

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA ESTUDIAR EL FUNCIONAMIENTO REAL DE UNA BOMBA DE CALOR PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA

IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE LA BOMBA DE CALOR Y LOS SENSORES PARA MONITOREO Y REGISTRO DE DATOS

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIEGO ARMANDO ENRIQUEZ DELGADO

diego.enriquez01@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. CARLOS ANDRÉS NARANJO MENDOZA, PhD.

carlos.naranjo@epn.edu.ec

DMQ, julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Diego Armando Enríquez Delgado declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

DIEGO ARMANDO ENRÍQUEZ DELGADO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Diego Armando Enríquez Delgado bajo mi supervisión.

**Ing. CARLOS NARANJO MENDOZA., Ph.D.
DIRECTOR**

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DIEGO ENRÍQUEZ DELGADO

Ing. CARLOS NARANJO, PhD

DEDICATORIA

Dedico el contenido de este trabajo a:

Cada una de las personas que me acompañaron durante este largo camino, a mi familia, amigos, profesores y desconocidos que en su momento me dieron ánimo para subir cada peldaño hasta llegar a este momento.

A aquel niño que soñaba con poder desarmar todo lo que encuentre y poder rearmarlo sin que le sobre ninguna pieza al final. Aquel que no se rindió cuando las cosas no iban bien y que festejaba cada éxito en silencio.

A mi madre, por no haberme desalojado cuando cumplí 24 y haber confiado en silencio en el potencial que tengo escondido, por haberme cuidado y confiado en mí cada día sin pedir nada a cambio.

A mi hermano y hermana que con sus palabras me animaron a alcanzar nuevos horizontes y me demostraron lo leales que pueden llegar a ser los hermanos cuando solo existe cariño de por medio.

A mis mejores amigos, por convertir mis malos momentos en sus malos momentos y ayudarme a valorar la lealtad y confianza que se genera con unos completos desconocidos.

AGRADECIMIENTOS

Le quiero agradecer a mi director, Ing. Carlos Naranjo PhD, por toda la paciencia y apoyo que me ha otorgado durante la realización de este trabajo.

Al Ing. Cristian Tapia, a quien considero un amigo más, que con sus anécdotas y conversaciones me animaron a tomar grandes decisiones en mi vida.

Finalmente, y no por ello menos importante, le quiero agradecer a todos mis leales amigos, todos ustedes que me aguantaron y toleraron durante la carrera siendo mi segunda familia, gracias por aquellos consejos que me acompañan en mi toma de decisiones y por regañarme cuando a pesar de estar tomando la decisión correcta se esforzaron en contradecirme.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico	3
2 METODOLOGÍA	13
2.1 Planteamiento de parámetros de trabajo	13
2.1.1 Parámetros de la bomba de calor	13
2.1.2 Requerimiento de calidad del agua.....	14
2.1.3 Requerimiento de encendido	15
2.1.4 Parámetros del tanque de almacenamiento.....	16
2.1.5 Parámetros de funcionamiento del proceso de recirculación	18
2.1.6 Parámetros de funcionamiento de los sensores.....	19
2.2 Pruebas de funcionamiento iniciales y corrección de los problemas existentes	22
2.3 Instalación de sensores	26
2.4 Pruebas de funcionamiento finales y toma de datos	29
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
3.2 Resultados.....	40
3.3 Conclusiones	47
3.4 Recomendaciones	48
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
5 ANEXO	52

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el proceso de implementación de una bomba de calor en una estructura para tener un banco de pruebas donde se pretende estudiar el comportamiento y funcionalidad de la bomba de calor que cuenta con un tanque de almacenamiento para simular consumo, aquí se lleva a cabo la recopilación de datos mediante la instalación de sensores que miden variables físicas y eléctricas como la temperatura, presión, corriente y voltaje respectivamente, proyectándolos en una pantalla LCD ligada a un PCB donde se encuentran todos los componentes que traducen los datos provenientes de los sensores.

Todo el trabajo se divide en 4 etapas que establecen una correcta implementación del equipo en el banco de pruebas.

La etapa 1 se centra en revisar el funcionamiento de la bomba de calor cuando su intención es calentar agua, así como se detalla la funcionalidad de los diferentes sensores, módulos o transductores que se utilizan para la toma de datos.

En la segunda etapa se detalla todo lo referente a los parámetros de trabajo del equipo, entre estos se encuentra el proceso de recirculación de agua que es primordial para poder realizar el calentamiento de la misma, también se explican los requerimientos de energía así como la forma correcta de montar los diferentes sensores dentro del equipo para no generar mediciones erróneas, terminando con la realización de pruebas iniciales para corregir parámetros y llevar a cabo un segundo grupo de pruebas para corroborar que todos los parámetros de trabajo se están cumpliendo.

La etapa 3 permite visualizar los resultados mediante gráficas en base al registro de datos obtenidos con ayuda de los sensores, aquí se analiza el comportamiento del equipo, así como si se encuentra funcionando bajo los parámetros establecidos en la etapa 2. Se establecen las conclusiones a las que se ha llegado permitiendo así conocer las posibles mejoras o consideraciones que se deben tomar en cuenta para establecer que el equipo como un todo no representa un peligro para los y las estudiantes para quienes se ha construido.

En la última etapa se presenta la bibliografía utilizada y los anexos más relevantes, como lo son el código utilizado que permite visualizar los datos, la base de datos de una de las pruebas realizadas, el esquemático de la PCB y su representación de 3 dimensiones.

PALABRAS CLAVE: Datos, implementación, bomba de calor, sensores, banco de pruebas

ABSTRACT

In the present work, the process of implementing a heat pump in a structure to have a test bench where it is intended to study the behavior and functionality of the heat pump, which has a storage tank to simulate consumption, is described here. Data collection is carried out by installing sensors that measure physical and electrical variables such as temperature, pressure, current, and voltage, respectively, projecting them on an LCD screen connected to a PCB where all the components that translate the data from the sensors are located.

The entire work is divided into 4 stages that establish a correct implementation of the equipment on the test bench.

Stage 1 focuses on reviewing the operation of the heat pump when its intention is to heat water, as well as detailing the functionality of the different sensors, modules, or transducers used for data collection.

In the second stage, everything related to the working parameters of the equipment is detailed. This includes the water recirculation process, which is essential for heating the water, as well as the energy requirements and the correct way to mount the different sensors within the equipment to avoid erroneous measurements, ending with initial tests to correct parameters and carrying out a second group of tests to confirm that all working parameters are being met.

Stage 3 allows visualizing the results through graphs based on the data recorded with the help of the sensors. Here, the behavior of the equipment is analyzed, as well as whether it is operating under the parameters established in stage 2. Conclusions are drawn, allowing to know the possible improvements or considerations that should be taken into account to establish that the equipment as a whole does not pose a danger to the students for whom it was built.

In the last stage, the bibliography used, and the most relevant annexes are presented, such as the code used to visualize the data, the database of one of the tests conducted, the schematic of the PCB, and its 3D representation.

KEYWORDS: Data, implementation, heat pump, sensors, test bench

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El proyecto se centra en la implementación del sistema de control, suministro y monitoreo de una bomba de calor para uso didáctico en el Centro de Perfeccionamiento en el uso de Refrigerantes (CEPUR), el equipo se instala en una estructura metálica diseñada para soportar su peso y cuenta con las secciones adecuadas para colocar cada uno de los elementos de control y aquellos en los que se muestran las mediciones de interés.

En primera instancia se establece el sistema de tuberías que conecta a la bomba de calor con el tanque de almacenamiento, para esto se necesita de una bomba de agua que realiza el proceso de recirculación, mismo que inicia al encender el equipo y termina cuando el agua ha alcanzado la temperatura seteada en el controlador. Una vez este apartado se cumple, se establecen los puntos de interés en el circuito de tuberías de cobre para realizar la toma de mediciones de temperatura, son 8 los sensores a ser colocados para estudiar el comportamiento del refrigerante antes y después de pasar por uno de los elementos relevantes que conforman el sistema de calentamiento de agua. Por otro lado, también se mide la presión de las líneas de alta y baja, empleando transductores de presión SB69-500V conectados en puntos de fácil acceso. Finalmente, se tiene un sensor de corriente de pinza que abraza el cable de alimentación de la bomba de calor, mismo que permite conocer si el equipo se encuentra trabajando dentro del rango aceptable de consumo de energía.

Todas las mediciones realizadas de temperatura, presión y corriente se proyectan en una pantalla LCD ligada a una PCB, esta última está compuesto de cada uno de los componentes electrónicos que permite conectar los diferentes sensores para la toma de datos.

La toma de datos se realiza variando diferentes parámetros, ya sea el flujo volumétrico de agua a la entrada de la bomba de calor, la temperatura final de calentamiento o el refrigerante a ser utilizado.

Con todo esto, se busca que los y las estudiantes puedan comprender fácilmente el proceso de calentamiento de agua en este tipo de equipos, alcanzar a identificar cada uno de los componentes que constituyen el proceso, así como su función dentro del mismo y diferenciar los cambios en cuanto que se presentan conforme se varían los parámetros de trabajo.

1.1 Objetivo general

Implementar y montar una bomba de calor y los sensores de monitoreo y registro de datos.

1.2 Objetivos específicos

1. Revisar bibliografía referente a una bomba de calor para calentamiento de agua en viviendas unifamiliares y de lectura, registro y tratamiento de datos experimentales de variables termodinámicas.
2. Adquirir la bomba de calor y los sensores
3. Instalación de los sensores en la bomba de calor
4. Montar y probar el funcionamiento de la bomba de calor

1.3 Alcance

El alcance del presente trabajo de integración curricular es analizar el comportamiento de una bomba de calor durante el proceso de calentamiento de agua, tomando en consideración las diferentes variables que son alteradas a criterio del operador.

Este trabajo se centra en la recopilación y análisis de datos utilizando una PSB operativa, dichos datos varían acorde a los cambios realizados en cada una de las pruebas, ya sea el tipo de refrigerante o el flujo volumétrico de agua a la entrada del equipo. El análisis es realizado con ayuda de Excel, donde se compara el tiempo de calentamiento con respecto a los parámetros antes mencionados.

Al culminar el análisis de los datos obtenidos en las diferentes pruebas, se obtiene un punto de equilibrio para estimar el tipo de refrigerante y el caudal óptimo para que el proceso de calentamiento de agua sea el menor, con ello se obtiene por defecto un ahorro energético.

1.4 Marco teórico

Las tecnologías de calentamiento de agua para el sector residencial en los últimos años han innovado para aprovechar de mejor manera la energía, una de estas son las bombas de calor, estos equipos tienen un costo de adquisición inicial alto que se ve justificado por su mayor eficiencia energética en comparación a los equipos existentes, costos operativos menores a largo plazo, una mayor vida útil y una menor generación de emisiones.

1.1.1 Demanda de Agua caliente

Tanto en el sector industrial, hospitalario, hotelero o residencial el agua caliente supone un insumo esencial para el libre desarrollo de actividades que ahí se llevan a cabo. Centrándose en el sector residencial, el agua caliente se emplea para desarrollar actividades cotidianas como lo son: preparación de alimentos, aseo personal y lavandería. Tanto es así que se estima que un ecuatoriano emplea 40 litros por día, con esto en mente se debe analizar cuan factible es emplear el equipo en comparación a otros ampliamente distribuidos actualmente en los hogares. [1]

1.1.2 Exigencia de temperatura de agua caliente para el sector residencial

Considerando que el país tiene dos estaciones, tanto invierno como verano, no se tienen parámetros establecidos en cuanto a la temperatura ideal del agua caliente, sin embargo, durante el verano la demanda de calefacción es menor que en invierno. Por tanto, se estima que el rango de temperatura adecuado para alcanzar el confort térmico es de entre 40 y 50 °C en verano y 55 y 60 °C en invierno. Teniendo muy presente el tiempo de exposición segura para evitar quemaduras en el cuerpo. [2]

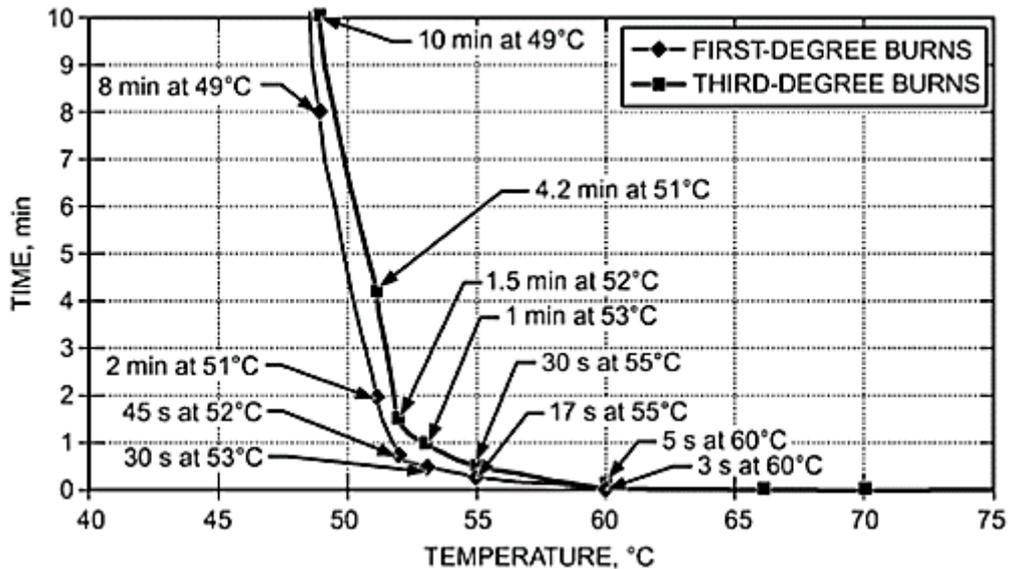


Figura.1 Aparición de quemaduras acorde al tiempo y temperatura de exposición [3]

1.1.3 Sistemas para el calentamiento de agua

Los sistemas se clasifican acorde al tiempo en el que suministran el agua caliente:

- a) Sistemas instantáneos
- b) Sistemas de acumulación

Los sistemas instantáneos son aquellos que entregan el agua a una temperatura aproximada de consumo de forma continua, por tanto, la capacidad de calentamiento de estos equipos es mayor y su consumo de energía se incrementa.

