200
Tamaño de sensor IR	200 x 150
Versión DSP	3.14.0
Hora de la imagen	09/11/2017 17:23:10
Ubicación del archivo	D:\Imágenes\CAM FLIR\IR_00328.IS2
Rango de calibración	-20,0°C a 80,0°C
Distancia al objetivo	1,74m

**Tabla A 6.7.** Información del compresor.

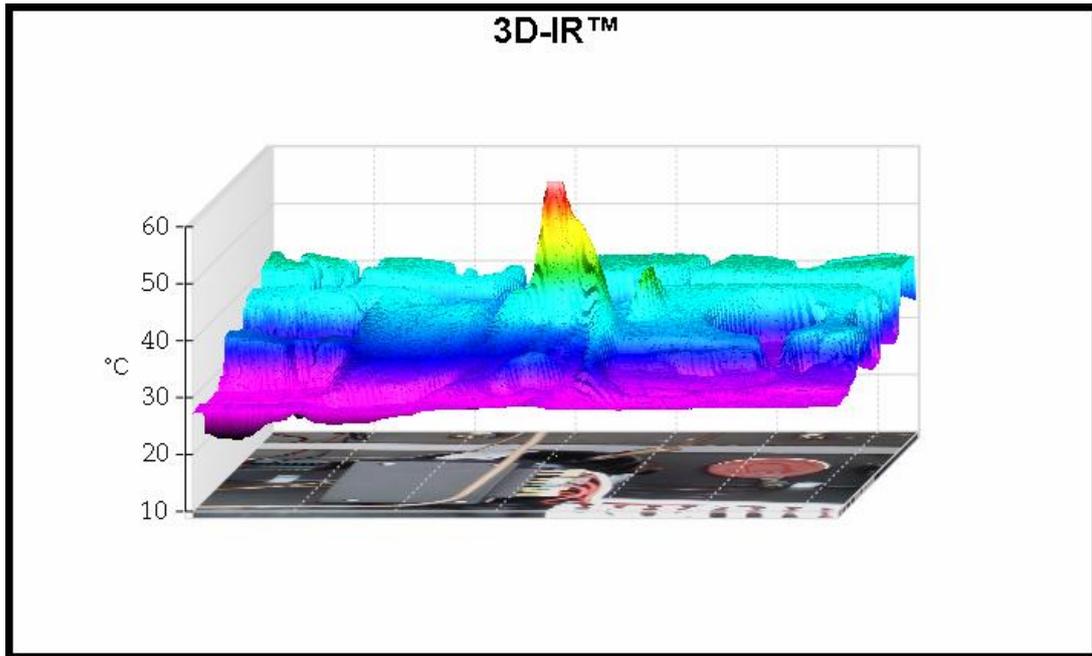
Fecha de inspección:	10/11/2017 15:47:30	Ubicación	GONZALES SUAREZ
Equipo	Bomba de Calor	Nombre del equipo:	Compresor
Emisividad:	0,70	Temperatura reflejada:	19,0 °C
Fabricante	Fluke Thermography	Cámara:	Ti200-16090393



**Figura A 6.7.** Temperatura del compresor.



**Figura A 6.8.** Imagen de luz visible del compresor.



**Figura A 6.9.** Imagen principal del compresor.

**Tabla A 6.8.** Marcadores de la imagen principal de la temperatura del compresor.

Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo Plano
Punto central	38,0°C	0,70	19,0°C
Caliente	63,5°C	0,70	19,0°C
Frío	20,4°C	0,70	19,0°C

**Tabla A 6.9.** Información de la imagen de la temperatura del agua.

Parámetro	Valor
Temperatura promedio	33,6°C
Rango de la imagen	20,4°C a 63,5°C
Modelo de cámara	Ti200
Tamaño de sensor IR	200 x 150
Versión DSP	3.14.0
Hora de la imagen	10/11/2017 15:46:34
Ubicación del archivo	D:\Imágenes\CAM FLIR\IR_00340.IS2
Rango de calibración	-20,0°C a 80,0°C
Distancia al objetivo	2,96m

**Tabla A 6.10.** Información de las tuberías.

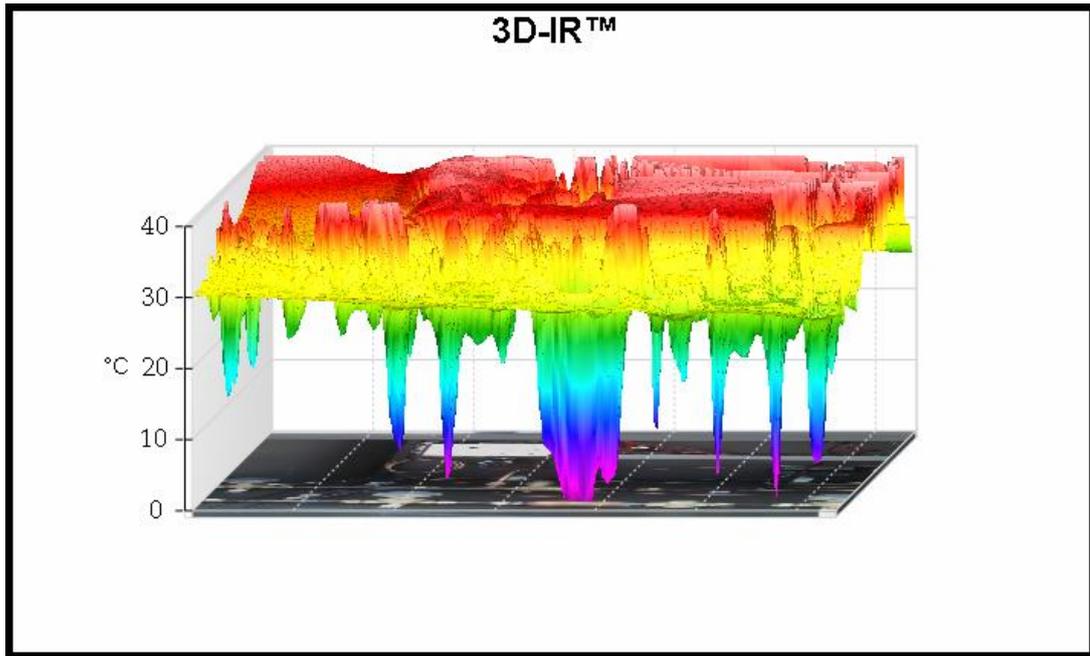
Fecha de inspección:	10/11/2017 15:46:51	Ubicación	GONZALES SUAREZ
Equipo	BOMBA DE CALOR	Nombre del equipo:	Tuberías de alta y baja
Emisividad:	0,70	Temperatura reflejada:	19,0 °C
Fabricante	Fluke Thermography	Cámara:	Ti200-16090393



**Figura A 6.10.** Temperatura de las tuberías.



**Figura A 6.11.** Imagen de luz visible de las tuberías.



**Figura A 6.12.** Imagen principal de las tuberías.

**Tabla A 6.11.** Marcadores de la imagen principal de la temperatura del compresor.

<b>Nombre</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Emisividad</b>	<b>Segundo Plano</b>
Punto central	31,8°C	0,70	19,0°C
Caliente	44,4°C	0,70	19,0°C
Frío	-4,2°C	0,70	19,0°C

**Tabla A 6.12.** Información de la imagen de la temperatura del agua.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura promedio	32,7°C
Rango de la imagen	-4,2°C a 44,4°C
Modelo de cámara	Ti200
Tamaño de sensor IR	200 x 150
Versión DSP	3.14.0
Hora de la imagen	10/11/2017 15:46:51
Ubicación del archivo	D:\Imágenes\CAM FLIR\IR_00341.IS2
Rango de calibración	-20,0°C a 80,0°C
Distancia al objetivo	2,96m

Anexo 7. Proceso de construcción.



Anexo 7. Proceso de construcción. (Continuación)



**Anexo 7. Proceso de construcción. (Continuación)**

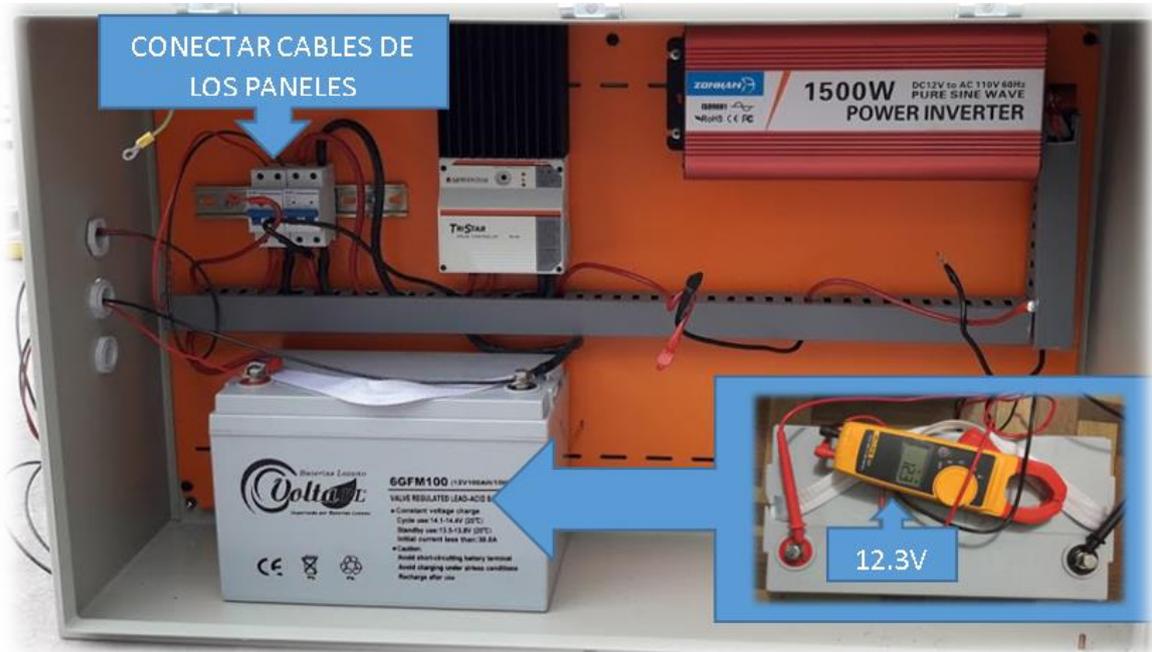


Anexo 7. Proceso de construcción. (Continuación)



## Anexo 8. Manual de operación.

- Conectar el juego de paneles en el contactor para alimentar de energía al sistema y comprobar que la carga de la batería este sobre los 12V



- Colocar el contactor en ON y verificar que en el controlador se encuentre titilando el color amarillo, para confirmar la carga de la batería esté en funcionamiento.



- Seleccionar el compresor 12V, y encender en ON para que se genere el paso de corriente en el sistema, verificar los rangos del presostato se encuentre en 300 PSI alta y 75 PSI baja



- Verificar que se enciendan los controladores de temperatura en el panel, y los manómetros de alta 100 a 250 PSI y baja 30 a 70 PSI estén entre los rangos a trabajar.



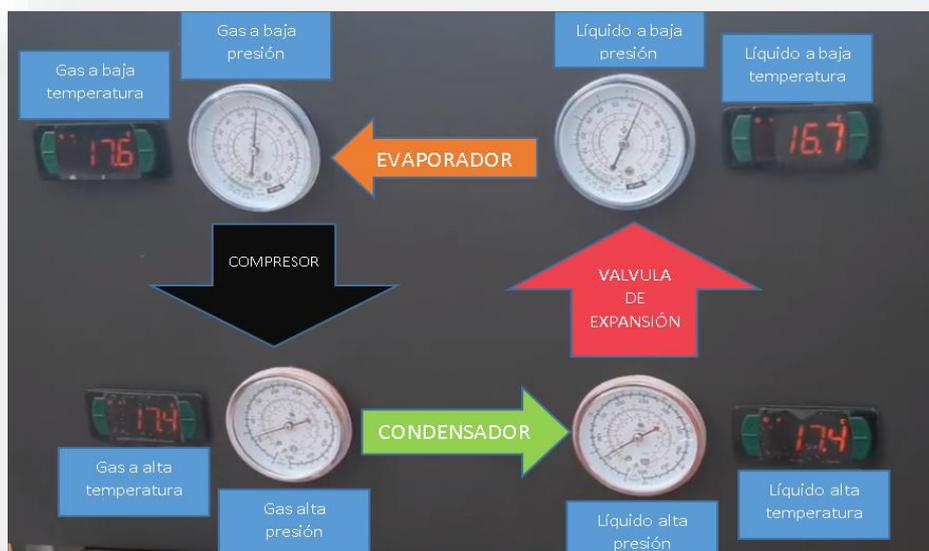
- Llenar el recipiente con agua y verificar en cuántos grados (°C) se encuentra antes encender el compresor.