Por otro lado, para el caso de los sistemas de acumulación, el agua no alcanza la temperatura de trabajo en un corto tiempo, más bien se redirecciona a un tanque de almacenamiento, mismo que se encuentra aislado térmicamente del entorno para mantener la temperatura del agua hasta su consumo.

La bomba de calor forma parte de este último sistema, y con ello se explica el proceso de calentamiento del agua, mismo que se inicializa suministrándole al tanque de almacenamiento agua proveniente de la red pública para luego pasar al equipo, mediante tuberías se recircula el agua tantas veces como sean necesarias hasta alcanzar la temperatura deseada, una vez se inicializa el consumo, agua fría ingresa al tanque y el proceso de calentamiento se reanuda una vez más.

1.1.4 Calentamiento de agua empleando una bomba de calor

Un hogar ecuatoriano promedio no posee el capital para la compra de este tipo de equipos, sumándole a esto el desconocimiento sobre su existencia en el mercado ha ocasionado un

estancamiento en cuanto a la distribución y adquisición. La bomba de calor promete ser una alternativa confiable con relación a los sistemas que emplean la electricidad o GLP para llevar a cabo el proceso de calentamiento.

La bomba de calor seleccionada para llevar a cabo este trabajo es del tipo aire-agua, donde la energía es obtenida del aire para posteriormente ser transferida a un volumen de agua que podría emplearse para cumplir requerimientos de climatización, como lo sería un piso radiante o también para el caso de interés que es la producción de agua caliente sanitaria.

1.1.5 Principio de funcionamiento y componentes de la bomba de calor

El principio de funcionamiento de este equipo se basa en la transferencia de calor desde el refrigerante que circula por el condensador hacia el agua almacenada en un tanque con la finalidad de aumentar su temperatura hasta la tipleada en el equipo. Para cubrir la demanda es fundamental tener un tanque de almacenamiento externo, este último posee conexiones de tubería que permiten llevar a cabo el proceso de recirculación con ayuda de una bomba, el tiempo que tarde en calentarse toda el agua está en función del volumen deseado, así como del flujo volumétrico a la entrada de la bomba de calor.

Bajo un criterio ingenieril, el funcionamiento se explica en función de los principios termodinámicos del proceso y se estructura siguiendo 4 puntos:

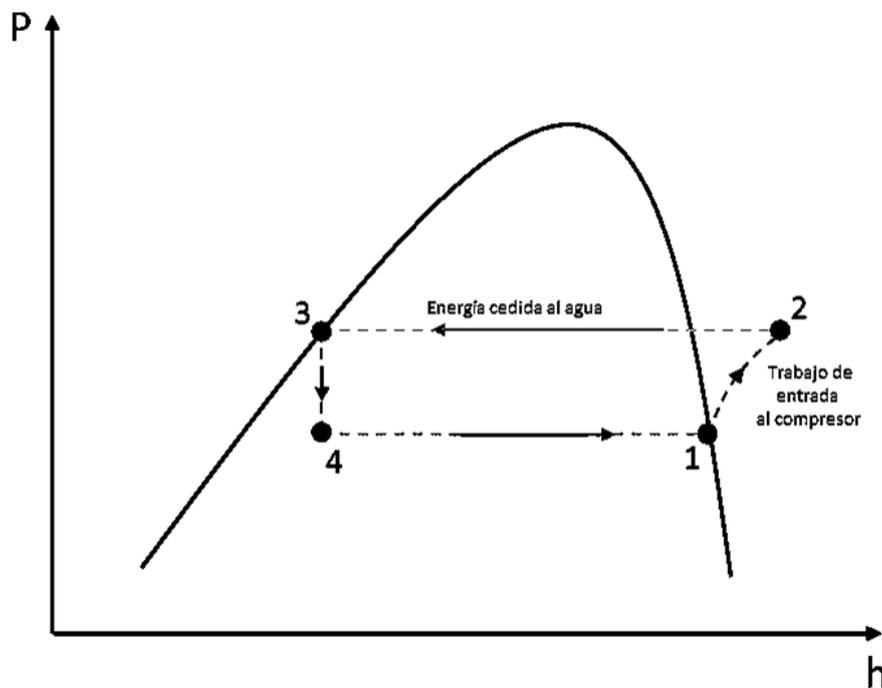


Figura 2. Diagrama P vs h del sistema de la bomba de calor **Fuente:** Autor

1. La transición del punto 1-2 representa el ingreso y salida del refrigerante hacia y desde

el compresor, en un inicio el refrigerante se encuentra en estado de vapor, de preferencia sobrecalentado, aumentado su presión y temperatura gracias a la conversión de la energía mecánica en térmica.

2. Durante la transición de 2-3 se observa que el refrigerante cede su energía, dicha energía es ganada o absorbida por el agua que se encuentra en recirculación, con ello el refrigerante se condensa, pero no pierde su presión de trabajo considerablemente.
3. Una vez ha salido del condensador ingresa al tubo capilar, es decir, pasa del punto 3 al punto 4, donde el refrigerante experimenta una caída de presión.
4. Finalmente, el refrigerante a de recorrer el punto 4 hacia el 1 para convertirse en un fluido a baja presión, pero a alta temperatura, esto es gracias a que ha robado energía del entorno al estar dentro del evaporador.

El ciclo continúa ininterrumpidamente hasta que el agua haya alcanzado la temperatura de uso, momento en el cual la bomba de calor se apaga. [4]

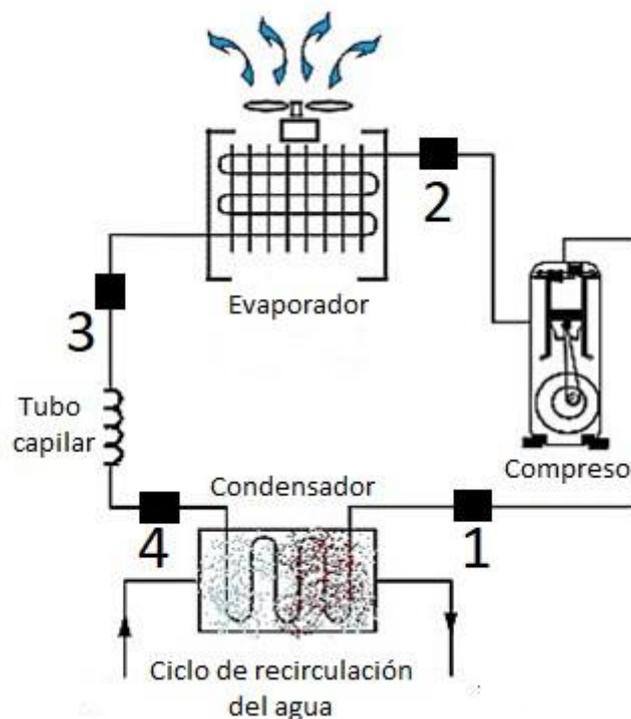


Figura 3. Esquema de bomba de calor aire-agua **Fuente:** Autor

Analizando los componentes estándar de una bomba de calor, aparece un elemento que cumple una función muy importante, tan importante que permite que la bomba de calor realice ya sea funciones de calefacción o refrigeración respectivamente.

1.1.6 Válvula de 4 vías

Este elemento se encuentra en bombas de calor reversibles y se encarga de redireccionar

el flujo de refrigerante acorde a la configuración del equipo. Es decir, el refrigerante seguirá diferentes caminos en base a si el equipo va a calentar o refrigerar el agua. Para ello se debe especificar por cuál vía transita el fluido y su estado termodinámico.

A continuación, se muestra la Figura 4, donde se encuentran especificadas todas las vías:

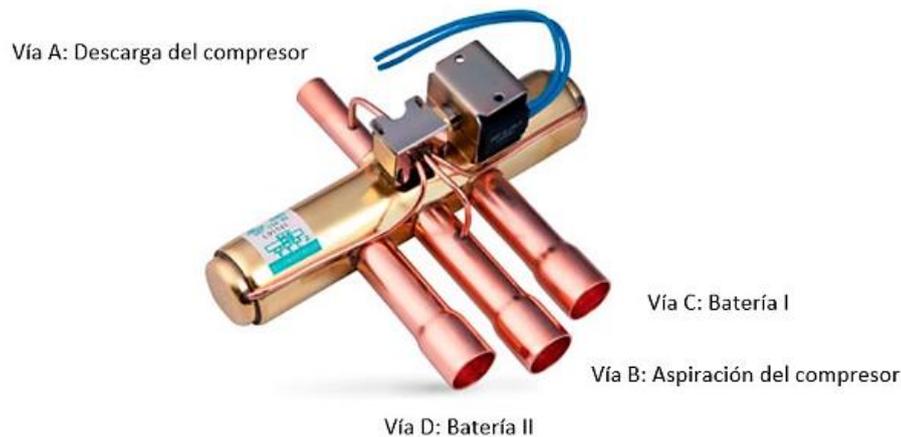


Figura 4. Válvula de 4 vías [5]

Caso 1.- Equipo configurado para calentar agua

En este caso las **vías B y C** se encuentran conectadas, todo el refrigerante que sale del evaporador es enviado al compresor para aumentar su temperatura y presión. Posteriormente el fluido resultante ingresa por la **vía A**, misma que esta vez se encuentra conectada a la **vía D**, misma que direcciona el refrigerante al condensador, lugar donde el agua se encuentra acumulada, es durante este rango de tiempo que el agua gana energía y el refrigerante disminuye su temperatura a presión constante, finalmente el refrigerante pasa por el tubo capilar para reducir su presión y volver a ingresar al evaporador, cumpliéndose nuevamente el ciclo.

Caso 2. – Equipo configurado para enfriar agua

Una vez el refrigerante ha ganado energía en función del agua que ha de ser refrigerada en el condensador ingresa en la **vía D**, esta vez se encuentra interconectada con la **vía B** para ingresar al compresor y aumentar su temperatura y presión, es así como el refrigerante bajo sus nuevos parámetros termodinámicos ingresa en la **vía A** y mediante la **vía C** dicho refrigerante es enviado al evaporador, es aquí donde existe un intercambio de calor entre el evaporador y el entorno, una vez más el refrigerante pasa por el tubo capilar para reducir su presión. El ciclo se sigue repitiendo y se puede llevar a cabo un proceso de calefacción en un hogar. [5]

1.1.7 Selección de refrigerantes de trabajo

Un refrigerante es todo fluido empleado para absorber y transferir calor dentro de un equipo de refrigeración o calefacción en base a cambios de estado.

Un equipo puede trabajar con varios tipos de refrigerantes, siempre y cuando se tengan presentes ciertas consideraciones:

- Compatibilidad del Equipo
 - o Materiales. – Los diferentes elementos que tiene contacto directo con el refrigerante deben ser compatibles para todos los tipos que se van a utilizar. Sellos, juntas y componentes internos son algunos de los elementos que pueden sufrir daños.
 - o Diseño del sistema. – Los parámetros de trabajo del refrigerante se encuentran ligados al diseño del equipo, por tanto, se debe poner especial atención a la presión de operación, su capacidad de enfriamiento y también a sus propiedades físicas y químicas.
- Propiedades termodinámicas del refrigerante
 - o Presiones de operación. – los refrigerantes a las mismas condiciones de trabajo poseen diferentes propiedades y operan a diferentes presiones. Por tanto, el equipo debe ser capaz de sobrellevar eficientemente las fluctuaciones de presión garantizando que el equipo es seguro.
 - o Eficiencia energética. – analizar las afectaciones que el cambio de refrigerante ocasiona en cuanto al rendimiento del equipo permite establecer cuan alta es la eficiencia de este.
- Seguridad
 - o Toxicidad y flamabilidad. – incluso cuando el refrigerante supone una mejora en la eficiencia del proceso, la seguridad del operador es un factor prioritario, refrigerantes como el Amoniaco suponen un altísimo riesgo en la integridad del personal, las medidas de seguridad para trabajar con estos refrigerantes son indispensables.

Una vez se tiene en claro estos parámetros y guiándose en la ficha técnica del equipo se carga la masa de refrigerante apropiado para el correcto funcionamiento y cumplimiento de las condiciones de trabajo establecidas.

1.1.8 Refrigerante R417A

El refrigerante R-417A es una mezcla de tres componentes, específicamente del R-125, R-134a y R600, las proporciones varían. Es el reemplazo del refrigerante R-22.

- **Propiedades**

- No es inflamable ni tóxico. – Clasificado como A1 por ASRHAE.
- Alta presión. – la presión del refrigerante R417A es ligeramente mayor a la alcanzada por el R-22, por tanto, no es necesario rediseñar el equipo.
- Eficiencia. – Alcanzan eficiencias mayores que el R-22, teniendo adicionalmente una mayor capacidad de enfriamiento.
- Medio ambiente. – No ocasiona daños en la capa de ozono. (ODP =0)

- **Aplicaciones**

- Bombas de calor
- Aire acondicionado para el apartado comercial y residencial [6]

Tabla 1. Comparación del refrigerante R417-A y R22 [6]

R417-A vs R22	
Ventajas	Desventajas
Propiedades termodinámicas similares y por tanto similar comportamiento	Menor oferta de componentes y servicios de mantenimientos en los equipos
Compatibilidad con tecnologías destinadas al otro refrigerante	Presiones ligeramente mayores
Menor impacto ambiental (no deteriora la capa de ozono)	Su costo de adquisición es más alto

1.1.9 Componentes de monitoreo

En una bomba de calor los parámetros de análisis para saber si el equipo se encuentra trabajando correctamente son: la temperatura, la presión y el consumo de energía eléctrica. Para medir dichas magnitudes se han seleccionado sensores especializados para cada caso.

Medidores de temperatura, presión, corriente y voltaje

- **Sensor PT100**

Este sensor es de tipo RTD (detector de temperatura por resistencia), por tanto, la lectura de temperatura se basa en la variación de la resistencia eléctrica del material con el que se fabrican los cables, de platino para los PT100 donde dicha resistencia está calibrada para que a 100 ohmios a 0 °C. Conforme aumenta la temperatura se tiene también un aumento en la resistencia del platino de forma línea. [7]

Tabla 2. Descripción del sensor PT100 [7]

PT100	
Características	<ul style="list-style-type: none">- Rango de medición entre los -200 y 850 °C- Poseen 2, 3 y 4 hilos, a mayor número de hilos la precisión y estabilidad al obtener datos es mayor.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none">- Su tiempo de vida útil y confiabilidad es mayor a otros sensores- Amplio rango de medición- Ideal en aplicaciones que requieren alta precisión en la medición
Desventajas	<ul style="list-style-type: none">- Costo mayor a sensores como los termopares- El tiempo de respuesta es mayor en comparación a un termopar
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none">- Procesos industriales de cualquier área- Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)



Figura 5. Sensor PT100 [8]

El sensor de la FIGURA corresponde al PT100 seleccionado, cuenta con dos y se coloca en cada uno de los puntos de interés en la bomba de calor.

- **Transductor de presión SB69-500V**

Componente empleado para medir la presión ya sea de fluidos en estado líquido o gases, transforma la presión física en una señal eléctrica mediante la ayuda ya sea de un diafragma o una cápsula de presión que sufre deformación cuando se encuentra sometido a un aumento o reducción de presión, dicha deformación es la que se traduce en la señal eléctrica en voltios. [9]

Tabla 3. Descripción del SB69-500V

SB69-500V	
Características	<ul style="list-style-type: none">- Su rango de medición- Voltaje de trabajo de entre 4.5 – 5 V- Entrega un voltaje de salida de 0.5 – 4.5 V- Confiabilidad y larga vida útil
Ventajas	<ul style="list-style-type: none">- Excelente precisión y exactitud en la toma de datos- Adecuado para aplicaciones industriales
Desventajas	<ul style="list-style-type: none">- Alto costo de adquisición- Requiere mantenimiento periódico



Figura 6. SB69-500V [9]

- **Módulo PZEM-004T**

Elemento encargado de la medición de parámetros eléctricos tales como: voltaje, corriente y potencia. Posee 4 pines destinados a la alimentación y comunicación:

- VCC: alimentación del módulo
- GND: tierra
- TX: Transmisor de datos (UART)
- RX: Recepción de datos (UART)

Tabla 4. Descripción del módulo PZEM-004T [10]

Características	<ul style="list-style-type: none">- Medición de voltaje de alimentación: 80-260 V AC \pm 0.5%- Medición de corriente: 0-100 A \pm 0.5%- Medición de potencia: 0-22 kW \pm 1.0%- Medición de energía: 0-9999 kWh \pm 1.0%- Frecuencia de trabajo: 45-65 Hz \pm 0.2%
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none">- Control de sistemas de carácter eléctrico en áreas industriales- Áreas de alimentación y control del recurso energético



Figura 7. Módulo PZEM-004T [10]

- **Sensor de corriente de pinza PZCT-02**

Este sensor tiene un funcionamiento en base al principio de inducción electromagnética, es decir, una vez el elemento que conforma la pinza ha abrazado el conductor donde se va a medir el flujo de corriente, dicho sensor va a detectar el campo magnético que se produce cuando una corriente pasa por el conductor, el cambio magnético que se ha detectado ahora induce una corriente en el sensor que es proporcional a la que pasa por el conductor. La señal de salida es detectada o recibida por el Módulo PZEM-004T, proyectando el resultado en la pantalla LCD acoplada al Arduino Mega empleado en esta ocasión. [11]

2 METODOLOGÍA

Para continuar con el desarrollo del presente trabajo se especifican todas las actividades que se han llevado a cabo para el montaje de la bomba de calor en la estructura metálica, así como la instalación de los diferentes sensores de interés para el monitoreo del equipo.

El desarrollo se subdivide en 4 etapas detalladas a continuación

2.1 Planteamiento de parámetros de trabajo

Una vez se establece que el equipo será operado por estudiantes, se necesitan establecer parámetros para un uso sencillo y eficiente permitiendo que los datos, operación y visualización del ciclo tengan una comprensión absoluta.

2.1.1 Parámetros de la bomba de calor

- Tiempo de operación

El tiempo de operación del equipo se encuentra en función de tres parámetros: flujo volumétrico de agua que ingresa al equipo, tipo de refrigerante utilizado y temperatura que se quiere alcanzar.

Se puede pensar que el volumen de agua a calentar es otro parámetro de operación, sin embargo, dada la configuración del tanque de almacenamiento, el agua caliente puede ser extraída para consumo siempre y cuando el tanque se encuentre totalmente lleno, por tanto, para realizar la toma de datos esta viene a ser una condición de trabajo.

El equipo se apaga automáticamente cuando el agua dentro del tanque, misma que se encuentra recirculando, ha alcanzado la temperatura seteada en el panel de control. Y se vuelve a encender cuando el agua ha reducido su temperatura en 5°C.

- Alimentación de agua

En ausencia de una bomba de recirculación instalada directamente en el equipo, se adquiere una que cumple con los requerimientos de suministro de agua para que el equipo se encienda, es decir, si a la bomba no se le suministra un caudal mínimo, esta no va a encender.

Un factor importante para tomar en cuenta es la magnitud que ingresa al equipo, esta juega un papel fundamental en cuanto al tiempo de operación, la transferencia de energía entre el agua y el refrigerante cambia acorde a la velocidad de los fluidos, es por ello por lo que se ha buscado una bomba que suministre un caudal lo suficientemente bajo como para aumentar la eficiencia de calor dentro del pequeño tanque donde el agua se almacena y recircula.

El modelo de bomba seleccionado es el **LRP15-90A/160**, misma que en su punto optima de operación entrega aproximadamente 25 l/min, sin embargo, se encuentra 4 veces por encima de la capacidad nominal de calentamiento de agua del equipo. Adicional a esto se ha instalado una válvula de globo de 3/4" que tiene como finalidad regular de mejor manera el caudal de entrada al equipo. [10]

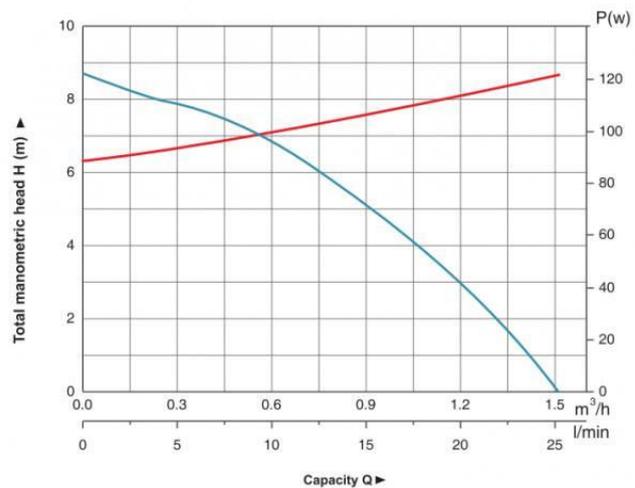


Figura 8. Bomba y curva de rendimiento hidráulico [10]

2.1.2 Requerimiento de calidad del agua

Con esto se establecen los parámetros con los cuales se precautela el correcto funcionamiento del sistema, la eficiencia y la durabilidad. A continuación, se presentan dichos parámetros en la Tabla 5 y Tabla 6. [12]

La Tabla 5 establece los parámetros idóneos dados por el fabricante del equipo, uno de los criterios que se reduce al emplear agua de baja calidad es el rendimiento, las causas van desde las incrustaciones hasta el ensuciamiento de las tuberías. En la Tabla 6 se plantean las propiedades del agua que suministra

la red de agua potable de Quito.

Tabla 5. Propiedades idóneas del agua [12]

Dureza total	200 mg/litro o p.p.m
Sólidos disueltos totales	600 mg/litro o p.p.m
Conductividad eléctrica	850 μ S/cm
Cloruro	250 mg/litro o p.p.m
Magnesio	10 mg/litro o p.p.m
Sodio	150 mg/litro o p.p.m
pH	Entre 6.5 y 8.5

Tabla 6. Propiedades del agua de Quito [13]

Conductividad eléctrica	726.4 μ S/cm (Máx)
Cloruro	\approx 10 mg/litro o p.p.m
Magnesio	\approx 10 mg/litro o p.p.m
Sodio	\approx 20 mg/litro o p.p.m
pH	\approx 7.3

2.1.3 Requerimiento de encendido

La bomba de calor trabaja con 220 V monofásico acorde a su placa técnica, dado que en el país la red residencial entrega solamente 120 V monofásica, se han realizado las siguientes modificaciones para poder cumplir con las condiciones adecuadas:

- Instalar dos interruptores de protección en la caja térmica de 120 V.
- Conectar dos cables blandos eléctricos N° 12 a dichos interruptores,

considerando que dicho cable debe soportar la corriente de trabajo evitando así sobrecalentamiento y un posible cortocircuito.

- Conectar los dos cables en las entradas del tomacorriente que van a ir ligadas a las clavijas del enchufe. Dichas clavijas son más gruesas y robustas que las empleadas para electrodomésticos de uso residencial.
- En la tercera entrada se conecta el cable neutro que a su vez se encuentra conectado a la caja térmica.



Figura 9. Conexión del tomacorriente **Fuente:** Autor

- Los cables provenientes del equipo y conectados al enchufe deben respetar la configuración establecida en el tomacorriente.



Figura 10. Conexión del enchufe **Fuente:** Autor

2.1.4 Parámetros del tanque de almacenamiento

- Dimensionamiento y puntos de conexión

El tanque construido para almacenar el agua caliente de consumo tiene una dimensión de 1.5 metros de altura por 0.7 m de diámetro. Cuenta con dos cilindros metálicos, uno dentro del otro, separados por una capa aislante de un espesor de aproximadamente 2 cm con el objetivo de mantener lo más estable posible la temperatura dentro del tanque antes de su consumo.