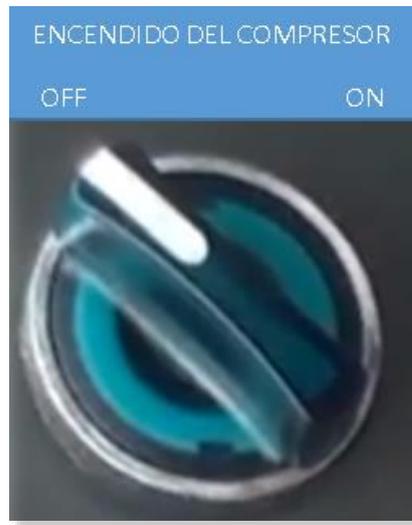
- Una vez encendido el sistema ir controlando la temperatura del agua, el tiempo que recorre desde que se enciende y la temperatura del agua en el controlador que se indica a continuación el cual detalla los tres valores presionando una vez la flecha inferior.



- Durante todo el proceso ir controlando las temperaturas y las presiones del ciclo.



- Una vez que se llegue a la temperatura de 37°C proceder a apagar el sistema y cambiar el agua del recipiente, si nuevamente se quiere realizar pruebas.



## Anexo 9. Manual de mantenimiento.

- Verificar la presión de los manómetros de alta se encuentren en un rango de 150 a 200 PSI y baja de 40 a 75 PSI que se encuentren en los rangos mencionados cuando se encuentre funcionando antes de desconectar el equipo.



- Verificar el funcionamiento de los sondas de temperatura den medidas, antes de desconectar el equipo.



- Verificar el amperaje del compresor no sea mayor a 1 amperio en funcionamiento



- Colocar en OFF los contactores que dan paso a la circulación de corriente.
- Desconectar el equipo de la fuente de energía.



- Revisar que no existan fugas de presión en todo el circuito, con un detector de fugas, o a su vez con agua jabonosa para descartar que existan microfugas de gas.



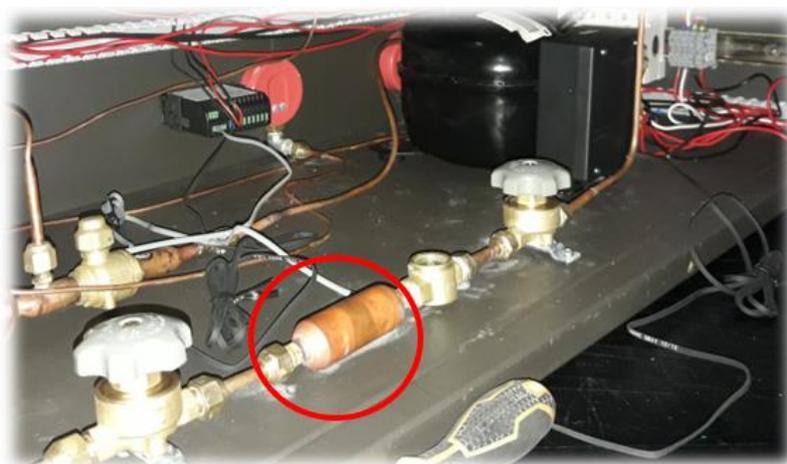
- Verificar que la sonda de temperatura se encuentre conectado en los puntos donde se quiere medir con exactitud las temperaturas.



- Verificar que la suelda de la conexión a la placa con la tubería no se encuentre fisurada.



- Cerrar las válvulas de paso de gas, para proceder a cambiar el filtro.



- La batería tiene que tener 12V o más para el funcionamiento correcto del sistema.



- Una vez que se cambie el filtro, se procede a abrir las válvulas de paso, para que circule gas, se conecta nuevamente a la batería, se prende los contactores para que circule energía y se realiza la prueba de funcionamiento.
- En caso de que haya fugado gas al momento de cambiar el filtro y las presiones no estén acorde a los rangos de trabajo hay que cargar gas por medio del pitillo del compresor, hasta que tenga la presión requerida.



- El funcionamiento debe estar óptimo al seguir los pasos mencionados.

### Mantenimientos básicos

LIMPIEZA	
CAMBIO	
REVISIÓN	
FUNCIONAMIENTO	

ITEMS	SEMANAS																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
LIMPIEZA DE PLACA COLECTORA																								
LIMPIEZA DEL RECIPIENTE DE AGUA																								
LIMPIEZA DE LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA																								
LIMPIEZA DEL PANEL FOTOVOLTAICO																								
ZONAS DE CORROSIÓN																								
SUJECION DE LOS TORNILLOS																								
ESTADO DE LAS ESTRUCTURAS																								
CARGA DE LA BATERÍA																								
AGUA DEL RECIPIENTE																								

Anexo 10. Datos obtenidos el 26 de octubre del 2017.

HORA	T <sub>a</sub> [°C]	S <sub>w</sub> [°C]	I [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>x</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>d</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>atm</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sup>r</sup> [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>est</sub> [W]	m <sub>r</sub> [kg/s]	W <sub>comp</sub> [W]	Q <sub>r</sub> [W]	Q <sub>cond</sub> [W]	Q <sub>w</sub> [W]	T <sub>w</sub> [°C]	COP
10:00:00	22,2	0,1	662,1	1194,2416	115,8675	348,3490	803,4319	21,3496	0,0096	29,0185	10,6667	50,37	39,70	17,2691	4,6513
10:05:00	23,4	0,5	693,2	1207,5024	121,3100	356,9321	840,6548	26,2008	0,0060	27,1825	13,0576	53,38	40,33	20,6780	7,8120
10:10:00	24,1	0,0	708,8	1220,1892	124,0400	362,0198	859,0794	25,3966	0,0063	73,1732	12,5192	98,57	86,05	23,8334	2,9511
10:15:00	24,5	0,2	693,6	1232,2960	121,3800	364,9541	840,2049	25,5288	0,0062	84,7243	12,7172	110,25	97,54	26,5980	2,5401
10:20:00	24,8	1,1	692,6	1243,8170	121,2050	367,1678	838,5724	29,5183	0,0083	100,3967	14,7290	129,91	115,19	29,1510	2,1414
10:25:00	25,0	1,0	703,9	1254,7467	123,1825	368,6498	851,8552	29,4015	0,0079	71,6968	14,6822	101,10	86,42	31,5386	2,9992
10:30:00	25,0	0,2	695,4	1265,0800	121,6950	368,6498	841,2023	25,8254	0,0102	100,0081	12,9012	125,83	112,93	34,2187	2,1475
10:35:00	25,1	0,1	688,0	1274,8119	120,4000	369,3926	831,9149	26,7189	0,0064	78,6840	13,3502	105,40	92,05	35,7555	2,7527
10:40:00	25,1	0,0	738,5	1283,9378	129,2375	369,3926	892,6454	26,4742	0,0080	105,1203	13,2284	131,59	118,37	37,8311	2,0362
10:45:00	25,2	0,1	726,7	1292,4533	127,1725	370,1368	878,0807	26,3026	0,0102	136,3385	13,1434	162,64	149,50	39,9285	1,5760
10:50:00	25,3	0,8	783,1	1300,3544	137,0425	370,8821	945,9317	29,0809	0,0094	67,9681	14,5250	97,05	82,52	21,7829	2,6905
10:55:00	25,4	1,1	800,8	1307,6373	140,1400	371,6287	967,0346	31,3563	0,0079	46,5786	15,6505	77,93	62,28	23,2440	3,9190
11:00:00	25,5	0,1	840,5	1314,2986	147,0875	372,3766	1014,7122	30,4041	0,0078	27,9708	15,1192	58,37	43,26	25,7200	7,6960
11:05:00	25,7	0,0	841,9	1320,3351	147,3325	373,8761	1016,1655	29,4444	0,0076	38,6946	14,4036	68,14	53,74	28,7418	5,5444
11:10:00	26,0	1,2	497,5	1325,7439	87,0625	376,1348	600,3535	23,2309	0,0077	95,4944	11,5891	118,73	107,14	31,7797	2,2452
11:15:00	25,9	0,5	436,7	1330,5225	76,4225	375,3806	526,8880	22,7439	0,0064	88,1097	11,3579	110,85	99,50	33,7884	2,4715
11:20:00	25,7	0,1	497,1	1334,6685	86,9925	373,8761	599,6680	21,9825	0,0062	80,8553	10,9816	102,84	91,86	35,4972	2,6829
11:25:00	25,3	0,2	407,9	1338,1800	71,3825	370,8821	491,9982	19,4331	0,0083	96,1898	9,7101	115,62	105,91	37,1121	2,2462
11:30:00	25,0	0,1	568,8	1341,0553	99,5400	368,6498	685,9979	22,8087	0,0081	119,5579	11,3967	142,37	130,97	39,1515	1,7984
11:35:00	24,7	0,0	600,2	1343,2931	105,0350	366,4286	723,8073	22,7021	0,0078	116,5944	11,3441	139,30	127,95	40,5227	1,8401
11:40:00	24,2	0,1	722,1	1344,8923	126,3675	362,7515	870,7601	23,0585	0,0085	70,3772	11,5258	93,44	81,91	17,1784	2,5911
11:45:00	24,1	0,5	725,9	1345,8521	127,0325	362,0198	875,3113	27,7196	0,0079	56,3930	13,8494	84,11	70,26	20,1393	3,8064
11:50:00	24,3	0,2	796,1	1346,1721	139,3175	363,4845	959,9491	27,9049	0,0078	96,1404	13,9361	124,05	110,11	24,5782	2,2390
11:55:00	24,6	0,0	1074,0	1345,8521	187,9500	365,6907	1295,0604	35,6685	0,0075	108,6701	17,7945	144,34	126,54	27,7115	1,9800
12:00:00	24,4	1,1	1019,0	1344,8923	178,3250	364,2186	1228,7835	34,9442	0,0093	27,3836	17,3777	62,33	44,95	29,3369	6,3063
12:05:00	24,2	0,1	565,1	1343,2931	98,8925	362,7515	681,4787	20,3638	0,0076	91,4218	10,1486	111,79	101,64	33,5140	2,3474
12:10:00	23,9	2,8	361,1	1341,0553	63,1925	360,5600	435,5025	29,7055	0,0081	87,5460	14,8294	117,25	102,42	34,3234	2,4696
12:15:00	23,1	2,2	354,1	1338,1800	61,9675	354,7700	427,1061	27,0476	0,0082	89,9476	13,5105	117,00	103,48	35,3889	2,3781
12:20:00	21,9	2,5	305,0	1334,6685	545,2286	346,2303	854,0654	39,1003	0,0111	146,6201	19,5289	185,72	166,19	37,4881	1,4593
12:25:00	20,5	1,8	265,8	1330,5225	426,6889	336,4845	696,4464	29,4905	0,0063	85,6151	14,7356	115,11	100,37	37,9591	2,4873
12:30:00	19,4	0,2	278,3	1325,7439	462,4902	328,9884	744,8118	20,1584	0,0098	64,0239	10,0626	84,18	74,12	22,9853	2,6122
12:35:00	18,4	1,1	370,2	1320,3351	64,7850	322,2951	446,8280	16,4006	0,0087	57,8163	8,1648	74,22	66,05	25,5890	3,6710
12:40:00	17,5	1,2	729,7	1314,2986	127,6975	316,3685	880,9465	22,8229	0,0082	44,2460	11,3842	67,07	55,68	28,2982	4,7811
12:45:00	17,3	2,2	441,5	1307,6373	77,2625	315,0639	533,1491	12,9080	0,0081	79,5700	6,4476	92,48	86,03	30,5276	2,6664
12:50:00	17,2	2,5	445,2	1300,3544	77,9100	314,4132	537,7714	13,7583	0,0082	85,1370	6,8749	98,90	92,02	32,6991	2,4965
12:55:00	17,3	0,5	632,0	1292,4533	110,6000	315,0639	763,6535	18,3801	0,0080	95,2643	9,1842	113,64	104,46	34,8477	2,2172
13:00:00	17,4	1,8	867,6	1283,9378	151,8300	315,7156	1048,6921	27,8289	0,0079	104,9747	13,9005	132,80	118,90	36,9202	2,0262
13:05:00	17,8	2,2	792,3	1274,8119	138,6525	318,3338	958,0323	20,4954	0,0076	100,0022	10,2410	120,50	110,26	38,0536	2,1034
13:10:00	17,9	2,5	845,1	1265,0800	147,8925	318,9912	1022,2895	21,0425	0,0078	118,8012	10,5154	139,84	129,33	40,3358	1,7806
13:15:00	18,2	1,8	819,6	1254,7467	143,4300	320,9701	991,8746	20,4305	0,0097	127,7881	10,2098	148,22	138,01	41,9188	1,5980

Datos obtenidos el 26 de octubre del 2017. (Continuación)

HORA	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T <sub>i, col</sub> [°C]	T <sub>o, col</sub> [°C]	T <sub>i, comp</sub> [°C]	T <sub>o, comp</sub> [°C]	T <sub>i, cond</sub> [°C]	T <sub>o, cond</sub> [°C]	P <sub>i, col</sub> [°C]	P <sub>o, col</sub> [°C]	P <sub>i, comp</sub> [°C]	P <sub>o, comp</sub> [°C]	P <sub>i, cond</sub> [°C]	P <sub>o, cond</sub> [°C]
10:00:00	12,5	13,3	13,9	14,4	20,4	22,3	22,3	23,5	23,5	22,6	382,65901	334,39571	334,39571	517,10678	517,10678	448,15921
10:05:00	10,5	11,3	13,7	12,3	18,6	21,1	21,1	22,6	22,6	21,2	334,39571	296,47455	296,47455	551,58056	551,58056	482,63299
10:10:00	10	10,8	12,1	13,3	18	22,5	22,5	23,7	23,7	22,3	317,15882	279,23766	279,23766	655,00192	655,00192	517,10678
10:15:00	10,6	11,3	11,9	13,1	18,2	23,2	23,2	24,4	24,4	22,9	327,50096	286,13242	286,13242	689,4757	689,4757	620,52813
10:20:00	9,9	11,2	11,6	13,2	17,5	23,4	23,4	25,3	25,3	23,2	330,94834	286,13242	286,13242	723,94949	723,94949	689,4757
10:25:00	11,4	12,1	14,8	12,8	18	23,4	23,4	26,3	26,3	23,8	327,50096	303,36931	303,36931	792,89706	792,89706	758,42327
10:30:00	11,3	12,5	14,3	12,3	18,3	23,6	23,6	27,3	27,3	24,9	330,94834	306,81669	306,81669	861,84463	861,84463	827,37084
10:35:00	9,2	10,6	10,9	13,8	16,4	22,6	22,6	27,7	27,7	24,4	313,71144	272,3429	272,3429	965,26598	965,26598	896,31841
10:40:00	10,9	12,3	13	15,5	18,2	23,9	23,9	29,3	29,3	25,9	341,29047	296,47455	296,47455	1034,2136	1034,2136	965,26598
10:45:00	10,9	12,5	12,6	12,3	18,1	24,5	24,5	30,3	30,3	26,9	337,84309	303,36931	303,36931	1068,6873	1068,6873	999,73977
10:50:00	14,1	14,1	14,5	16,3	19,9	24,7	24,7	27,5	27,5	26	368,8695	334,39571	334,39571	758,42327	758,42327	723,94949
10:55:00	11,4	12,8	13,2	13,4	19,9	23,9	23,9	27	27	26	368,8695	303,36931	303,36931	689,4757	689,4757	723,94949
11:00:00	11,4	12,5	14,2	14,5	17,6	24,6	24,6	27,8	27,8	24,9	334,39571	306,81669	306,81669	896,31841	896,31841	827,37084
11:05:00	11,8	13,1	13,5	13,6	18,3	25,7	25,7	29,3	29,3	26,3	348,18523	313,71144	313,71144	827,37084	827,37084	758,42327
11:10:00	10,6	11	11,1	12,3	18,3	25,4	25,4	30,1	30,1	26,3	348,18523	306,81669	306,81669	999,73977	999,73977	758,42327
11:15:00	9,4	9,8	10,2	12,6	13,5	23,9	23,9	30	30	26,9	313,71144	272,3429	272,3429	1068,6873	1068,6873	999,73977
11:20:00	9,6	10,1	10,5	12,5	13,7	23,6	23,6	30,4	30,4	27,1	317,15882	279,23766	279,23766	1068,6873	1068,6873	1034,2136
11:25:00	9,8	10,3	10,2	10,5	13,4	23,7	23,7	31,5	31,5	27,5	324,05358	286,13242	286,13242	1068,6873	1068,6873	1034,2136
11:30:00	10,9	11,9	12,3	14,2	14,9	24	24	32,2	32,2	28,2	334,39571	293,02717	293,02717	1206,5825	1206,5825	1103,1611
11:35:00	10,7	12,1	12,4	13,5	15,1	24,6	24,6	33,2	33,2	28,6	341,29047	303,36931	303,36931	1241,0563	1241,0563	1172,1087
11:40:00	17,3	17,3	18,4	19,2	20,1	26,8	26,8	36,7	36,7	30,3	441,26445	375,76426	375,76426	723,94949	723,94949	655,00192
11:45:00	10,8	12,3	12,9	13,5	16	24,2	24,2	29,6	29,6	25,7	337,84309	299,92193	299,92193	827,37084	827,37084	792,89706
11:50:00	11,6	12,6	14,1	14,7	17,1	25,4	25,4	30,2	30,2	26,5	341,29047	303,36931	303,36931	999,73977	999,73977	930,7922
11:55:00	12,7	13,8	15,9	16,1	18	26,4	26,4	31,5	31,5	28,1	348,18523	313,71144	313,71144	1103,1611	1103,1611	1034,2136
12:00:00	13,2	15,1	15,2	15,5	19,1	26,3	26,3	37,8	37,8	22,7	372,31688	334,39571	334,39571	965,26598	965,26598	896,31841
12:05:00	11,7	11,9	12,4	13,6	16,4	25,7	25,7	32,3	32,3	29,5	348,18523	310,26407	310,26407	1068,6873	1068,6873	1034,2136
12:10:00	10,5	10,9	11,1	11,7	13,4	23,1	23,1	30,8	30,8	26,9	317,15882	293,02717	293,02717	1034,2136	1034,2136	965,26598
12:15:00	9,8	10,6	10,5	10,8	12,7	21,8	21,8	30,6	30,6	25,8	327,50096	289,57979	289,57979	1068,6873	1068,6873	1034,2136
12:20:00	9,1	10,2	10,7	13	11,9	20,7	20,7	30,5	30,5	25,1	320,6062	279,23766	279,23766	1172,1087	1172,1087	1103,1611
12:25:00	9,3	9,4	9,7	10,9	11,8	19,6	19,6	29,4	29,4	24,4	320,6062	279,23766	279,23766	1172,1087	1172,1087	1137,6349
12:30:00	13,1	14	14,2	14,5	16,4	20,1	20,1	25,2	25,2	24,5	372,3169	327,501	327,501	792,8971	792,8971	723,9495
12:35:00	9,4	10,3	10,5	10,8	12,2	18,8	18,8	25,9	25,9	22	320,6062	279,2377	279,2377	827,3708	827,3708	792,8971
12:40:00	10,9	12,2	12,9	15,3	14,5	20,2	20,2	27	27	23,7	334,3957	296,4746	296,4746	792,8971	792,8971	723,9495
12:45:00	10,5	11,2	11,8	12,8	14	20,9	20,9	28,1	28,1	25	334,3957	296,4746	296,4746	965,266	965,266	896,3184
12:50:00	10,3	11,1	11,5	12,6	13,4	20,8	20,8	28,5	28,5	24,7	330,9483	293,0272	293,0272	999,7398	999,7398	930,7922
12:55:00	11,1	12,7	13,3	15,5	15,4	20,8	20,8	28,8	28,8	25,4	341,2905	299,9219	299,9219	1068,6873	1068,6873	999,7398
13:00:00	11,8	13,6	14,5	16,3	12	22,1	22,1	30,2	30,2	28,3	337,8431	303,3693	303,3693	1137,6349	1137,6349	1068,6873
13:05:00	11,9	13,8	14,1	16,9	16,6	21,9	21,9	30,9	30,9	29	355,08	313,7114	313,7114	1172,1087	1172,1087	1068,6873
13:10:00	12,1	13,5	14,9	16,1	17	22,2	22,2	31,1	31,1	30	348,1852	306,8167	306,8167	1241,0563	1241,0563	1172,1087
13:15:00	12,5	13,4	14	16,2	17,4	23,1	23,1	32,5	32,5	31,5	361,9747	320,6062	320,6062	1206,5825	1206,5825	1137,6349

Anexo 11. Datos obtenidos el 30 de octubre del 2017.