Se instalan 4 puntos de conexión para acoplar niples de $\frac{3}{4}$ " , uno se encarga de suministrar al tanque y también sirve de purga, otro se encarga de permitir la extracción de este y los últimos dos sirven para llevar a cabo el proceso de recirculación del agua.

Tabla 7. Conexiones del tanque de almacenamiento **Fuente:** Autor

	<p>Tanque de Almacenamiento</p>
	<p>Punto de conexión para alimentación y desagüe</p>

	<p>Punto de consumo</p>
	<p>Puntos de conexión para el proceso de recirculación</p>

2.1.5 Parámetros de funcionamiento del proceso de recirculación

Una vez establecidos los puntos de salida y entrada del agua desde y hacia el tanque de almacenamiento, se diseña y construye el circuito hidráulico que establece la conexión entre el tanque, la bomba de agua y la bomba de calor de forma que no existan fugas ni cambios bruscos de sección transversal en las tuberías.



Figura 11. Esquema de recirculación **Fuente:** Autor

2.1.6 Parámetros de funcionamiento de los sensores

○ Sensores de Temperatura

El sensor seleccionado es el PT100 de dos hilos, sabiendo que el rango de medición del equipo va desde los 15 °C hasta los 45 °C, se verifica que se cumple con el rango de medición establecidos en el diseño del sensor, adicional a esto son ideales para ser instalados en los puntos de interés, mismos que se encuentran en la tubería de cobre que conecta cada uno de los elementos que componen el ciclo de calentamiento del agua.

Consideraciones para la instalación

Antes de instalar directamente el sensor a la tubería hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Interferencia térmica. – la temperatura del refrigerante dentro de la tubería se ve distorsionada debido a que la tubería de cobre supone una resistencia térmica y a la vez se encarga de disipar el calor al entorno.
- Error por resistencia de los cables. – al pasar los 2 cables del sensor a

través de la tubería de cobre se pueden presentar errores al aumentar la variabilidad en la resistencia del material.

- Interferencia eléctrica. – al ser el cobre un material conductor, este puede generar interferencias electromagnéticas y por tanto errores en las mediciones.

Para la adquisición de datos, los dos cables que posee el sensor se conectan a las borneras soldadas en el MAX6675, mismo que forma parte del PCB final y que va a permitir la visualización de las temperaturas en una pequeña pantalla LCD ligada a un Arduino MEGA.

○ **Sensores de Presión**

Se adquieren dos sensores de presión del tipo SB69-500V, encargados de medir la presión de alta y de baja del equipo.

Criterios de selección

- Rango de funcionamiento. – dadas las consideraciones de trabajo en cuanto a la temperatura (15-45 °C) y el tipo de refrigerante utilizado (R417-A) se establecen las presiones ideales de operación. Por tanto, y en base a utilización de la Figura 13 se establecen las presiones de trabajo referenciales del equipo:

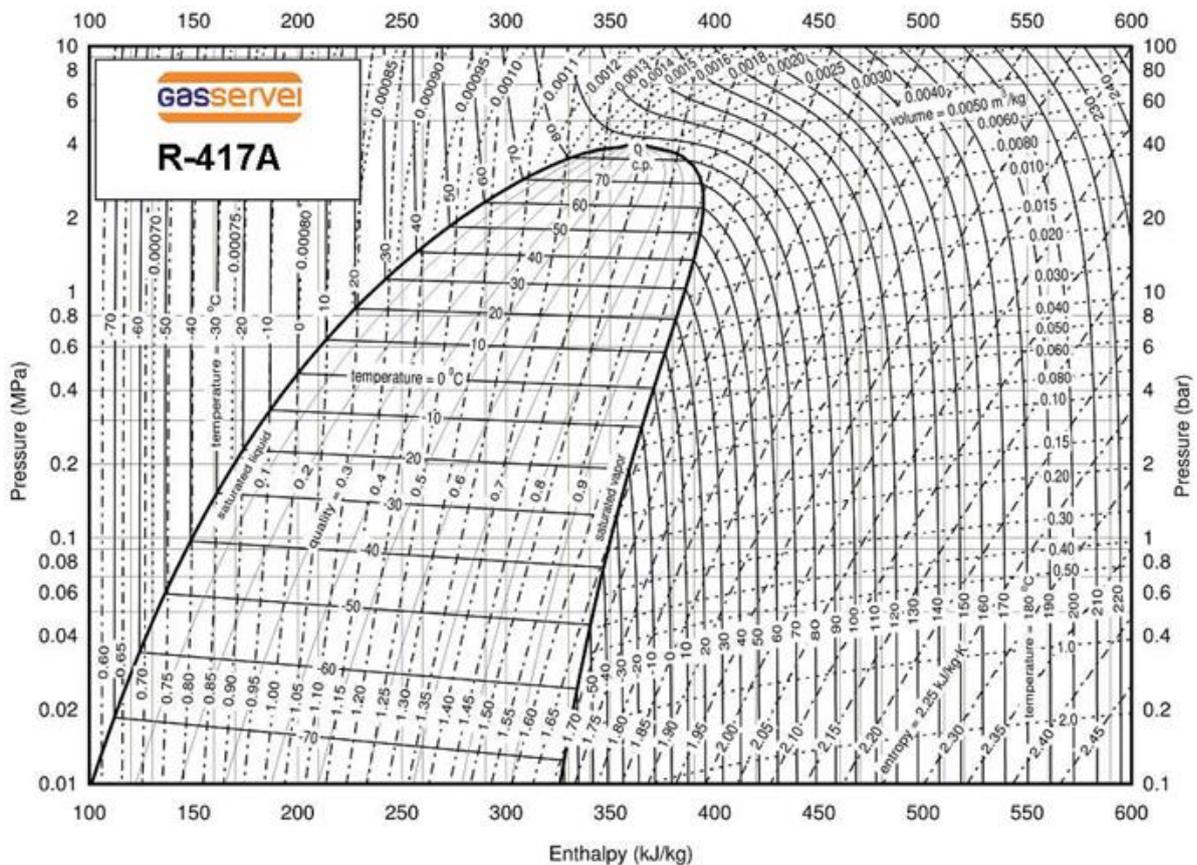


Figura 12. Diagrama P vs h del refrigerante R417-A [15]

$$P_{baja} \approx 80 \text{ [psi(g)]}$$

$$P_{alta} \approx 207 \text{ [psi(g)]}$$

- **Sensor de corriente de pinza**

Una vez se ha adquirido el *Módulo PZEM-004T* viene consigo un sensor de corriente de pinza *PZCT-02* que es un sensor diseñado de forma compacta para cuantificar la corriente eléctrica que pasa por un conductor, en este caso en uno de los cables que alimentan a la bomba de calor.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del PZCT-02

Corriente Nominal	100 [A] (AC)
Corriente de Salida	1 [A] (AC)
Precisión	± 1 %

Frecuencia de operación	50 – 60 Hz
Temperatura de operación	-20 °C a 70 °C
Aislamiento	Alta resistencia dieléctrica

Consideraciones y pasos para su instalación

Primeramente, se debe conocer el consumo máximo del equipo en donde va a ser colocado, dado que el sensor viene en la misma caja que el módulo de monitoreo PZEM-004T se tiene total compatibilidad, la pinza se debe colocar en un lugar donde no existe demasiada humedad o una temperatura excesiva.

La instalación es realmente simple, el sensor se coloca alrededor del conductor en donde se desea medir la corriente y los cables que salen del sensor se conectan a las entradas del módulo de medición PZEM-004T.

2.2 Pruebas de funcionamiento iniciales y corrección de los problemas existentes

Una vez se adquiere el equipo, se verifica que se encuentra funcionando correctamente, para ello se llena el tanque hasta 1/3 de su altura, con esto se asegura que el nivel del agua ha sobrepasado los orificios destinados para hacer las conexiones para el proceso de recirculación. Se enciende el equipo al establecer la reconexión o restablecimiento del breaker, es decir, se cambia la posición de OFF a ON, una vez se energiza al equipo es necesario establece la temperatura que se desea alcanzar, esto se visualiza en la Figura 14 y también se puede definir el tiempo que va a permanecer encendido el equipo, aquí se llevan a cabo las primeras mediciones.



Figura 13. Pantalla del controlador

En la Figura 14 se pueden observar diferentes características del equipo y de sus condiciones de trabajo, primeramente, se tiene la figura de un sol, este representa que se está llevando a cabo el proceso de calentamiento del agua; el valor de 46 °C es dado por el operario, dicho valor es el que se desea alcanzar; el valor de 27 °C es la temperatura aproximada a la que se encuentra el agua en el condensador.

El símbolo de un candado establece que no se pueden cambiar las condiciones de trabajo del equipo, de querer hacerlo es necesario presionar durante al menos 3 segundo o hasta escuchar un sonido sobre el pulsador llamado *power*, después de esto si se quiere aumentar o reducir la temperatura deseada se pulsa sobre el pulsador llamado *setting* y luego sobre *up* o *down* respectivamente. Para establecer el tiempo durante el cual se desea que el equipo se encuentre encendido se utiliza nuevamente el pulsador *setting* acompañado del pulsador *timer* y utilizando las opciones *up* o *down* se establece dicho tiempo.



Figura 14. Distribución de los pulsadores

En la sección superior derecha de la Figura 14 se observan 3 recuadros, mismos que se observan de mejor manera en la Figura 16, cada uno especifica que el elemento se encuentra funcionando, es decir, en ausencia de trabajo de alguno de los equipos, su recuadro no se encuentra plasmado, esto se puede observar en la Figura 17.

Para el caso de la Figura 16, la *Bomba de recirculación*, *Ventilador* y *Compresor* se encuentran encendidos y trabajando, mientras que en la Figura 17, solamente la *Bomba de recirculación* se encuentra trabajando.

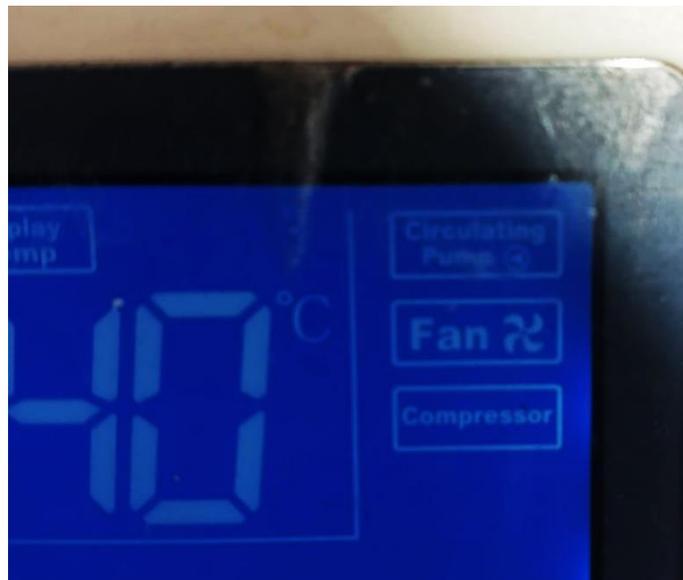


Figura 15. Elementos funcionando en simultaneidad

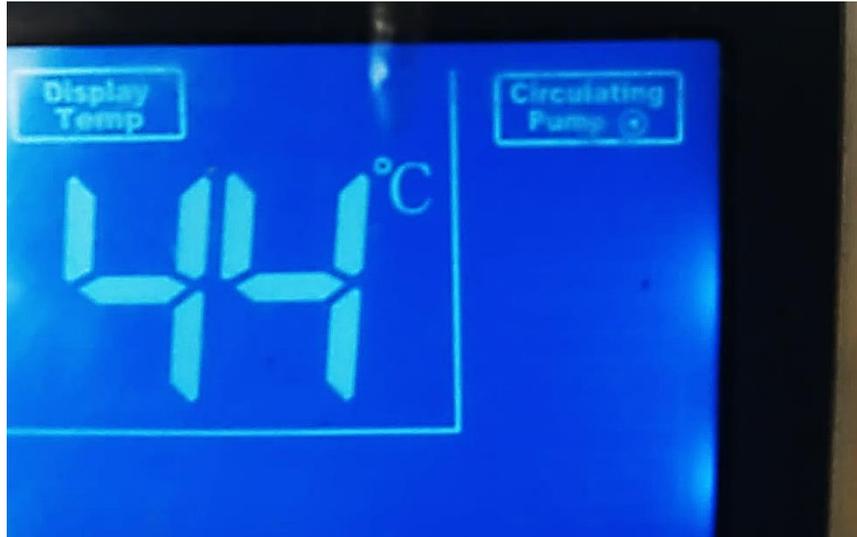


Figura 16. Elementos encendidos antes de entrar en operación

Los datos adquiridos en esta sección sirven para conocer parámetros de trabajo para tener en cuenta durante los mantenimientos, esto debido a que no se está trabajando con el volumen de agua final. Es decir, durante la puesta en marcha de la bomba de calor se verifica que no existan fugas en el circuito hidráulico, en las vías de refrigerante y que no se presenten corto circuito en las juntas.