HORA	T <sub>a</sub> [°C]	S <sub>w</sub> [°C]	I [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>x</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>d</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>atm</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sup>r</sup> [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>est</sub> [W]	m <sub>r</sub> [kg/s]	W <sub>comp</sub> [W]	Q <sub>r</sub> [W]	Q <sub>cond</sub> [W]	Q <sub>w</sub> [W]	T <sub>w</sub> [°C]	COP
10:00:00	20,8	0,0	391,3	1193,1737	68,4775	338,5534	475,5455	10,3125	0,0059	38,8552	5,1546	49,17	44,01	18,4309	2,8929
10:05:00	21,5	0,1	342,6	1206,4222	59,9550	343,4221	416,0937	16,0503	0,0038	23,0621	8,0044	39,11	31,11	21,7459	7,8917
10:10:00	24,1	0,0	708,8	1219,0973	124,0400	362,0198	860,3332	30,9458	0,0041	38,6260	15,4132	69,57	54,16	25,0763	5,8008
10:15:00	22,3	0,5	355,0	1231,1929	62,1250	349,0576	430,6528	21,5222	0,0057	60,2274	10,7443	81,75	71,01	28,0178	3,6750
10:20:00	22,1	0,2	379,2	1242,7032	66,3600	347,6415	459,7686	19,9498	0,0039	60,1916	9,9647	80,14	70,18	30,6059	3,6829
10:25:00	21,6	0,0	401,8	1253,6228	70,3150	344,1223	486,9321	18,6208	0,0039	69,1007	9,2994	87,72	78,42	30,7241	3,2012
10:30:00	20,8	0,5	570,6	1263,9466	99,8550	338,5534	691,1824	19,7809	0,0064	31,1064	9,8842	50,89	41,00	32,7877	5,4045
10:35:00	20,2	1,1	301,9	1273,6695	535,5668	334,4261	842,4042	25,9632	0,0056	69,3479	12,9725	95,31	82,34	33,8442	3,0793
10:40:00	19,2	0,8	349,5	1282,7869	61,1625	327,6406	423,0147	14,6180	0,0066	27,6318	7,3062	42,25	34,94	33,8007	5,9985
10:45:00	19,5	1,2	297,9	1291,2946	522,7604	329,6641	825,3318	27,7430	0,0055	63,7268	13,8626	91,47	77,61	34,8899	3,2962
10:50:00	19,3	0,1	306,5	1299,1884	550,5344	328,3139	861,5643	24,3947	0,0046	28,4060	12,1841	52,80	40,62	19,0822	7,5429
10:55:00	19,2	1,1	271,3	1306,4646	442,5070	327,6406	718,2635	29,5791	0,0034	55,8677	14,7300	85,45	70,72	22,5136	4,0074
11:00:00	18,7	0,8	212,5	1313,1197	294,3643	324,2911	510,9209	22,3039	0,0040	78,7449	10,6183	101,05	90,43	25,2962	2,8166
11:05:00	17,8	0,0	196,0	1319,1506	259,6001	318,3338	459,4289	15,2686	0,0056	50,6376	7,6218	65,91	58,28	26,0354	4,1215
11:10:00	17,8	0,2	196,0	1324,5544	259,6001	318,3338	459,3776	16,1566	0,0056	12,4313	8,0700	28,59	20,52	26,7941	1,3587
11:15:00	17,5	1,8	133,6	1329,3285	151,5847	316,3685	288,0376	14,9633	0,0046	62,8124	7,4772	77,78	70,30	28,3076	3,4008
11:20:00	16,8	2,2	111,4	1333,4707	120,7931	311,8219	234,6181	15,4093	0,0050	50,2698	7,7005	65,68	57,98	29,0310	4,2581
11:25:00	16,4	1,5	107,4	1336,9790	115,5966	309,2485	225,3271	12,2016	0,0055	43,2358	6,0985	55,44	49,34	28,8658	4,7900
11:30:00	14,6	1,1	113,2	1339,8517	123,1646	297,8857	238,7895	8,4681	0,0057	49,9904	4,2331	58,46	54,23	29,4218	4,1861
11:35:00	14,5	0,8	130,7	1342,0874	147,3632	297,2648	280,7864	9,7857	0,0045	63,7866	4,8917	73,57	68,68	30,1875	3,3074
11:40:00	14,4	0,0	177,5	1343,6851	223,8831	296,6450	404,7791	11,1329	0,0037	35,7249	5,5510	46,86	41,31	21,3921	6,0990
11:45:00	14,3	1,1	192,0	1344,6440	251,5921	296,0262	447,1422	7,3520	0,0057	10,6646	3,6736	18,02	14,34	22,7056	2,1334
11:50:00	14,3	1,8	177,3	1344,9637	223,5150	296,0262	404,1980	13,2136	0,0050	21,9210	6,6027	35,13	28,53	23,9090	8,5655
11:55:00	14,3	0,2	178,8	1344,6440	226,2846	296,0262	408,4882	11,7386	0,0056	10,9714	5,8664	22,71	16,84	24,5414	2,1548
12:00:00	14,2	0,5	165,4	1343,6851	202,2848	295,4085	370,9264	11,5081	0,0038	65,4578	5,7519	76,97	71,21	26,9207	3,3213
12:05:00	14,4	2,2	135,3	1342,0874	154,0887	296,6450	292,1891	13,3968	0,0056	60,9114	6,6957	74,31	67,61	27,5691	3,4102
12:10:00	14,4	0,8	131,3	1339,8517	148,2314	296,6450	282,2787	9,9820	0,0045	14,6170	4,9898	24,60	19,61	28,5811	1,8882
12:15:00	14,3	1,5	122,4	1336,9790	135,6206	296,0262	260,6294	10,9232	0,0045	9,7328	5,4603	20,66	15,20	29,1742	2,0561
12:20:00	13,6	1,2	152,4	1333,4707	180,5410	291,7249	336,0725	11,3676	0,0076	11,9548	5,6826	23,32	17,64	30,6023	2,1151
12:25:00	13,6	0,8	100,8	1329,3285	107,2363	291,7249	210,2756	6,8891	0,0046	55,3209	3,4441	62,21	58,77	31,5739	3,8439
12:30:00	13,5	2,5	57,9	1324,5544	58,2344	291,1147	117,4439	7,6847	0,0057	6,8487	3,8385	14,53	10,69	15,7277	4,1198
12:35:00	13,4	2,2	52,6	1319,1506	52,6738	290,5056	106,4667	9,4596	0,0059	12,4385	4,7206	21,90	17,18	17,6052	2,3183
12:40:00	13,3	1,8	44,0	1313,1197	43,8458	289,8975	88,8732	8,3049	0,0047	6,8268	4,1495	15,13	10,98	18,6574	2,8724
12:45:00	13,2	2,8	42,8	1306,4646	42,6448	289,2905	86,4784	8,9952	0,0059	26,9432	4,4958	35,94	31,44	21,4756	6,9760
12:50:00	13,0	0,5	53,0	1299,1884	53,1523	288,0797	107,4680	5,1187	0,0061	12,1126	2,5589	17,23	14,67	22,1753	2,6137
12:55:00	12,8	1,2	70,6	1291,2946	71,9164	286,8730	144,2353	7,1544	0,0048	59,3128	3,5764	66,47	62,89	23,9512	3,5813
13:00:00	12,6	1,1	76,6	1282,7869	78,5539	285,6706	157,0164	6,2897	0,0045	10,6829	3,1444	16,97	13,83	25,2652	2,5846
13:05:00	12,4	1,5	110,1	1273,6695	119,0932	284,4724	231,9215	8,5050	0,0046	12,2783	4,2517	20,78	16,53	26,2580	2,2658
13:10:00	12,3	0,8	223,4	1263,9466	318,9055	283,8749	547,0152	16,2606	0,0045	6,0127	8,1277	22,27	14,15	27,8352	2,5866
13:15:00	12,4	1,1	278,4	1253,6228	463,0982	284,4724	746,7216	21,2445	0,0061	14,1390	10,6180	35,38	24,77	29,0367	2,3048

Datos obtenidos el 30 de octubre del 2017. (Continuación)

HORA	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T <sub>i, col</sub> [°C]	T <sub>o, col</sub> [°C]	T <sub>i, comp</sub> [°C]	T <sub>o, comp</sub> [°C]	T <sub>i, cond</sub> [°C]	T <sub>o, cond</sub> [°C]	P <sub>i, col</sub> [°C]	P <sub>o, col</sub> [°C]	P <sub>i, comp</sub> [°C]	P <sub>o, comp</sub> [°C]	P <sub>i, cond</sub> [°C]	P <sub>o, cond</sub> [°C]
10:00:00	15	15,2	16	16,1	20,8	24,30	24,30	27,0	27,0	23,2	413,6854	372,3169	372,3169	758,4233	758,4233	517,1068
10:05:00	5,4	5,9	6,2	7,7	12,2	18,80	18,80	23,6	23,6	21,8	258,5534	217,1848	217,1848	655,0019	655,0019	620,5281
10:10:00	4,2	4,5	5,2	6,5	9,4	18,50	18,50	23,8	23,8	21,2	241,3165	199,9480	199,9480	792,8971	792,8971	758,4233
10:15:00	4,8	5	5	5,3	9,9	18,20	18,20	25,9	25,9	21,9	241,3165	210,2901	210,2901	999,7398	999,7398	930,7922
10:20:00	4,7	4,9	6,5	7,1	9,8	18,20	18,20	27,8	27,8	22,6	244,7639	206,8427	206,8427	1206,5825	1206,5825	1137,6349
10:25:00	4,7	4,9	6,5	7,1	9,8	18,60	18,60	29,5	29,5	22,6	244,7639	210,2901	210,2901	1378,9514	1378,9514	1137,6349
10:30:00	11,4	13,2	13,3	13,5	16,8	21,40	21,40	26,8	26,8	23,4	372,3169	341,2905	341,2905	758,4233	758,4233	723,9495
10:35:00	11,3	11,5	12,3	12,5	15	20,60	20,60	25,7	25,7	23,4	320,6062	293,0272	293,0272	965,2660	965,2660	930,7922
10:40:00	11,4	13,1	13,2	13,3	14,4	18,70	18,70	26,0	26,0	23,4	372,3169	337,8431	337,8431	792,8971	792,8971	723,9495
10:45:00	10,1	11,7	12,2	13,6	13,4	18,70	18,70	25,6	25,6	22,8	334,3957	303,3693	303,3693	999,7398	999,7398	930,7922
10:50:00	7,8	8,2	8,3	8,5	14,4	19,30	19,30	24,4	24,4	22,7	310,2641	265,4481	265,4481	723,9495	723,9495	689,4757
10:55:00	3,9	4	6,2	8,3	9,1	17,00	17,00	25,6	25,6	20,7	234,4217	196,5006	196,5006	1137,6349	1137,6349	1068,6873
11:00:00	4,3	4,8	7,3	8,2	8,7	16,60	16,60	27,6	27,6	20,6	244,7639	206,8427	206,8427	1344,4776	1344,4776	1241,0563
11:05:00	9,4	11	12,3	13,3	10,4	16,30	16,30	25,9	25,9	20,3	327,5010	303,3693	303,3693	999,7398	999,7398	930,7922
11:10:00	9,4	10,6	10,8	11,1	10,7	15,80	15,80	25,3	25,3	20,6	337,8431	303,3693	303,3693	758,4233	758,4233	689,4757
11:15:00	8,1	8,2	8,3	8,9	11,3	17,10	17,10	23,3	23,3	20	299,9219	265,4481	265,4481	999,7398	999,7398	861,8446
11:20:00	7,9	8,5	8,8	10,9	10,4	16,10	16,10	23,7	23,7	19,7	293,0272	244,7639	244,7639	689,4757	689,4757	655,0019
11:25:00	8,5	9,6	10,8	10,9	10,4	16,00	16,00	22,7	22,7	19,5	337,8431	310,2641	310,2641	861,8446	861,8446	827,3708
11:30:00	8	8,8	9,1	9,2	9,6	16,40	16,40	22,0	22,0	19	324,0536	299,9219	299,9219	655,0019	655,0019	586,0543
11:35:00	7,8	8,2	8,3	8,8	9,1	15,90	15,90	21,5	21,5	18,6	310,2641	279,2377	279,2377	689,4757	689,4757	620,5281
11:40:00	8,3	6,3	7,2	7,7	10,1	15,90	15,90	20,9	20,9	18,9	265,4481	227,5270	227,5270	792,8971	792,8971	758,4233
11:45:00	9,7	9,9	10,5	12,3	18,7	13,90	13,90	22,4	22,4	17,6	334,3957	303,3693	303,3693	551,5806	551,5806	517,1068
11:50:00	8,5	8,8	11,1	9,2	10,2	15,70	15,70	19,8	19,8	17,5	286,1324	248,2113	248,2113	586,0543	586,0543	551,5806
11:55:00	9,1	9,9	10,4	11,1	9,4	15,90	15,90	20,3	20,3	17,6	330,9483	303,3693	303,3693	551,5806	551,5806	517,1068
12:00:00	8,2	8,5	10,1	11,2	9,8	14,80	14,80	20,3	20,3	17,8	262,0008	227,5270	227,5270	689,4757	689,4757	655,0019
12:05:00	8,8	9,4	9,8	10,6	9	15,20	15,20	20,3	20,3	17,7	327,5010	303,3693	303,3693	655,0019	655,0019	620,5281
12:10:00	7,8	8,1	8,2	8,9	9,2	15,40	15,40	20,1	20,1	17,4	299,9219	275,7903	275,7903	586,0543	586,0543	551,5806
12:15:00	7,4	7,5	8,1	9,5	8,9	15,30	15,30	20,2	20,2	17,3	306,8167	275,7903	275,7903	551,5806	551,5806	517,1068
12:20:00	8,8	9,8	10,2	11,4	8,6	15,20	15,20	20,3	20,3	17,1	317,1588	293,0272	293,0272	551,5806	551,5806	517,1068
12:25:00	7,5	7,9	8	8,4	9,3	15,20	15,20	20,0	20,0	17	293,0272	272,3429	272,3429	655,0019	655,0019	586,0543
12:30:00	8,8	9,4	9,8	9,9	9,6	13,90	13,90	18,2	18,2	16,5	334,3957	299,9219	299,9219	413,6854	413,6854	379,2116
12:35:00	8	8,8	9	10,9	8,3	13,20	13,20	17,1	17,1	15,5	324,0536	289,5798	289,5798	517,1068	517,1068	482,6330
12:40:00	6,4	6,5	7,3	8,5	7,6	13,50	13,50	16,8	16,8	15	296,4746	265,4481	265,4481	448,1592	448,1592	413,6854
12:45:00	7,2	8,1	8,3	9	8,2	13,70	13,70	16,8	16,8	15	317,1588	289,5798	289,5798	586,0543	586,0543	517,1068
12:50:00	7,3	7,7	7,9	9,3	7,6	13,70	13,70	16,9	16,9	14,9	310,2641	282,6850	282,6850	482,6330	482,6330	448,1592
12:55:00	6,9	7,1	7,2	7,6	7,7	13,60	13,60	16,7	16,7	14,8	286,1324	258,5534	258,5534	827,3708	827,3708	792,8971
13:00:00	8,6	11,3	10,3	11,7	8,3	13,70	13,70	16,6	16,6	14,6	310,2641	279,2377	279,2377	482,6330	482,6330	448,1592
13:05:00	8,1	8,3	8,6	8,8	8,7	13,20	13,20	16,8	16,8	14,9	303,3693	275,7903	275,7903	517,1068	517,1068	482,6330
13:10:00	7,9	8,2	8,3	8,5	7,9	13,40	13,40	17,4	17,4	15,1	306,8167	279,2377	279,2377	482,6330	482,6330	448,1592
13:15:00	8,3	9,4	10	11,5	8,1	14,20	14,20	17,9	17,9	15,6	310,2641	282,6850	282,6850	517,1068	517,1068	482,6330

Anexo 12. Datos obtenidos el 02 de noviembre del 2017.