Es aquí donde se establece que el caudal de ingreso suministrado por la bomba de agua modelo LRP15-90A/160 es excesivo, aumentando considerablemente el tiempo de trabajo del equipo y de la bomba de agua instalada en ese entonces, por tanto, aquí se estableció un parámetro a ser modificado para posteriores mediciones y adquisición de datos. Dada la configuración del tanque los orificios de alimentación, consumo, descarga y recirculación no pueden ser intercambiados entre sí.

- Parámetros de funcionamiento antes y durante el encendido del equipo
 - o Antes del funcionamiento

Las mediciones de temperatura en los puntos de interés del equipo no tienen un orden lógico, es decir, la temperatura del refrigerante que sale del compresor no va a ser obligatoriamente mayor que todas las demás temperaturas, mientras que la presión de baja tiene una magnitud ligeramente mayor que la presión de alta. La sección destinada a medir corriente me marga un valor de 0 Amperios, mientras que la sección en la pantalla LCD ronda en torno a un valor de 220 Voltios respectivamente.

- Durante el funcionamiento

Una vez el equipo se ha encendido y el compresor ha empezado a trabajar se empieza a observar una tendencia en torno a la temperatura de salida del refrigerante desde el compresor, dicha temperatura se define como “Temp 3” y es mayor que los valores obtenidos antes y después por los demás sensores. Aquí también se evidencia el cambio abrupto en las presiones de alta y de baja, dándole concordancia a sus nombres, la presión de alta alcanza una magnitud aproximada de 225 psi mientras que la presión de baja ronda los 64 psi. El equipo va a permanecer trabajando hasta que se haya alcanzado la temperatura seteada en el controlador del equipo, sin embargo, se vuelve a encender cuando la diferencia de temperatura del agua con respecto a la deseada ha superado los 5 °C, iniciando de nuevo el proceso de calentamiento.

Por otro lado, si bien la sección que mide el voltaje sigue manteniéndose en torno a los 220 V, la corriente fluctúa hasta estabilizarse en torno a los 3.4 Amperios. Obteniendo en base a esos dos datos la potencia de trabajo de la bomba de calor aproximada.

2.3 Instalación de sensores

- Sensor de temperatura PT100

Una vez se conocen las implicaciones que se pueden presentar al conectar el sensor directamente sobre la superficie del tubo de cobre se establece una opción que busca reducir la desviación de las mediciones.

Primeramente, se cubre la superficie con *cinta quirúrgica cureband microporoso* evitando así la interferencia eléctrica producida por el contacto directo de dos superficies metálicas, el sensor se coloca a lo largo de la superficie cubierta y se cubre con cinta adhesiva de aislamiento de espuma, buscando sellar la zona a ser medida y evitando que el sensor se mueva, finalmente se asegura todo mediante un amarre plástico.



Figura 17. Instalación de los sensores PT100 **Fuente:** Autor

- Transductor de presión SB69-500V

Se emplean dos sensores SB69-500V, siendo colocados en las tuberías de baja y alta presión con ayuda de un acople con rosca que se ajusta a la rosca del sensor y que a su vez viene soldado en la parte posterior mediante una soldadura de plata o brazing con plata que es usada por su alta resistencia y durabilidad.

Para llevar a cabo la soldadura es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Limpieza. – limpiar todas las superficies para asegurar la correcta unión de las superficies, obteniendo una soldadura fuerte y sin impurezas.
2. Aplicación de flux. – aplicar una cantidad adecuada para asegurar que no exista oxidación mientras se calienta la tubería y permita que el material de relleno fluya correctamente.
3. Calentamiento. – llevar por sobre los 450 °C la zona donde se va a llevar a cabo la unión.
4. Aplicación de la soldadura. – acercar el elemento de aleación de plata para que se funda y fluya en todo el contorno y hacia el interior.
5. Enfriamiento y limpieza. – una vez la zona se haya enfriado se debe limpiar los residuos de flux para evitar la corrosión en la tubería.



Figura 18. Instalación del transductor de presión SB69-500V **Fuente:** Autor

- Sensor de corriente de pinza

Primeramente, se debe conocer el consumo máximo del equipo en donde va a ser colocado, dado que el sensor viene en la misma caja que el módulo de monitoreo PZEM-004T la compatibilidad es adecuada y finalmente, se debe colocar en un lugar donde no existe demasiada humedad o temperatura excesiva.

La instalación es realmente simple, el sensor se coloca alrededor del conductor en donde se desea medir la corriente, los cables que salen del sensor se conectan a las entradas del módulo de medición establecidas.

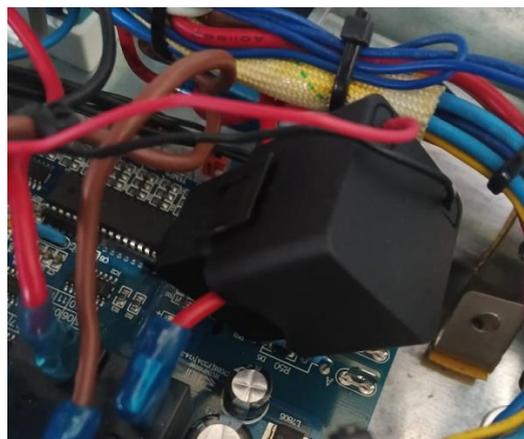


Figura 19. Montaje del sensor de corriente de pinza PZCT-02

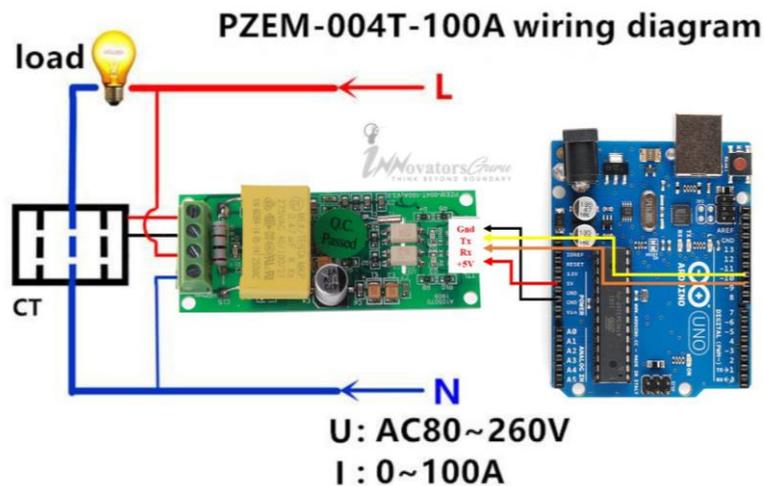


Figura 20. Diagrama de conexión del sensor de corriente de pinza

Todos los sensores antes mencionados tienen cables que son acoplados a los diferentes componentes electrónicos, es decir, una vez se han instalado en el equipo, para la toma de datos se deben acoplar uno a uno con sus diferentes módulos diseñados para transformar cada una de las señales y poder visualizarlos en la pantalla LCD acoplada al Arduino Mega utilizado.

2.4 Pruebas de funcionamiento finales y toma de datos

- Análisis de fallas presentadas

Durante la toma de mediciones se presenta el desajuste de las tuberías a los acoples del condensador de la bomba de calor, la principal causa es no introducir una longitud adecuada de la tubería en la conexión, para posteriormente ajustar adecuadamente los demás elementos para ajustar dicha tubería, esto evita que se presente el desajuste.

- Parámetros variables durante la medición

Para la toma de datos se establece que el tanque debe encontrarse lleno, mientras que la válvula de regulación de caudal se regula para que no ingrese un caudal excesivamente algo, sabiendo que el caudal máximo es de $25 \frac{l}{min}$, se cierra la válvula de regulación y se observa en una de las pantallas LCD que el caudal de trabajo se aproxime a $2 \frac{l}{min}$, siendo este la capacidad nominal de calentamiento de agua.

- Toma de datos

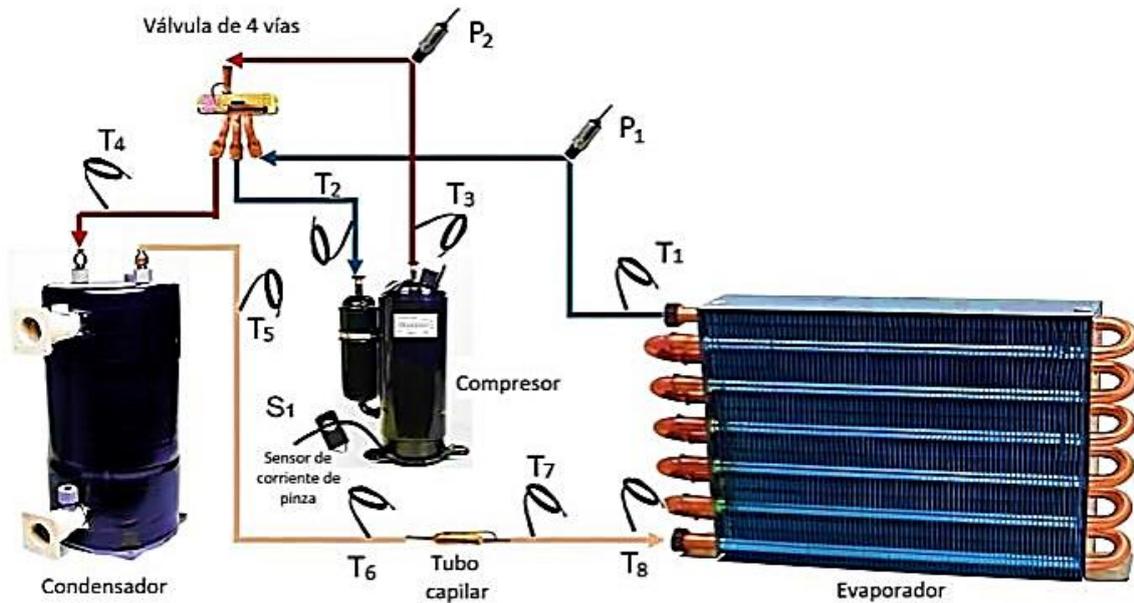


Figura 21. Distribución de sensores de temperatura, presión y corriente

Tabla 9. Descripción de las siglas y ubicación del sensor

Denominación	Descripción
T1	Temperatura a la salida del evaporador
T2	Temperatura de entrada al compresor
T3	Temperatura de salida del compresor
T4	Temperatura de entrada al condensador
T5	Temperatura de salida del condensador
T6	Temperatura de entrada al tubo capilar
T7	Temperatura de salida del tubo capilar
T8	Temperatura de entrada al evaporador
P1	Presión de baja – compresor
P2	Presión de alta – compresor
S1	Sensor de corriente de pinza

Una vez se han conectado los sensores de temperatura, presión, corriente y los cables que permiten medir el voltaje, se conecta la alimentación a la PCB, mediante un cable de transmisión de datos se conecta el Arduino Mega a un computador y se emplea la herramienta de Microsoft Excel, mediante la función para grabar y guardar los datos medidos, estos datos tienen un intervalo de medición de 1 segundo.

La toma de datos se realiza desde el momento antes del que la bomba de calor se encienda hasta que esta se apaga, sabiendo que la temperatura del agua ha alcanzado el valor deseado de consumo.

- Comunicación entre los sensores PT100 y los módulos MAX31865

La comunicación entre un sensor de este tipo y el módulo MAX31865 se toma lleva a cabo gracias a la comunicación SPI o *Serial Peripheral interface*”, misma que establece una eficiente comunicación entre el Arduino Mega y el conjunto PT100 – MAX31865.

- Proceso de toma datos

La comunicación entre el Arduino Mega y computador se establece gracias a un cable USB 2.0 que en uno de sus extremos es un cable USB tipo B y en el otro es un cable con un conector tipo A.

A continuación se detallan los pasos a seguir para observar y guardar los datos de interés.

1. Asegurarse que todos los sensores se encuentran correctamente conectados
2. Energizar el Arduino Mega, ya sea con su propio cargador o con ayuda del cable USB 2.0.
3. Visualizar que todos los datos de temperatura y presión se encuentren proyectados en la pantalla LCD, los datos eléctricos y de potencia no aparecerán hasta que la bomba de calor se ha encendido.
4. Accionar la puesta en marcha de todo el sistema (Bomba de calor – bomba de recirculación) con ayuda del Breaker.
5. Una vez la bomba de calor empieza a trabajar se observa que los datos de corriente, voltaje, potencia y fp empiezan a proyectarse en la pantalla.
6. Abrir Microsoft Excel y verificar si tienen instalado el complemento “Transmisor Datos” o “Data Streamer” en la baja de opciones.