HORA	T <sub>a</sub> [°C]	S <sub>w</sub> [°C]	I [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>x</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>d</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>atm</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sup>r</sup> [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>est</sub> [W]	m <sub>r</sub> [kg/s]	W <sub>comp</sub> [W]	Q <sub>r</sub> [W]	Q <sub>cond</sub> [W]	Q <sub>w</sub> [W]	T <sub>w</sub> [°C]	COP
10:00:00	22,2	0,0	662,1	1192,0843	115,8675	348,3490	805,8770	23,0450	0,0034	14,6100	11,5022	37,65	26,15	18,7749	3,6896
10:05:00	17,4	1,0	376,5	1205,3203	65,8875	315,7156	457,9517	13,6230	0,0028	5,1755	6,7961	18,80	12,00	20,1720	4,8511
10:10:00	18,2	0,2	309,9	1217,9835	54,2325	320,9701	376,7073	11,9811	0,0028	8,6429	5,9265	20,62	14,70	21,6107	4,3081
10:15:00	18,8	0,1	298,9	1230,0677	526,3294	324,9587	831,1170	24,4487	0,0023	9,5395	12,1824	33,99	21,81	22,8126	4,1090
10:20:00	19,4	0,5	317,2	1241,5672	55,5100	328,9884	385,1439	14,4945	0,0028	8,5876	7,2370	23,08	15,85	23,7271	4,3279
10:25:00	19,7	0,0	325,8	1252,4765	57,0150	331,0188	395,3841	13,4213	0,0027	15,0026	6,7041	28,42	21,72	24,8113	3,6128
10:30:00	19,7	0,2	303,5	1262,7905	541,1445	331,0188	849,9724	26,1449	0,0028	7,7718	13,0514	33,92	20,87	25,7991	3,9267
10:35:00	19,7	0,1	315,1	1272,5042	55,1425	331,0188	382,0489	12,9624	0,0027	7,6326	6,4773	20,59	14,12	26,5619	3,9920
10:40:00	19,6	0,2	331,8	1281,6131	58,0650	330,3409	402,1334	13,9282	0,0035	15,2311	6,9602	29,16	22,20	27,9546	3,6666
10:45:00	19,6	0,1	318,8	1290,1127	55,7900	330,3409	386,2329	12,9758	0,0027	21,5164	6,4846	34,49	28,01	28,4212	3,3502
10:50:00	19,6	0,1	353,3	1297,9990	61,8275	330,3409	427,8834	12,8760	0,0033	55,6337	6,4328	68,51	62,08	19,4415	3,6927
10:55:00	19,6	0,0	408,2	1305,2684	71,4350	330,3409	494,2183	14,7252	0,0028	6,9954	7,3302	21,72	14,39	20,4719	4,8051
11:00:00	19,6	1,1	406,3	1311,9173	71,1025	330,3409	491,7785	16,7733	0,0022	10,2136	8,3342	26,99	18,65	21,8674	4,2515
11:05:00	19,6	1,2	454,7	1317,9425	79,5725	330,3409	550,2211	17,1833	0,0033	10,8781	8,5727	28,06	19,49	23,0328	4,7251
11:10:00	19,7	0,0	445,3	1323,3412	77,9275	331,0188	538,7246	13,9389	0,0030	4,5257	6,9513	18,46	11,51	23,7375	6,6394
11:15:00	20,0	0,5	446,8	1328,1108	78,1900	333,0597	540,4321	13,2868	0,0032	34,6379	6,6342	47,92	41,29	25,1932	5,9030
11:20:00	20,3	0,1	602,6	1332,2491	105,4550	335,1111	728,7573	18,3915	0,0027	5,6594	9,1799	24,05	14,87	25,7776	5,3127
11:25:00	20,7	0,0	671,6	1335,7541	117,5300	337,8626	812,0859	18,8660	0,0040	13,2552	9,4224	32,12	22,70	27,7169	6,1137
11:30:00	21,3	0,8	623,7	1338,6240	109,1475	342,0251	754,0777	14,4760	0,0036	29,9464	7,2312	44,42	37,19	28,3554	6,4276
11:35:00	21,8	0,7	647,7	1340,8576	113,3475	345,5264	783,0234	15,2872	0,0029	21,3303	7,6361	36,62	28,98	28,7769	3,8920
11:40:00	22,5	0,1	552,3	1342,4538	96,6525	350,4784	667,6483	15,1609	0,0040	5,1794	7,5737	20,34	12,77	22,9830	7,3256
11:45:00	22,9	0,0	551,3	1343,4119	96,4775	353,3346	666,4136	16,4330	0,0038	19,5783	8,1495	36,01	27,86	25,9994	4,7844
11:50:00	23,3	0,5	675,7	1343,7313	118,2475	356,2102	816,7782	20,5669	0,0038	16,7730	10,2439	37,34	27,10	27,1884	5,4047
11:55:00	23,6	0,2	499,8	1343,4119	87,4650	358,3796	604,1602	15,0646	0,0040	26,0028	7,5168	41,07	33,55	28,2809	4,3465
12:00:00	23,7	0,0	694,8	1342,4538	121,5900	359,1052	839,9096	21,3386	0,0039	35,4038	10,6504	56,74	46,09	29,1607	3,8190
12:05:00	23,6	0,1	525,4	1340,8576	91,9450	358,3796	635,1714	15,6138	0,0037	33,0057	7,7979	48,62	40,82	29,3851	4,2161
12:10:00	23,4	0,2	236,8	1338,6240	351,0631	356,9321	591,9864	14,6351	0,0036	18,4420	7,3113	33,08	25,77	29,8693	5,2606
12:15:00	23,4	0,3	753,7	1335,7541	131,8975	356,9321	911,3597	21,1773	0,0050	26,5208	10,5713	47,70	37,13	30,4257	5,9800
12:20:00	23,3	0,0	579,4	1332,2491	101,3950	356,2102	700,7003	16,1194	0,0053	35,6354	8,0519	51,75	43,70	31,1011	5,3690
12:25:00	23,2	1,1	769,7	1328,1108	134,6975	355,4894	930,9996	17,8266	0,0050	24,3858	8,9023	42,21	33,31	31,3820	6,0153
12:30:00	23,2	1,1	704,6	1323,3412	123,3050	355,4894	852,4261	19,1612	0,0029	3,7215	9,5760	22,88	13,31	17,9589	6,4079
12:35:00	23,3	0,2	676,0	1317,9425	118,3000	356,2102	818,0106	21,0343	0,0038	11,4095	10,5067	32,44	21,94	20,2620	5,9033
12:40:00	23,4	0,0	439,5	1311,9173	76,9125	356,9321	531,9632	14,0192	0,0058	11,5528	7,0049	25,57	18,57	21,8661	3,7019
12:45:00	23,3	0,1	401,7	1305,2684	70,2975	356,2102	486,3486	12,2992	0,0036	14,8656	6,1406	27,16	21,02	22,5511	6,4991
12:50:00	23,1	0,2	343,9	1297,9990	60,1825	354,7700	416,4990	10,6197	0,0042	11,5222	5,2738	22,14	16,87	24,5015	6,4119
12:55:00	23,0	0,5	344,7	1290,1127	60,3225	354,0517	417,6113	10,5954	0,0061	16,9831	5,2809	27,58	22,30	25,2663	6,4956
13:00:00	22,7	0,3	331,4	1281,6131	57,9950	351,9041	401,6486	9,9637	0,0043	13,3563	4,9755	23,32	18,34	26,3191	6,1884
13:05:00	22,4	0,0	335,7	1272,5042	58,7475	349,7674	407,0258	9,8273	0,0037	15,7566	4,9092	25,58	20,67	27,0976	5,0653
13:10:00	22,1	0,1	329,9	1262,7905	57,7325	347,6415	400,1697	11,4496	0,0043	2,9514	5,7214	14,40	8,68	28,3829	5,0497
13:15:00	21,7	0,2	275,7	1252,4765	455,5103	344,8238	736,6677	18,8118	0,0042	17,5168	9,3987	36,33	26,93	29,2573	5,1934

Datos obtenidos el 02 de noviembre del 2017. (Continuación)

HORA	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T <sub>i, col</sub> [°C]	T <sub>o, col</sub> [°C]	T <sub>i, comp</sub> [°C]	T <sub>o, comp</sub> [°C]	T <sub>i, cond</sub> [°C]	T <sub>o, cond</sub> [°C]	P <sub>i, col</sub> [°C]	P <sub>o, col</sub> [°C]	P <sub>i, comp</sub> [°C]	P <sub>o, comp</sub> [°C]	P <sub>i, cond</sub> [°C]	P <sub>o, cond</sub> [°C]
10:00:00	12,9	13,2	15,6	16,7	17,9	20,9	20,9	22	22	20,7	372,31688	324,05358	324,05358	551,58056	551,58056	482,63299
10:05:00	9,7	11,5	11,6	14,3	14	18,2	18,2	21,7	21,7	21	334,39571	299,92193	299,92193	517,10678	517,10678	482,63299
10:10:00	8,5	9,9	10,4	10,9	12,6	18,5	18,5	21,6	21,6	20,7	337,84309	299,92193	299,92193	551,58056	551,58056	517,10678
10:15:00	8,1	9	9,2	10	12,4	18,5	18,5	21,3	21,3	20,5	299,92193	265,44814	265,44814	551,58056	551,58056	517,10678
10:20:00	8,8	10,3	10,5	10,9	12,4	18,7	18,7	21,8	21,8	20,6	330,94834	299,92193	299,92193	551,58056	551,58056	517,10678
10:25:00	10	10,1	11,2	13,2	12,9	18	18	22,2	22,2	20,6	341,29047	310,26407	310,26407	620,52813	620,52813	586,05435
10:30:00	8,7	9,9	10,1	10,3	12,6	18,4	18,4	22,6	22,6	21,1	334,39571	303,36931	303,36931	586,05435	586,05435	551,58056
10:35:00	9,4	10,9	11,2	11,3	13,2	18,7	18,7	22,6	22,6	20,6	344,73785	313,71144	313,71144	586,05435	586,05435	551,58056
10:40:00	9,3	11,2	11,3	11,7	13,3	18,2	18,2	23	23	21,1	348,18523	320,6062	320,6062	620,52813	620,52813	586,05435
10:45:00	9,2	10,7	11	11,4	13,4	18,5	18,5	23,3	23,3	21,6	344,73785	313,71144	313,71144	655,00192	655,00192	620,52813
10:50:00	12,6	13,1	14,5	16,2	15,6	18,8	18,8	22,7	22,7	21,9	368,8695	341,29047	341,29047	137,89514	137,89514	448,15921
10:55:00	10,3	11,8	13,2	13,7	15,1	18,6	18,6	21,5	21,5	20,6	334,39571	296,47455	296,47455	517,10678	517,10678	482,63299
11:00:00	10,1	11,3	12,1	13,4	14,8	19,5	19,5	21,5	21,5	20,5	279,23766	275,79028	275,79028	551,58056	551,58056	517,10678
11:05:00	13,4	13,8	13,9	14,2	16	19,7	19,7	21,6	21,6	20,5	372,31688	337,84309	337,84309	551,58056	551,58056	517,10678
11:10:00	14,1	15,4	15,8	16,8	17,3	21,1	21,1	22,9	22,9	21,9	413,68542	379,21164	379,21164	517,10678	517,10678	482,63299
11:15:00	16,3	16,8	19,9	20,5	18,6	21,8	21,8	23	23	22,1	403,34328	344,73785	344,73785	655,00192	655,00192	586,05435
11:20:00	18,1	21,3	23,9	24,5	19,6	21,3	21,3	23,5	23,5	22,9	441,26445	413,68542	413,68542	586,05435	586,05435	551,58056
11:25:00	20,1	23,2	24,6	28,3	21,9	23,8	23,8	23,9	23,9	23,5	472,29085	441,26445	441,26445	586,05435	586,05435	551,58056
11:30:00	21,9	22,2	24,5	26,2	22,9	25,7	25,7	24,7	24,7	24,3	541,23842	482,63299	482,63299	655,00192	655,00192	620,52813
11:35:00	22	23,3	23,9	25,3	24	25,9	25,9	25,1	25,1	24,9	406,79066	379,21164	379,21164	620,52813	620,52813	586,05435
11:40:00	21,1	22,2	22,9	23	23,1	25,6	25,6	27,1	27,1	26,2	461,94872	430,92231	430,92231	551,58056	551,58056	517,10678
11:45:00	20,7	21,1	21,2	21,4	22,3	24,6	24,6	26	26	26,1	475,73823	465,3961	465,3961	655,00192	655,00192	620,52813
11:50:00	18,8	20,4	22,5	23,7	22,2	24,9	24,9	25,4	25,4	25,8	482,63299	455,05396	455,05396	620,52813	620,52813	551,58056
11:55:00	19,4	20,2	20,4	22,7	22,2	25,4	25,4	26	26	26,3	461,94872	437,81707	437,81707	655,00192	655,00192	586,05435
12:00:00	20,5	20,8	21,6	24,2	22,5	25,3	25,3	25,8	25,8	25,8	492,97513	441,26445	441,26445	689,4757	689,4757	620,52813
12:05:00	21	21,8	21,9	22,8	22,5	25,7	25,7	25,7	25,7	25,8	499,86988	472,29085	472,29085	689,4757	689,4757	655,00192
12:10:00	22,1	24,1	25,9	28,1	22,1	25,3	25,3	26,1	26,1	25,2	520,55415	489,52775	489,52775	655,00192	655,00192	620,52813
12:15:00	24,4	25,1	25,4	27,4	23,9	26,8	26,8	26,9	26,9	27,3	579,15959	551,58056	551,58056	689,4757	689,4757	655,00192
12:20:00	22,7	23,7	23,9	25,2	24,2	26,3	26,3	26,4	26,4	27,3	551,58056	520,55415	520,55415	689,4757	689,4757	655,00192
12:25:00	25,2	27,4	29,5	30,3	25,9	27,1	27,1	27,2	27,2	28,3	568,81745	551,58056	551,58056	689,4757	689,4757	655,00192
12:30:00	21	22,4	23,1	24,9	23,5	25,8	25,8	27,8	27,8	25,9	417,1328	372,31688	372,31688	517,10678	517,10678	448,15921
12:35:00	19,7	20,1	20,9	22,8	22,1	24,3	24,3	24,9	24,9	24,6	468,84348	434,36969	434,36969	586,05435	586,05435	517,10678
12:40:00	19,9	21	21,1	22,8	20,2	25,1	25,1	29,2	29,2	23,4	503,31726	472,29085	472,29085	723,94949	723,94949	655,00192
12:45:00	19,5	20,6	20,8	21,2	20,9	25,4	25,4	24,4	24,4	24	492,97513	451,60658	451,60658	586,05435	586,05435	517,10678
12:50:00	19	20,1	20,3	21,5	21	24,6	24,6	25,1	25,1	24,2	448,15921	410,23804	410,23804	551,58056	551,58056	517,10678
12:55:00	19,3	20	20,3	20,8	21,4	24,2	24,2	24,7	24,7	23,8	482,63299	451,60658	451,60658	586,05435	586,05435	551,58056
13:00:00	19,2	19,6	19,8	21,5	20,9	24,4	24,4	24,7	24,7	24	437,81707	403,34328	403,34328	551,58056	551,58056	517,10678
13:05:00	19,4	20,5	20,6	21,5	21	24,3	24,3	24,7	24,7	24,2	475,73823	441,26445	441,26445	620,52813	620,52813	517,10678
13:10:00	20,3	20,6	21,4	22,5	20,6	20,3	20,3	24,2	24,2	23,8	441,26445	403,34328	403,34328	586,05435	586,05435	551,58056
13:15:00	18,8	19,6	20,8	21	19,8	23,5	23,5	23,6	23,6	23,4	444,71183	406,79066	406,79066	586,05435	586,05435	517,10678

Anexo 13. Datos obtenidos el 06 de noviembre del 2017.

HORA	T <sub>a</sub> [°C]	S <sub>w</sub> [°C]	I [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>x</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>d</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>atm</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sup>r</sup> [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>est</sub> [W]	m <sub>r</sub> [kg/s]	W <sub>comp</sub> [W]	Q <sub>r</sub> [W]	Q <sub>cond</sub> [W]	Q <sub>w</sub> [W]	T <sub>w</sub> [°C]	COP
10:00:00	22,2	0,1	662,1	1194,2416	115,8675	348,3490	803,4319	21,3496	0,0096	29,0185	10,6667	50,37	39,70	17,2691	4,6513
10:05:00	23,4	0,5	693,2	1207,5024	121,3100	356,9321	840,6548	26,2008	0,0060	27,1825	13,0576	53,38	40,33	20,6780	7,8120
10:10:00	24,1	0,0	708,8	1220,1892	124,0400	362,0198	859,0794	25,3966	0,0063	73,1732	12,5192	98,57	86,05	23,8334	2,9511
10:15:00	24,5	0,2	693,6	1232,2960	121,3800	364,9541	840,2049	25,5288	0,0062	84,7243	12,7172	110,25	97,54	26,5980	2,5401
10:20:00	24,8	1,1	692,6	1243,8170	121,2050	367,1678	838,5724	29,5183	0,0083	100,3967	14,7290	129,91	115,19	29,1510	2,1414
10:25:00	25,0	1,0	703,9	1254,7467	123,1825	368,6498	851,8552	29,4015	0,0079	71,6968	14,6822	101,10	86,42	31,5386	2,9992
10:30:00	25,0	0,2	695,4	1265,0800	121,6950	368,6498	841,2023	25,8254	0,0102	100,0081	12,9012	125,83	112,93	34,2187	2,1475
10:35:00	25,1	0,1	688,0	1274,8119	120,4000	369,3926	831,9149	26,7189	0,0064	78,6840	13,3502	105,40	92,05	35,7555	2,7527
10:40:00	25,1	0,0	738,5	1283,9378	129,2375	369,3926	892,6454	26,4742	0,0080	105,1203	13,2284	131,59	118,37	37,8311	2,0362
10:45:00	25,2	0,1	726,7	1292,4533	127,1725	370,1368	878,0807	26,3026	0,0102	136,3385	13,1434	162,64	149,50	39,9285	1,5760
10:50:00	25,3	0,8	783,1	1300,3544	137,0425	370,8821	945,9317	29,0809	0,0094	67,9681	14,5250	97,05	82,52	21,7829	2,6905
10:55:00	25,4	1,1	800,8	1307,6373	140,1400	371,6287	967,0346	31,3563	0,0079	46,5786	15,6505	77,93	62,28	23,2440	3,9190
11:00:00	25,5	0,1	840,5	1314,2986	147,0875	372,3766	1014,7122	30,4041	0,0078	27,9708	15,1192	58,37	43,26	25,7200	7,6960
11:05:00	25,7	0,0	841,9	1320,3351	147,3325	373,8761	1016,1655	29,4444	0,0076	38,6946	14,4036	68,14	53,74	28,7418	5,5444
11:10:00	26,0	1,2	497,5	1325,7439	87,0625	376,1348	600,3535	23,2309	0,0077	95,4944	11,5891	118,73	107,14	31,7797	2,2452
11:15:00	25,9	0,5	436,7	1330,5225	76,4225	375,3806	526,8880	22,7439	0,0064	88,1097	11,3579	110,85	99,50	33,7884	2,4715
11:20:00	25,7	0,1	497,1	1334,6685	86,9925	373,8761	599,6680	21,9825	0,0062	80,8553	10,9816	102,84	91,86	35,4972	2,6829
11:25:00	25,3	0,2	407,9	1338,1800	71,3825	370,8821	491,9982	19,4331	0,0083	96,1898	9,7101	115,62	105,91	37,1121	2,2462
11:30:00	25,0	0,1	568,8	1341,0553	99,5400	368,6498	685,9979	22,8087	0,0081	119,5579	11,3967	142,37	130,97	39,1515	1,7984
11:35:00	24,7	0,0	600,2	1343,2931	105,0350	366,4286	723,8073	22,7021	0,0078	116,5944	11,3441	139,30	127,95	40,5227	1,8401
11:40:00	24,2	0,1	722,1	1344,8923	126,3675	362,7515	870,7601	23,0585	0,0085	70,3772	11,5258	93,44	81,91	17,1784	2,5911
11:45:00	24,1	0,5	725,9	1345,8521	127,0325	362,0198	875,3113	27,7196	0,0079	56,3930	13,8494	84,11	70,26	20,1393	3,8064
11:50:00	24,3	0,2	796,1	1346,1721	139,3175	363,4845	959,9491	27,9049	0,0078	96,1404	13,9361	124,05	110,11	24,5782	2,2390
11:55:00	24,6	0,0	1074,0	1345,8521	187,9500	365,6907	1295,0604	35,6685	0,0075	108,6701	17,7945	144,34	126,54	27,7115	1,9800
12:00:00	24,4	1,1	1019,0	1344,8923	178,3250	364,2186	1228,7835	34,9442	0,0093	27,3836	17,3777	62,33	44,95	29,3369	6,3063
12:05:00	24,2	0,1	565,1	1343,2931	98,8925	362,7515	681,4787	20,3638	0,0076	91,4218	10,1486	111,79	101,64	33,5140	2,3474
12:10:00	23,9	2,8	361,1	1341,0553	63,1925	360,5600	435,5025	29,7055	0,0081	87,5460	14,8294	117,25	102,42	34,3234	2,4696
12:15:00	23,1	2,2	354,1	1338,1800	61,9675	354,7700	427,1061	27,0476	0,0082	89,9476	13,5105	117,00	103,48	35,3889	2,3781
12:20:00	21,9	2,5	305,0	1334,6685	545,2286	346,2303	854,0654	39,1003	0,0111	146,6201	19,5289	185,72	166,19	37,4881	1,4593
12:25:00	20,5	1,8	265,8	1330,5225	426,6889	336,4845	696,4464	29,4905	0,0063	85,6151	14,7356	115,11	100,37	37,9591	2,4873
12:30:00	19,4	0,2	278,3	1325,7439	462,4902	328,9884	744,8118	20,1584	0,0098	64,0239	10,0626	84,18	74,12	22,9853	2,6122
12:35:00	18,4	1,1	370,2	1320,3351	64,7850	322,2951	446,8280	16,4006	0,0087	57,8163	8,1648	74,22	66,05	25,5890	3,6710
12:40:00	17,5	1,2	729,7	1314,2986	127,6975	316,3685	880,9465	22,8229	0,0082	44,2460	11,3842	67,07	55,68	28,2982	4,7811
12:45:00	17,3	2,2	441,5	1307,6373	77,2625	315,0639	533,1491	12,9080	0,0081	79,5700	6,4476	92,48	86,03	30,5276	2,6664
12:50:00	17,2	2,5	445,2	1300,3544	77,9100	314,4132	537,7714	13,7583	0,0082	85,1370	6,8749	98,90	92,02	32,6991	2,4965
12:55:00	17,3	0,5	632,0	1292,4533	110,6000	315,0639	763,6535	18,3801	0,0080	95,2643	9,1842	113,64	104,46	34,8477	2,2172
13:00:00	17,4	1,8	867,6	1283,9378	151,8300	315,7156	1048,6921	27,8289	0,0079	104,9747	13,9005	132,80	118,90	36,9202	2,0262
13:05:00	17,8	2,2	792,3	1274,8119	138,6525	318,3338	958,0323	20,4954	0,0076	100,0022	10,2410	120,50	110,26	38,0536	2,1034
13:10:00	17,9	2,5	845,1	1265,0800	147,8925	318,9912	1022,2895	21,0425	0,0078	118,8012	10,5154	139,84	129,33	40,3358	1,7806
13:15:00	18,2	1,8	819,6	1254,7467	143,4300	320,9701	991,8746	20,4305	0,0097	127,7881	10,2098	148,22	138,01	41,9188	1,5980