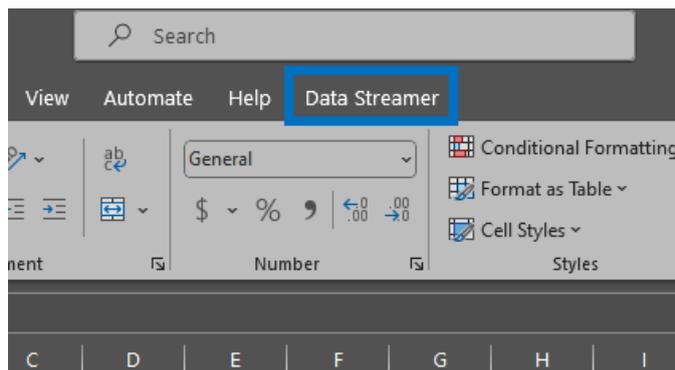


Figura 22. Complemento de Excel **Fuente:** Autor

7. Habiendo entrado en esa opción aparece un ícono en forma de terminal USB, ese ícono establece la conexión y transmisión de datos entre ambos equipos.



Figura 23. Icono para establecer la conexión Arduino Mega – Computadora **Fuente:** Autor

8. Para empezar a grabar los datos es fundamental inicializar las mediciones e inicializar el registro de los datos, para ello se pulsan en los iconos “Start Data” y Record Data”.

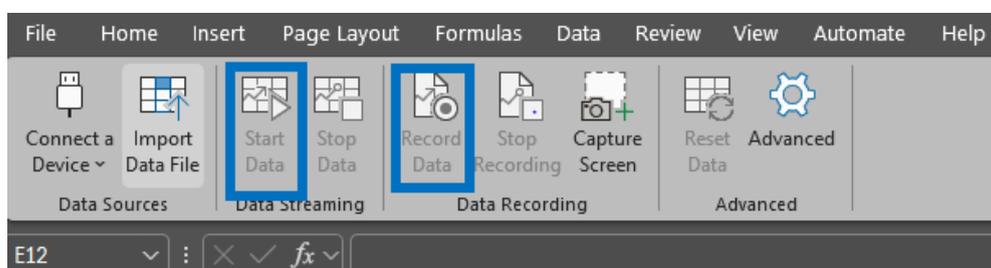


Figura 24. Iconos para inicializar la toma de datos **Fuente:** Autor

9. Los datos se irán presentando en la pantalla conforme van siendo tomados, una vez el operario desea que la toma de datos sece, debe presionar el ícono “Stop

Recording”

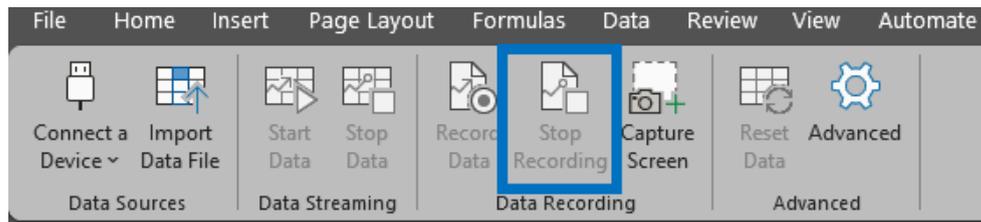


Figura 25. Icono para terminar el registro de los datos **Fuente:** Autor

10. Finalmente, aparece una pequeña pantalla de diálogo donde usted define la ubicación y en nombre del archivo.

- Código utilizado para la toma de datos

Inicialmente se debe cargar el programa al Arduino Mega, mismo que se encarga de proyectar toda la información medida por los diferentes sensores en la pantalla LCD. Primeramente, se detalla la funcionalidad del código en cada una de sus secciones.

```
#define RREF 430.0 // 430(PT-100) 4300(PT-1000)
#define RNOMINAL 100.0 // 100(PT-100) 1000(PT-1000)
```

En esta primera sección se define un par de constantes que se utilizan para la leer datos provenientes de un sensor de temperatura PT100 al usar el módulo MAX31865.

La primera constante tomada tiene un valor de 430.0 acompañado por la palabra RREF, que se relaciona con la resistencia de un sensor PT100 (430 ohmios).

La segunda constante que se observa tiene un valor de 100.0 acompañada por la palabra RNOMINAL y en este caso se relaciona con la resistencia del sensor a una temperatura de 0 °C (100 ohmios).

```
#if !defined(PZEM_RX_PIN) && !defined(PZEM_TX_PIN)
#define PZEM_RX_PIN 14 //Pin TX3 Arduino Mega
#define PZEM_TX_PIN 15 //Pin RX3 Arduino Mega
#endif
```

Las cuatro líneas de código presentadas en la parte superior permiten definir los pines del Arduino Mega que van a ser empleados para llevar a cabo la medición de los datos de carácter eléctrico, en el primer caso se utiliza el pin TX3 (14) y en el segundo el pin RX3 (15).

```
#if !defined(PZEM_SERIAL)
#define PZEM_SERIAL Serial3
#endif
```

En esta parte del código se establece que se lleve a cabo la conexión establecida entre el Arduino Mega y el módulo PZEM-004T de forma eficiente. La primera y segunda línea de esta sección del código verifica que “PZEM_SERIAL” se encuentre definida, de no ser así la segunda línea se ejecuta. Una vez esto se cumple se le asigna un puerto serial del Arduino Mega que se encuentra libre, en este caso es el “Serial3”.

```
#if defined(ESP32)
```

Aquí se verifica si ESP23 se encuentra definido, de no ser así se ejecutará, el tener esta línea de código antepone que las siguientes líneas de código vas a establecer una interfaz con un microcontrolador ESP32.

```
PZEM004Tv30 pzem(PZEM_SERIAL, PZEM_RX_PIN, PZEM_TX_PIN);
#elif defined(ESP8266)
#else
PZEM004Tv30 pzem(PZEM_SERIAL);
#endif
```

La primera línea tiene la palabra PZEM004Tv30, por si sola se define como una clase que tiene como propósito interactuar con el módulo PZEM-004T, aquí se comprueba que el código en su globalidad se adapta a trabajar con un microcontrolador ESP32 o también con un ESP8266.

La primera línea en su totalidad establece que te toma un puerto serial y también los pines RX y TX del Arduino Mega para poder establecer comunicación con el módulo PZEM-004T.

La segunda línea de esta sección del código hace que ejecute el preprocesador en caso de que se esté empleando un ESP8266.

Las últimas tres líneas de código hacen válido para el funcionamiento únicamente al puerto serial, dejando de lado los pines RX y TX.

```
Adafruit_MAX31865 thermo1 = Adafruit_MAX31865(23);
Adafruit_MAX31865 thermo2 = Adafruit_MAX31865(25);
Adafruit_MAX31865 thermo3 = Adafruit_MAX31865(27);
Adafruit_MAX31865 thermo4 = Adafruit_MAX31865(35);
Adafruit_MAX31865 thermo5 = Adafruit_MAX31865(29);
Adafruit_MAX31865 thermo6 = Adafruit_MAX31865(31);
```

```
Adafruit_MAX31865 thermo7 = Adafruit_MAX31865(33);
Adafruit_MAX31865 thermo8 = Adafruit_MAX31865(37);
```

Todas estas líneas de código emplean el comando Adafruit_MAX31865, mismo que sirve para establecer una comunicación con los sensores de temperatura RTD, los sensores PT100 pertenecen a este grupo, y el módulo MAX31865. Cada uno de los números entre paréntesis de la derecha son el número de pin al que se encuentra conectado el sensor.

```
float temp1=0;
float temp2=0;
float temp3=0;
float temp4=0;
float temp5=0;
float temp6=0;
float temp7=0;
float temp8=0;
int valor1 = 0;
float voltaje1 = 0;
float presion1 = 0;
int valor2 = 0;
float voltaje2 = 0;
float presion2 = 0;
```

Este fragmento del código se encarga de declarar variables, mismas que van a almacenar todas las mediciones realizadas con los diferentes sensores utilizados.

```
void setup(void)
{
  Serial.begin(9600);
  uint16_t ID = tft.readID();
  if (ID == 0xD3D3) ID = 0x9486;
  tft.reset();
  tft.begin(ID);
  tft.setRotation(1);
  delay(1000);
}
```

Serial.begin(9600) establece la velocidad en baudios con la que se lleva a cabo la comunicación serie, dicha magnitud permite que el Arduino y la computadora puedan enviar y recibir datos. La función de las demás líneas se encuentra escrita en forma de comentario a la derecha.

```

tft.fillScreen(BLACK); /*Impresión de las variables físicas y eléctricas*/
tft.setRotation(1);
tft.setTextSize(2);
tft.fillScreen(BLACK);
tft.setTextColor(WHITE);
tft.fillRect(0,0,220,40,BLUE);
tft.setCursor(30,10);
tft.print("TEMPERATURAS");
tft.fillRect(220,0,280,40,RED);
tft.setCursor(235,10);
tft.print("VARIABLES ELECTRICAS");
tft.fillRect(220,170,280,40,GRAY);
tft.setCursor(235,180);
tft.print("PRESIONES");
tft.setCursor(0,50);
tft.println("Temp 1=\n");
tft.println("Temp 2=\n");
tft.println("Temp 3=\n");
tft.println("Temp 4=\n");
tft.println("Temp 5=\n");
tft.println("Temp 6=\n");
tft.println("Temp 7=\n");
tft.println("Temp 8=\n");
tft.setCursor(240,230);
tft.println("Palta=\n");
tft.setCursor(240,260);
tft.println("Pbaja=\n");

tft.setCursor(240,50);
tft.println("Voltaje=\n");
tft.setCursor(240,80);
tft.println("Corriente=\n");
tft.setCursor(240,110);
tft.println("Potencia=\n");
tft.setCursor(240,145);
tft.println("fp=\n");

```

Con todos los comandos de la sección del código mostrada en la parte superior se imprimen todos los datos de las variables de temperatura y eléctricas que se buscan, también se especifica la posición de cada uno de los datos dentro de la pantalla.

```

thermo1.begin(MAX31865_2WIRE);
thermo2.begin(MAX31865_2WIRE);
thermo3.begin(MAX31865_2WIRE);
thermo4.begin(MAX31865_2WIRE);
thermo5.begin(MAX31865_2WIRE);
thermo6.begin(MAX31865_2WIRE);

```

```
thermo7.begin(MAX31865_2WIRE);
thermo8.begin(MAX31865_2WIRE);
```

MAX31865_2WIRE cumple la función de indicar que el sensor PT100 funciona con 2 hilos.

```
valor1 = analogRead(A7);
voltaje1 = (valor1 * 5.00) / 1023.00;
presion1 = (voltaje1*129.9589603)-60.45143639;
valor2 = analogRead(A6);
voltaje2 = (valor2 * 5.00) / 1023.00;
presion2 = (voltaje2*124.671916)-58.79265092;
```

Aquí se lleva a cabo la conversión y calibración de las señales de presión de alta y de baja.

```
temp1=(thermo1.temperature(RNOMINAL, RREF)+3.38);
temp2=(thermo2.temperature(RNOMINAL, RREF)-9.09);
temp3=(thermo3.temperature(RNOMINAL, RREF)-11.85);
temp4=(thermo4.temperature(RNOMINAL, RREF)-17.81);
temp5=(thermo5.temperature(RNOMINAL, RREF)-0.05);
temp6=(thermo6.temperature(RNOMINAL, RREF)-2.75);
temp7=(thermo7.temperature(RNOMINAL, RREF)-13.64);
temp8=(thermo8.temperature(RNOMINAL, RREF)-5.3);
```

Cada una de las líneas de esta sección del código ajusta las lecturas de temperatura obtenidas por los PT100, corrigiendo las desviaciones que existen empleando un PENTA, llegando a establecer el menor error posible entre ambas mediciones.

```
float voltage = pzem.voltage();
float current = pzem.current();
float power = pzem.power();
float pf = pzem.pf();
```

Esta sección permite leer y almacenar valores de energía provenientes del PZEM-004T.

```
tft.setCursor(85,50);
tft.setTextColor(WHITE, BLACK);
tft.print(temp1,2);
tft.setCursor(170,50);
tft.print("[C]");
```

Esta sección del código se repite 8 veces, debida a que se toman 8 mediciones de temperatura, aquí se especifica la ubicación del dato, el color en el que se va a visualizar

y también sus unidades.

```
tft.setCursor(340,230);  
tft.setTextColor(WHITE, BLACK);  
tft.print(presion2,2);  
tft.setCursor(420,230);  
tft.print("[psi]");
```

Siguiendo el mismo criterio antes planteado, aquí en cambio se presentan las mediciones de presión, en este caso esto se repite 2 veces al solo tener la presión de alta y de baja.

```
tft.setCursor(345,50);  
tft.setTextColor(WHITE, BLACK);  
tft.print(voltage,2);  
tft.setCursor(435,50);  
tft.print("[V]");
```

Finalmente, los otros datos que se van a proyectar son los eléctricos, voltaje, corriente, potencia y fp respectivamente.

```
Serial.print(temp1);  
Serial.print(", ");  
Serial.print(voltage);  
Serial.print(", ");  
Serial.print(current);  
Serial.print(", ");  
Serial.print(presion1);  
Serial.print(", ");
```

Esta última sección del código establece la forma en la que el programa del computador va a recibir los datos, mismos que van a encontrarse separados por un ",". Primero se imprimen todas las temperaturas, luego el voltaje y corriente y finalmente los datos de presión obtenidos.

```
delay(1000);
```

Esta línea establece que se toman datos cada 1 segundo.

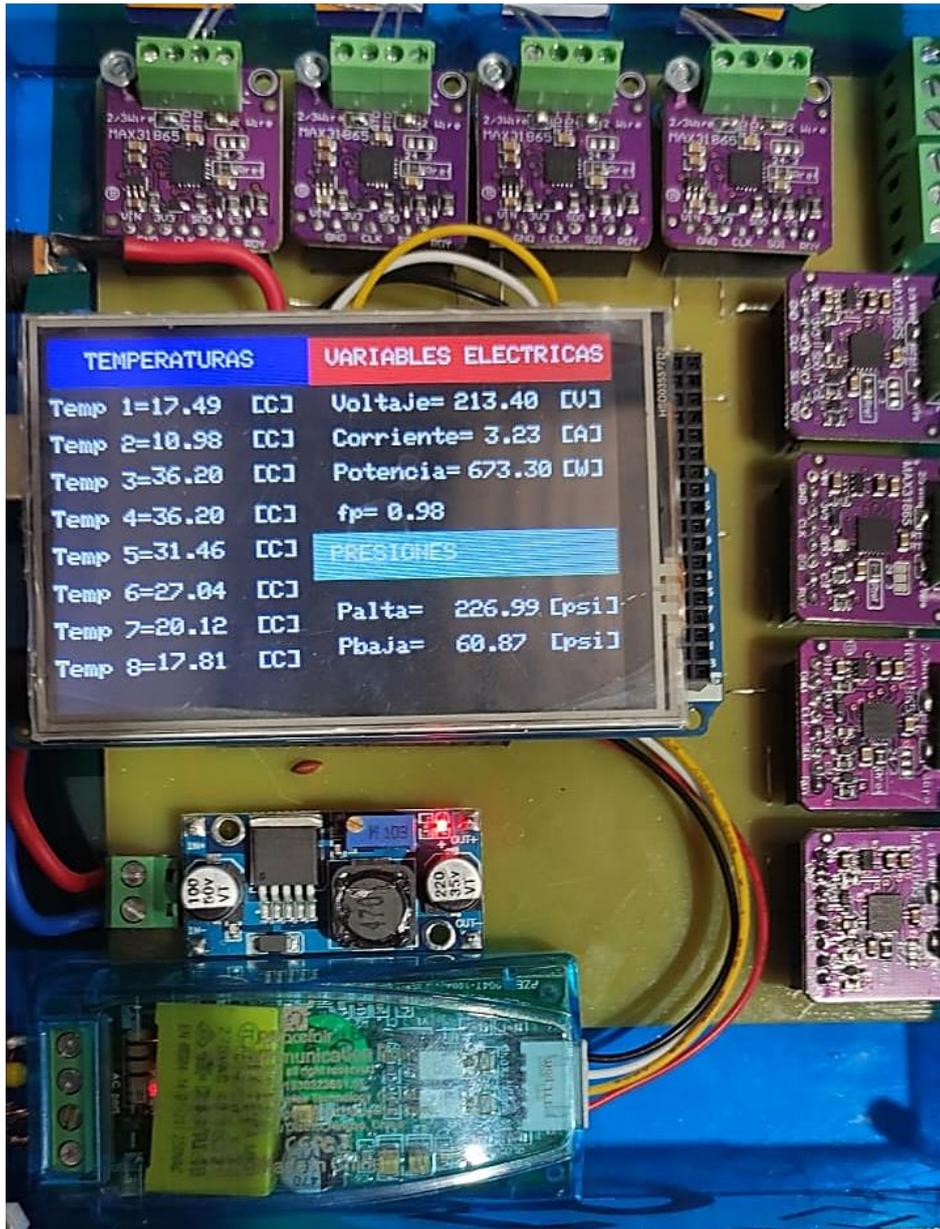


Figura 26. Distribución de los datos en la pantalla LCD

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.2 Resultados

Las Figuras presentadas a continuación muestran el comportamiento de la temperatura medida en cada uno de los puntos dentro de la bomba de calor, a continuación, se especifica el lugar en donde se realiza la medición con ayuda del sensor PT100. En esta sección se debe recordar algunos detalles del funcionamiento del equipo:

- El compresor de la bomba de calor no se enciende mientras el caudal de agua sea el necesario.
- Mientras el compresor permanece apagado, la presión de baja es ligeramente mayor al de alta.

Al tomar en cuenta las dos aclaraciones se puede comprender el comportamiento de las curvas de temperatura antes de que el compresor se encienda, es decir, todos los componentes que se encuentran después de la salida del tubo capilar y compresor, que trabajan en la línea de baja presión, tienen una temperatura inicial alta y una vez se enciende el compresor dicha temperatura disminuye drásticamente dentro de sus rangos normales de medición en pleno funcionamiento. Sucede lo contrario con los elementos que se encuentran entre la salida del compresor y entrada del tubo capilar, todos ellos aumentan su temperatura de trabajo, esto debido a que en esa sección se encuentra el condensador, lugar en el cual se lleva a cabo el calentamiento de agua.

Conforme el proceso de recirculación de agua se lleva a cabo existe una menor transferencia de energía al agua conforme pasa el tiempo, esto se debe a que el gradiente de temperatura entre ambos fluidos se ve reducido. Es durante ese proceso que el fluido a la salida del compresor debe encontrarse a una temperatura mayor que la seteada para consumo siempre, de no ser así se le va a quitar la energía ganada al agua. En la Figura se observa un continuo crecimiento en la temperatura a la salida del compresor siendo esta al final del proceso mayor a la seteada en el controlador del equipo.