Datos obtenidos el 06 de noviembre del 2017. (Continuación)

HORA	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T <sub>i, col</sub> [°C]	T <sub>o, col</sub> [°C]	T <sub>i, comp</sub> [°C]	T <sub>o, comp</sub> [°C]	T <sub>i, cond</sub> [°C]	T <sub>o, cond</sub> [°C]	P <sub>i, col</sub> [°C]	P <sub>o, col</sub> [°C]	P <sub>i, comp</sub> [°C]	P <sub>o, comp</sub> [°C]	P <sub>i, cond</sub> [°C]	P <sub>o, cond</sub> [°C]
10:00:00	12,5	13,3	13,9	14,4	20,4	22,3	22,3	23,5	23,5	22,6	382,65901	334,39571	334,39571	517,10678	517,10678	448,15921
10:05:00	10,5	11,3	13,7	12,3	18,6	21,1	21,1	22,6	22,6	21,2	334,39571	296,47455	296,47455	551,58056	551,58056	482,63299
10:10:00	10	10,8	12,1	13,3	18	22,5	22,5	23,7	23,7	22,3	317,15882	279,23766	279,23766	655,00192	655,00192	517,10678
10:15:00	10,6	11,3	11,9	13,1	18,2	23,2	23,2	24,4	24,4	22,9	327,50096	286,13242	286,13242	689,4757	689,4757	620,52813
10:20:00	9,9	11,2	11,6	13,2	17,5	23,4	23,4	25,3	25,3	23,2	330,94834	286,13242	286,13242	723,94949	723,94949	689,4757
10:25:00	11,4	12,1	14,8	12,8	18	23,4	23,4	26,3	26,3	23,8	327,50096	303,36931	303,36931	792,89706	792,89706	758,42327
10:30:00	11,3	12,5	14,3	12,3	18,3	23,6	23,6	27,3	27,3	24,9	330,94834	306,81669	306,81669	861,84463	861,84463	827,37084
10:35:00	9,2	10,6	10,9	13,8	16,4	22,6	22,6	27,7	27,7	24,4	313,71144	272,3429	272,3429	965,26598	965,26598	896,31841
10:40:00	10,9	12,3	13	15,5	18,2	23,9	23,9	29,3	29,3	25,9	341,29047	296,47455	296,47455	1034,2136	1034,2136	965,26598
10:45:00	10,9	12,5	12,6	12,3	18,1	24,5	24,5	30,3	30,3	26,9	337,84309	303,36931	303,36931	1068,6873	1068,6873	999,73977
10:50:00	14,1	14,1	14,5	16,3	19,9	24,7	24,7	27,5	27,5	26	368,8695	334,39571	334,39571	758,42327	758,42327	723,94949
10:55:00	11,4	12,8	13,2	13,4	19,9	23,9	23,9	27	27	26	368,8695	303,36931	303,36931	689,4757	689,4757	723,94949
11:00:00	11,4	12,5	14,2	14,5	17,6	24,6	24,6	27,8	27,8	24,9	334,39571	306,81669	306,81669	896,31841	896,31841	827,37084
11:05:00	11,8	13,1	13,5	13,6	18,3	25,7	25,7	29,3	29,3	26,3	348,18523	313,71144	313,71144	827,37084	827,37084	758,42327
11:10:00	10,6	11	11,1	12,3	18,3	25,4	25,4	30,1	30,1	26,3	348,18523	306,81669	306,81669	999,73977	999,73977	758,42327
11:15:00	9,4	9,8	10,2	12,6	13,5	23,9	23,9	30	30	26,9	313,71144	272,3429	272,3429	1068,6873	1068,6873	999,73977
11:20:00	9,6	10,1	10,5	12,5	13,7	23,6	23,6	30,4	30,4	27,1	317,15882	279,23766	279,23766	1068,6873	1068,6873	1034,2136
11:25:00	9,8	10,3	10,2	10,5	13,4	23,7	23,7	31,5	31,5	27,5	324,05358	286,13242	286,13242	1068,6873	1068,6873	1034,2136
11:30:00	10,9	11,9	12,3	14,2	14,9	24	24	32,2	32,2	28,2	334,39571	293,02717	293,02717	1206,5825	1206,5825	1103,1611
11:35:00	10,7	12,1	12,4	13,5	15,1	24,6	24,6	33,2	33,2	28,6	341,29047	303,36931	303,36931	1241,0563	1241,0563	1172,1087
11:40:00	17,3	17,3	18,4	19,2	20,1	26,8	26,8	36,7	36,7	30,3	441,26445	375,76426	375,76426	723,94949	723,94949	655,00192
11:45:00	10,8	12,3	12,9	13,5	16	24,2	24,2	29,6	29,6	25,7	337,84309	299,92193	299,92193	827,37084	827,37084	792,89706
11:50:00	11,6	12,6	14,1	14,7	17,1	25,4	25,4	30,2	30,2	26,5	341,29047	303,36931	303,36931	999,73977	999,73977	930,7922
11:55:00	12,7	13,8	15,9	16,1	18	26,4	26,4	31,5	31,5	28,1	348,18523	313,71144	313,71144	1103,1611	1103,1611	1034,2136
12:00:00	13,2	15,1	15,2	15,5	19,1	26,3	26,3	37,8	37,8	22,7	372,31688	334,39571	334,39571	965,26598	965,26598	896,31841
12:05:00	11,7	11,9	12,4	13,6	16,4	25,7	25,7	32,3	32,3	29,5	348,18523	310,26407	310,26407	1068,6873	1068,6873	1034,2136
12:10:00	10,5	10,9	11,1	11,7	13,4	23,1	23,1	30,8	30,8	26,9	317,15882	293,02717	293,02717	1034,2136	1034,2136	965,26598
12:15:00	9,8	10,6	10,5	10,8	12,7	21,8	21,8	30,6	30,6	25,8	327,50096	289,57979	289,57979	1068,6873	1068,6873	1034,2136
12:20:00	9,1	10,2	10,7	13	11,9	20,7	20,7	30,5	30,5	25,1	320,6062	279,23766	279,23766	1172,1087	1172,1087	1103,1611
12:25:00	9,3	9,4	9,7	10,9	11,8	19,6	19,6	29,4	29,4	24,4	320,6062	279,23766	279,23766	1172,1087	1172,1087	1137,6349
12:30:00	13,1	14	14,2	14,5	16,4	20,1	20,1	25,2	25,2	24,5	372,3169	327,501	327,501	792,8971	792,8971	723,9495
12:35:00	9,4	10,3	10,5	10,8	12,2	18,8	18,8	25,9	25,9	22	320,6062	279,2377	279,2377	827,3708	827,3708	792,8971
12:40:00	10,9	12,2	12,9	15,3	14,5	20,2	20,2	27	27	23,7	334,3957	296,4746	296,4746	792,8971	792,8971	723,9495
12:45:00	10,5	11,2	11,8	12,8	14	20,9	20,9	28,1	28,1	25	334,3957	296,4746	296,4746	965,266	965,266	896,3184
12:50:00	10,3	11,1	11,5	12,6	13,4	20,8	20,8	28,5	28,5	24,7	330,9483	293,0272	293,0272	999,7398	999,7398	930,7922
12:55:00	11,1	12,7	13,3	15,5	15,4	20,8	20,8	28,8	28,8	25,4	341,2905	299,9219	299,9219	1068,6873	1068,6873	999,7398
13:00:00	11,8	13,6	14,5	16,3	12	22,1	22,1	30,2	30,2	28,3	337,8431	303,3693	303,3693	1137,6349	1137,6349	1068,6873
13:05:00	11,9	13,8	14,1	16,9	16,6	21,9	21,9	30,9	30,9	29	355,08	313,7114	313,7114	1172,1087	1172,1087	1068,6873
13:10:00	12,1	13,5	14,9	16,1	17	22,2	22,2	31,1	31,1	30	348,1852	306,8167	306,8167	1241,0563	1241,0563	1172,1087
13:15:00	12,5	13,4	14	16,2	17,4	23,1	23,1	32,5	32,5	31,5	361,9747	320,6062	320,6062	1206,5825	1206,5825	1137,6349

Anexo 14. Datos obtenidos el 09 de noviembre del 2017.

HORA	T <sub>a</sub> [°C]	S <sub>w</sub> [°C]	I [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>k</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>d</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sub>atm</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	I <sup>r</sup> [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>est</sub> [W]	m <sub>r</sub> [kg/s]	W <sub>comp</sub> [W]	Q <sub>r</sub> [W]	Q <sub>cond</sub> [W]	Q <sub>w</sub> [W]	T <sub>w</sub> [°C]	COP
10:00:00	21,2	1,1	509,3	1182,8263	89,1275	341,3284	627,6999	19,4651	0,0045	16,3437	9,7204	35,81	26,09	18,9739	2,5952
10:05:00	22,0	0,0	508,4	1195,9566	88,9700	346,9353	626,0301	20,4267	0,0063	28,1000	10,1614	48,53	38,37	21,9499	6,7995
10:10:00	22,4	1,2	539,8	1208,5185	94,4650	349,7674	664,1379	30,5683	0,0034	48,2795	15,1741	78,85	63,67	25,4127	4,8346
10:15:00	23,0	0,1	527,1	1220,5062	92,2425	354,0517	648,0037	23,3629	0,0047	60,3060	11,6559	83,67	72,01	28,3322	3,8168
10:20:00	23,7	1,5	514,5	1231,9138	90,0375	359,1052	632,0499	32,3856	0,0033	66,6884	16,1591	99,07	82,91	31,3885	3,4877
10:25:00	23,8	1,1	506,5	1242,7359	88,6375	359,8320	621,7968	29,3051	0,0040	50,0894	14,6253	79,39	64,77	33,1284	4,5598
10:30:00	23,8	0,0	524,7	1252,9675	91,8225	359,8320	643,7302	22,5399	0,0039	50,6158	11,2586	73,16	61,90	34,8872	4,4605
10:35:00	23,8	0,1	577,5	1262,6036	101,0625	359,8320	708,0902	24,0977	0,0039	92,1188	12,0370	116,22	104,18	37,0946	2,4598
10:40:00	23,9	0,0	573,5	1271,6397	100,3625	360,5600	702,8023	22,7912	0,0043	86,3917	11,3861	109,18	97,80	39,0214	2,5182
10:45:00	24,0	0,2	591,0	1280,0714	103,4250	361,2893	723,8843	23,8117	0,0043	80,0318	11,8962	103,84	91,95	40,4543	2,7134
10:50:00	24,2	0,0	642,5	1287,8947	112,4375	362,7515	786,6017	20,6785	0,0063	57,8442	10,3348	78,52	68,19	21,9774	3,6783
10:55:00	24,5	0,1	666,4	1295,1059	116,6200	364,9541	815,5198	26,2277	0,0036	31,4168	13,0959	57,64	44,55	26,1385	6,9653
11:00:00	24,9	1,1	707,1	1301,7017	123,7425	367,9082	864,9986	27,6346	0,0050	101,7489	13,7808	129,38	115,60	30,0570	2,2273
11:05:00	25,3	0,0	737,9	1307,6788	129,1325	370,8821	902,3686	27,1725	0,0034	58,9402	13,5249	86,11	72,59	31,9404	3,7019
11:10:00	25,7	0,1	738,0	1313,0343	129,1500	373,8761	902,2174	27,8649	0,0033	47,8301	13,5911	75,70	62,10	34,0902	4,5584
11:15:00	26,1	0,5	737,5	1317,7658	129,0625	376,8902	901,3666	29,4924	0,0048	87,3069	14,5846	116,80	102,21	36,7651	2,5712
11:20:00	26,5	0,1	729,6	1321,8710	127,6800	379,9245	891,5070	28,0767	0,0034	34,0444	14,0141	62,12	48,11	37,3895	6,4409
11:25:00	26,6	1,1	719,7	1325,3480	125,9475	380,6863	879,2404	31,9143	0,0039	53,0362	15,9314	84,95	69,02	37,9914	4,3422
11:30:00	26,6	1,5	701,5	1328,1950	122,7625	380,6863	856,8712	33,5422	0,0031	53,1875	16,7491	86,73	69,98	38,7025	4,4299
11:30:00	26,5	1,2	701,1	1328,1950	122,6925	379,9245	856,3826	30,8823	0,0039	54,1626	15,4231	85,04	69,62	39,3983	4,2884
11:40:00	26,2	0,0	693,4	1331,9942	121,3450	377,6469	846,8003	23,6121	0,0062	40,1532	11,7997	63,77	51,97	19,1448	5,2904
11:45:00	26,0	0,1	747,2	1332,9446	130,7600	376,1348	912,4549	29,1534	0,0050	50,3596	14,5574	79,51	64,96	24,1310	4,4283
11:50:00	26,1	0,0	772,7	1333,2615	135,2225	376,8902	943,5782	27,6176	0,0040	50,1488	13,7901	77,77	63,98	27,4170	3,1788
11:55:00	26,2	0,2	770,3	1332,9446	134,8025	377,6469	940,6638	29,6332	0,0048	106,2223	14,7910	135,86	121,06	30,6353	2,1129
12:00:00	26,5	0,1	779,7	1331,9942	136,4475	379,9245	952,1923	29,5375	0,0035	84,3311	14,7252	113,87	99,14	32,4211	2,6935
12:05:00	26,7	1,1	755,4	1330,4108	132,1950	381,4493	922,5966	33,0628	0,0034	64,5785	14,3876	97,64	83,25	34,5933	3,4853
12:10:00	26,9	0,0	782,1	1328,1950	136,8675	382,9792	955,3228	29,1686	0,0047	87,2232	14,5453	116,39	101,85	36,5598	2,5807
12:15:00	26,8	0,1	785,4	1325,3480	137,4450	382,2136	959,5046	29,4463	0,0044	53,3722	14,7002	82,82	68,12	37,3811	4,1653
12:20:00	26,8	0,1	779,3	1321,8710	136,3775	382,2136	952,2361	29,2540	0,0044	51,2844	14,6099	80,54	65,93	38,0560	4,3050
12:25:00	26,9	0,0	822,7	1317,7658	143,9725	382,9792	1005,4974	29,8821	0,0048	52,0689	14,9231	81,95	67,03	38,5686	4,2981
12:30:00	26,9	0,0	820,3	1313,0343	143,5525	382,9792	1002,8306	30,2939	0,0043	56,2228	15,1379	86,52	71,38	20,8526	3,9212
12:35:00	27,0	1,1	741,4	1307,6788	129,7450	383,7461	906,6487	32,3688	0,0049	56,6761	16,1703	89,04	72,87	24,4705	3,9527
12:40:00	27,1	0,1	715,3	1301,7017	125,1775	384,5142	875,0297	27,1197	0,0040	50,2882	13,5422	77,41	63,87	27,3154	4,5718
12:45:00	27,0	1,1	619,2	1295,1059	108,3600	383,7461	757,7579	29,1689	0,0045	46,5319	14,5575	75,70	61,14	30,1303	3,5024
12:50:00	27,2	2,6	584,4	1287,8947	102,2700	385,2836	715,4708	38,8611	0,0054	49,3296	19,4068	88,19	68,78	32,9216	4,3573
12:55:00	26,7	1,2	597,7	1280,0714	104,5975	381,4493	732,0907	31,0804	0,0046	70,9597	15,4132	102,04	86,63	34,5347	3,1401
13:00:00	25,8	1,5	540,2	1271,6397	94,5350	374,6278	661,9944	28,0445	0,0044	78,9290	13,9634	106,97	93,01	36,1110	2,8254
13:05:00	25,1	0,0	451,5	1262,6036	79,0125	369,3926	553,5978	17,0221	0,0044	62,8252	8,5009	79,85	71,35	37,7818	3,5107
13:10:00	23,9	0,5	712,6	1252,9675	124,7050	360,5600	874,2560	25,8460	0,0044	29,4800	12,9042	55,33	42,42	38,7054	5,7495
13:15:00	23,2	1,8	702,6	1242,7359	122,9550	355,4894	862,5359	25,3027	0,0052	42,1212	12,6340	67,42	54,79	39,2236	3,9159

Datos obtenidos el 09 de noviembre del 2017. (Continuación)

HORA	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T <sub>i, col</sub> [°C]	T <sub>o, col</sub> [°C]	T <sub>i, comp</sub> [°C]	T <sub>o, comp</sub> [°C]	T <sub>i, cond</sub> [°C]	T <sub>o, cond</sub> [°C]	P <sub>i, col</sub> [°C]	P <sub>o, col</sub> [°C]	P <sub>i, comp</sub> [°C]	P <sub>o, comp</sub> [°C]	P <sub>i, cond</sub> [°C]	P <sub>o, cond</sub> [°C]
10:00:00	9,6	9,8	10,3	10,8	16,7	21,8	21,8	23	23	21,2	306,81669	268,89552	268,89552	482,63299	482,63299	448,15921
10:05:00	6,3	7,5	8,1	9,7	13,7	19,8	19,8	23,1	23,1	21,5	296,47455	262,00077	262,00077	586,05435	586,05435	551,58056
10:10:00	3,3	3,9	4,2	5,5	11,6	19	19	24,7	24,7	22,4	224,0796	186,15844	186,15844	758,42327	758,42327	689,4757
10:15:00	3,9	4,1	4,3	7,3	11,3	20,3	20,3	26,8	26,8	23	230,97436	193,0532	193,0532	861,84463	861,84463	827,37084
10:20:00	4,1	3,4	5,2	6,4	11,4	21,1	21,1	29,2	29,2	24,2	230,97436	189,60582	189,60582	1137,6349	1137,6349	1034,2136
10:25:00	4,3	4,7	5	6,9	11,5	21,4	21,4	32,2	32,2	25,1	224,0796	203,39533	203,39533	1172,1087	1172,1087	1068,6873
10:30:00	4,4	4,8	4,9	5,4	11,6	21,8	21,8	32,3	32,3	25,6	237,86912	206,84271	206,84271	1206,5825	1206,5825	1172,1087
10:35:00	5,3	5,8	8,2	10,1	12,6	22,4	22,4	34	34	26,8	241,3165	203,39533	203,39533	1551,3203	1551,3203	1447,899
10:40:00	6,6	6,5	7	7,2	13,4	23,2	23,2	35,9	35,9	27,6	310,26407	272,3429	272,3429	1516,8465	1516,8465	1447,899
10:45:00	10,1	10,8	11,3	12,9	14	23,8	23,8	37,2	37,2	28,4	317,15882	275,79028	275,79028	1516,8465	1516,8465	1447,899
10:50:00	9,6	14,3	15,3	15,5	20,6	26,5	26,5	34,8	34,8	29	365,42212	341,29047	341,29047	689,4757	689,4757	655,00192
10:55:00	6,4	6,4	7	8,1	15,5	22,4	22,4	33,3	33,3	26,3	262,00077	224,0796	224,0796	620,52813	620,52813	551,58056
11:00:00	6,5	6,9	7,8	10,5	19,5	24,4	24,4	35	35	26,5	255,10601	230,97436	230,97436	1447,899	1447,899	1378,9514
11:05:00	7	7,6	8,3	10,6	16,3	25,2	25,2	36,6	36,6	27,9	272,3429	230,97436	230,97436	1585,7941	1585,7941	1516,8465
11:10:00	7	7,2	8,1	10,1	16,3	25,4	25,4	37,5	37,5	28,4	268,89552	234,42174	234,42174	1551,3203	1551,3203	1447,899
11:15:00	7,6	8,1	8,8	9,8	16,6	26	26	39,5	39,5	29,9	279,23766	241,3165	241,3165	1516,8465	1516,8465	1447,899
11:20:00	7,3	7,7	8,1	9,7	16,4	25,9	25,9	38	38	28,1	268,89552	230,97436	230,97436	1413,4252	1413,4252	1378,9514
11:25:00	7,8	8,1	8,5	10,1	17	26,1	26,1	37,2	37,2	28,3	237,86912	203,39533	203,39533	1275,53	1275,53	1206,5825
11:30:00	8,2	9,6	9,8	11,1	16,9	25,8	25,8	36,7	36,7	27,6	227,52698	193,0532	193,0532	1241,0563	1241,0563	1172,1087
11:35:00	8,4	8,9	9,1	10,9	17,6	26,2	26,2	37,1	37,1	28,2	230,97436	199,94795	199,94795	1241,0563	1241,0563	1172,1087
11:40:00	12,6	13,4	13,7	14,5	21,1	27	27	29,2	29,2	27,3	372,31688	344,73785	344,73785	723,94949	723,94949	689,4757
11:45:00	9,1	9,8	10,1	10,4	16,6	23,6	23,6	31,1	31,1	25,2	275,79028	234,42174	234,42174	965,26598	965,26598	896,31841
11:50:00	7,6	8	8,7	11,5	19,9	24,7	24,7	35,3	35,3	26,9	237,86912	199,94795	199,94795	1172,1087	1172,1087	1137,6349
11:55:00	8,1	8,6	9,2	11,5	16,7	25,4	25,4	37	37	28,5	275,79028	241,3165	241,3165	1551,3203	1551,3203	1516,8465
12:00:00	8,3	9,1	9,5	11,3	16,5	26,1	26,1	37	37	29,5	262,00077	230,97436	230,97436	1585,7941	1585,7941	1516,8465
12:05:00	8,1	9,2	9,9	10,8	17,1	26,2	26,2	38,2	38,2	28,7	272,3429	237,86912	237,86912	1482,3728	1482,3728	1413,4252
12:10:00	8,2	9,6	10,2	10,5	17,1	26,3	26,3	37,6	37,6	27,7	275,79028	244,76387	244,76387	1447,899	1447,899	1413,4252
12:15:00	9,1	10,3	11,1	11,6	17,3	26,5	26,5	36,8	36,8	27,9	296,47455	265,44814	265,44814	1206,5825	1206,5825	1137,6349
12:20:00	8,9	9,8	11,4	12,3	17,5	26,3	26,3	36,1	36,1	27,2	306,81669	268,89552	268,89552	1172,1087	1172,1087	1103,1611
12:25:00	9,7	10,6	11,6	12,3	18,1	26,7	26,7	36,8	36,8	27,6	289,57979	241,3165	241,3165	1137,6349	1137,6349	999,73977
12:30:00	22,5	24,3	24,8	25,5	17,2	26,5	26,5	35,9	35,9	26,9	310,26407	272,3429	272,3429	1206,5825	1206,5825	1103,1611
12:35:00	13,3	14,1	15,5	16,3	18,3	25,9	25,9	35,6	35,6	28,3	282,68504	237,86912	237,86912	1137,6349	1137,6349	999,73977
12:40:00	11,5	11,8	12,6	12,9	19,9	24,7	24,7	35,3	35,3	26,9	237,86912	199,94795	199,94795	1172,1087	1172,1087	1137,6349
12:45:00	6,7	7,2	7,5	7,9	17,8	25,6	25,6	37	37	28,9	293,02717	258,55339	258,55339	1172,1087	1172,1087	1068,6873
12:50:00	6,1	6,2	6,8	6,9	18,1	23,3	23,3	26,2	26,2	23,7	327,50096	303,36931	303,36931	792,89706	792,89706	758,42327
12:55:00	7,6	8,2	8,8	9,5	16,2	24,4	24,4	36,7	36,7	32	279,23766	255,10601	255,10601	1378,9514	1378,9514	1310,0038
13:00:00	9,6	10,2	10,6	11,3	17,1	24,3	24,3	37,4	37,4	29,6	275,79028	265,44814	265,44814	1482,3728	1482,3728	1413,4252
13:05:00	11,6	11,7	12,2	12,3	18,2	25	25	35,6	35,6	32,2	299,92193	265,44814	265,44814	1275,53	1275,53	1172,1087
13:10:00	11,1	11,2	11,9	12,5	17,9	24,7	24,7	36	36	32,6	303,36931	268,89552	268,89552	1034,2136	1034,2136	930,7922
13:15:00	10,8	11,3	11,8	12,6	18,9	24,9	24,9	35,9	35,9	33,2	351,63261	310,26407	310,26407	1103,1611	1103,1611	999,73977