Temperatura 1

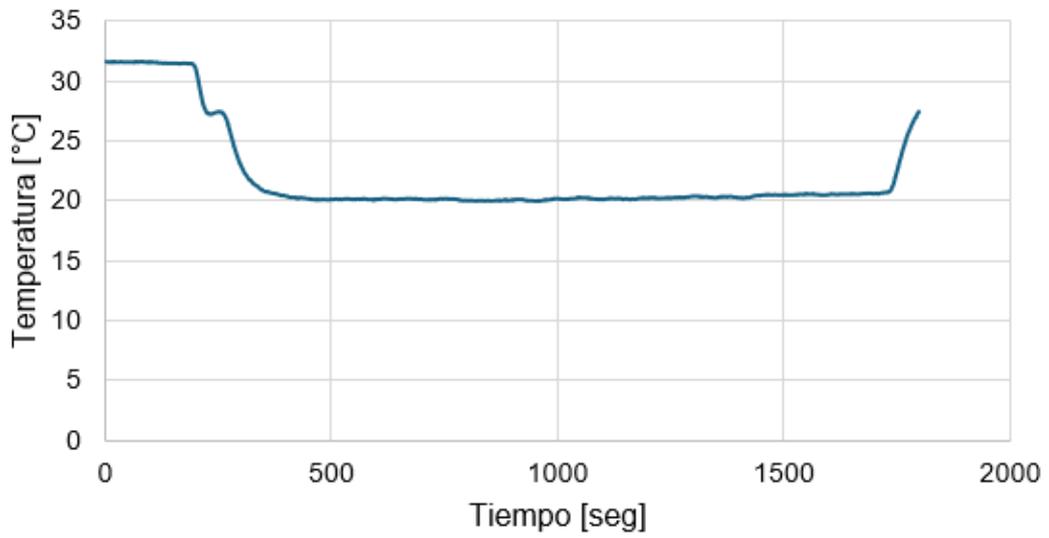


Figura 27. Temperatura a la salida del evaporador

Temperatura 2

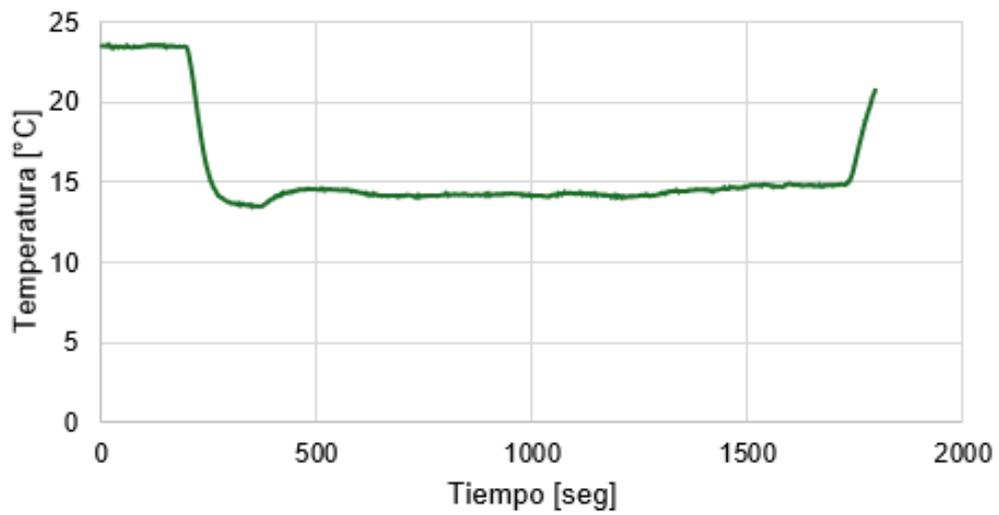


Figura 28. Temperatura a la entrada del compresor

Temperatura 3

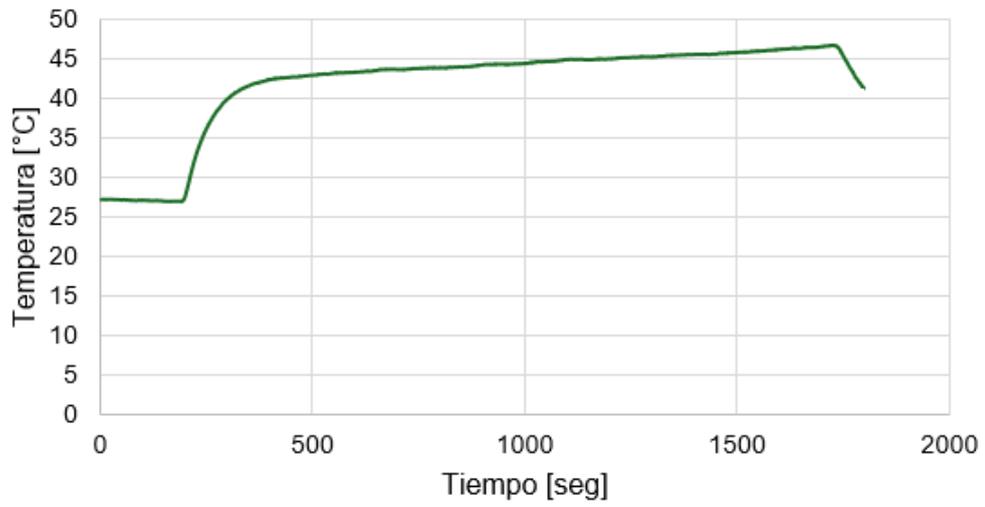


Figura 29. Temperatura a la salida del compresor

Temperatura 4

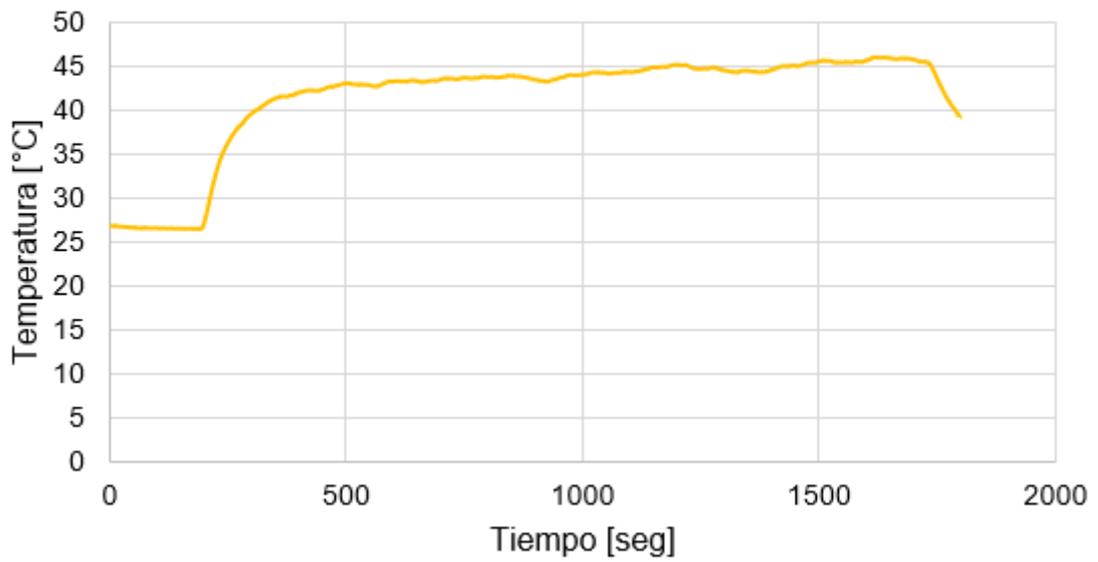


Figura 30. Temperatura a la entrada del condensador

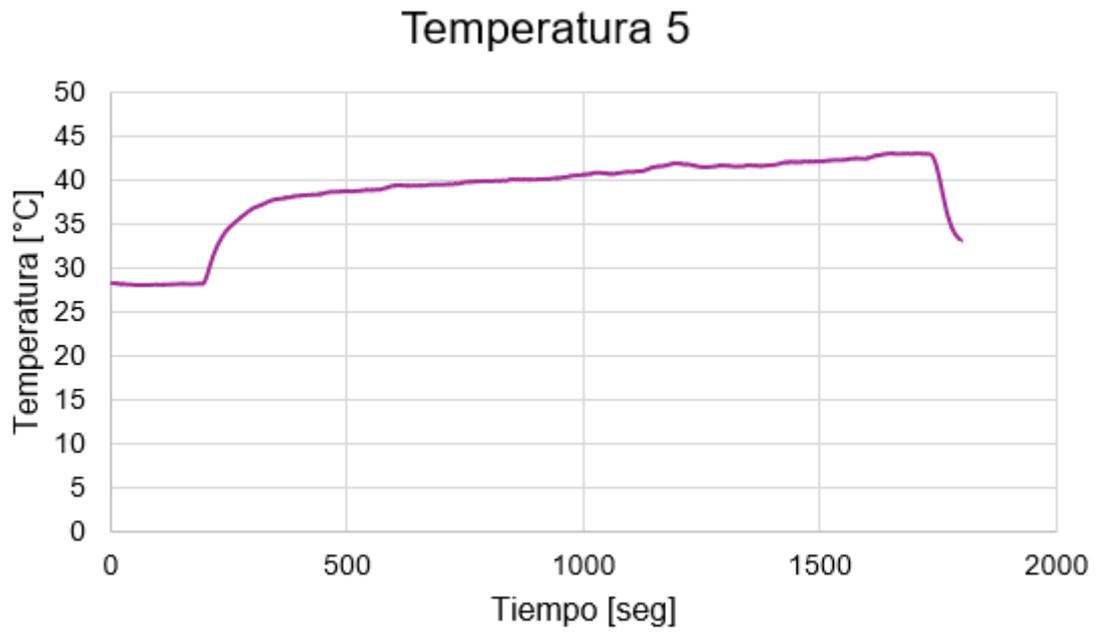


Figura 31. Temperatura a la salida del condensador

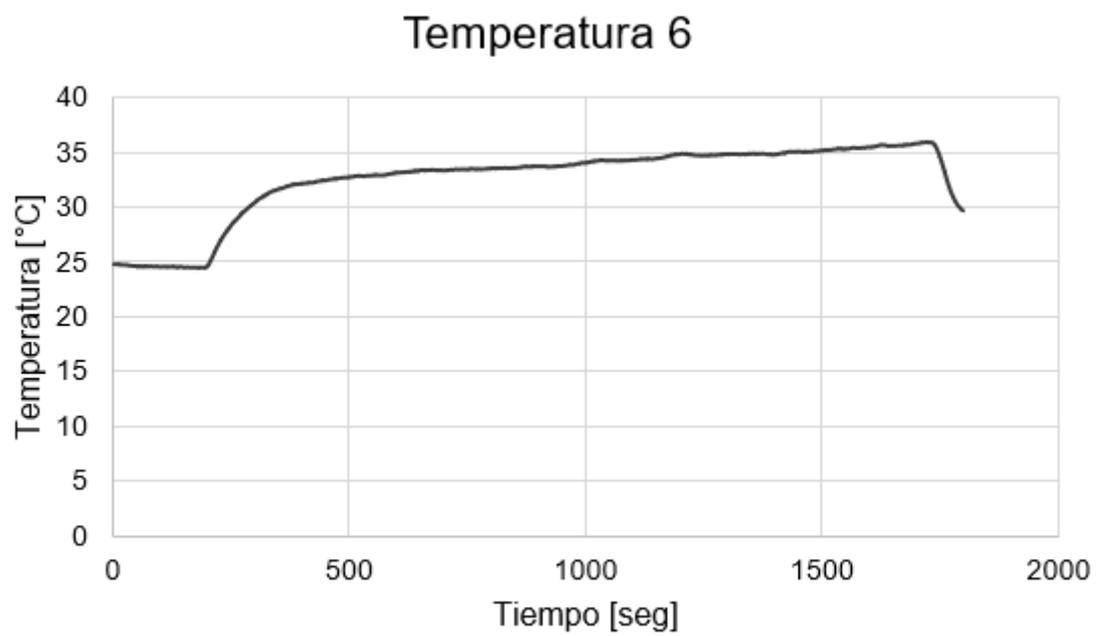


Figura 32. Temperatura a la entrada del tubo capilar

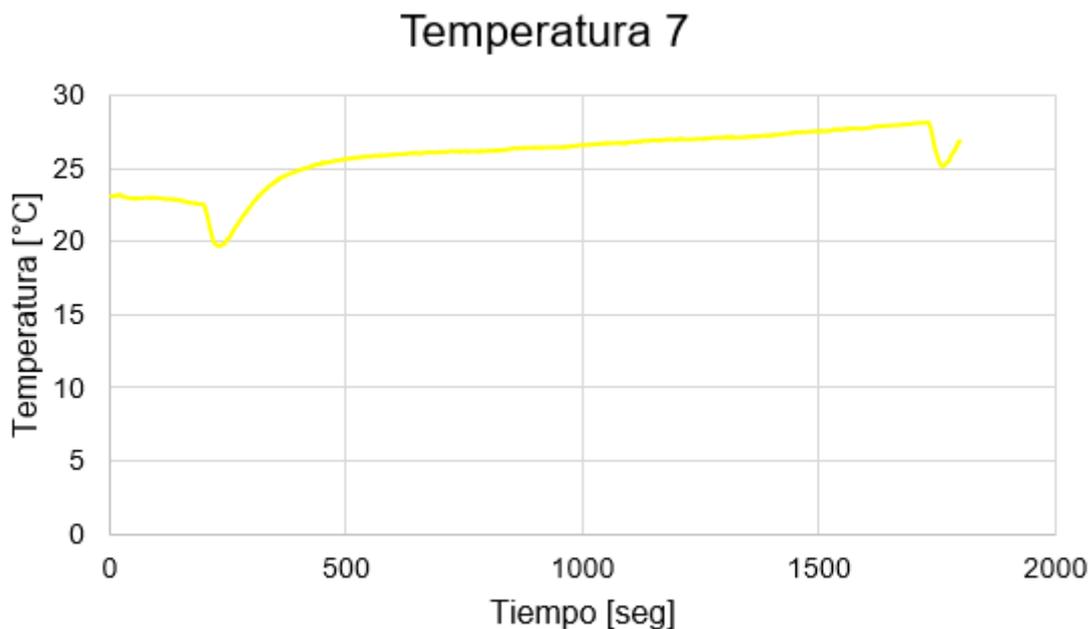


Figura 33. Temperatura a la salida del tubo capilar

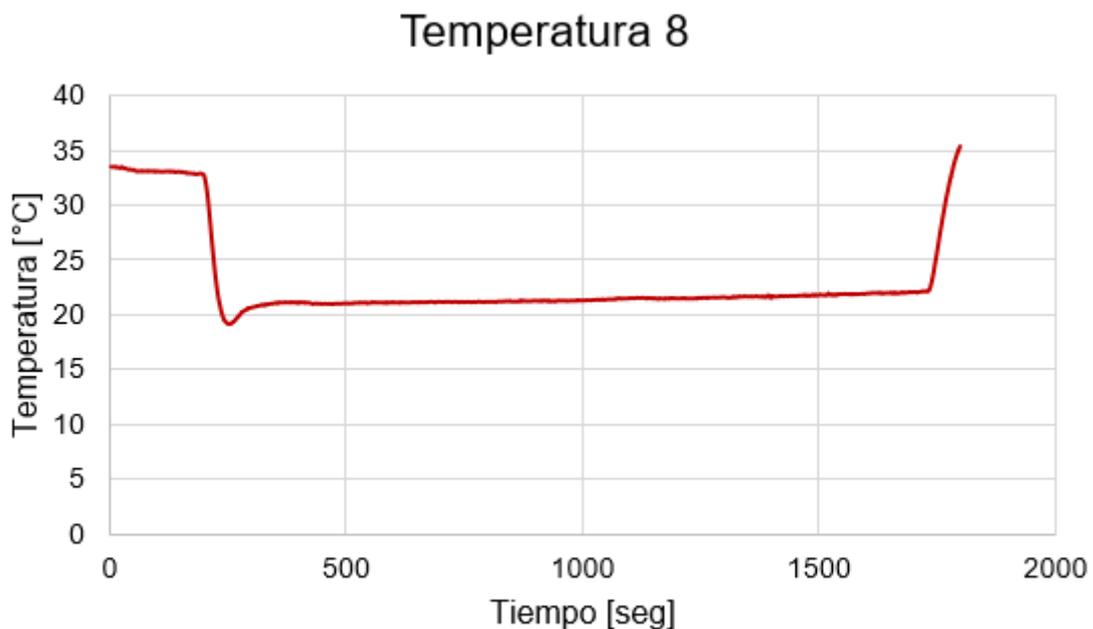


Figura 34. Temperatura a la entrada del evaporador

Las Figuras muestran la variación de presión dentro de la línea de alta y baja, como se mencionó en un inicio la línea de baja tiene una magnitud ligeramente mayor a la de alta antes de que se encienda el compresor, una vez el compresor se enciende dicha presión baja bruscamente, mientras que la presión de alta crece rápidamente hasta que ambas llegan a estabilizarse. Una vez el equipo ha dejado de trabajar y el compresor se apaga, las presiones de alta y baja retoman sus valores iniciales.

Presión de baja

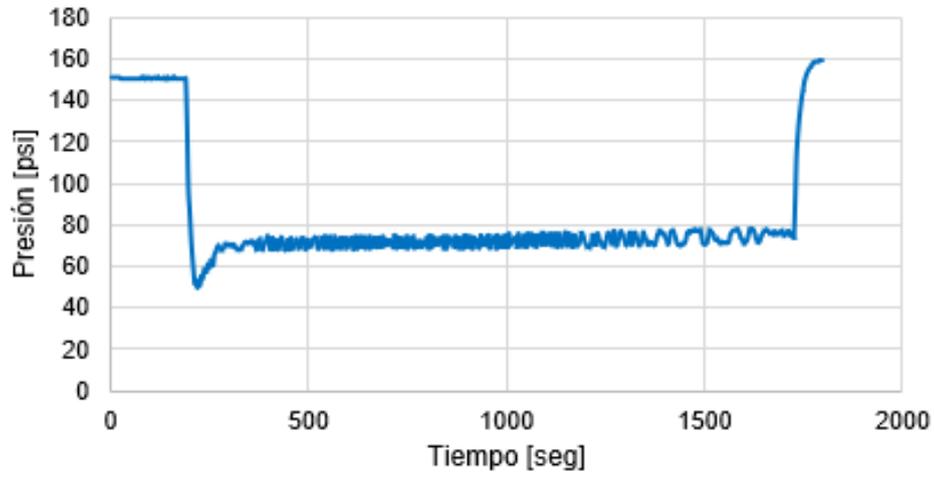


Figura 35. Presión medida en la línea de baja

Presión de alta

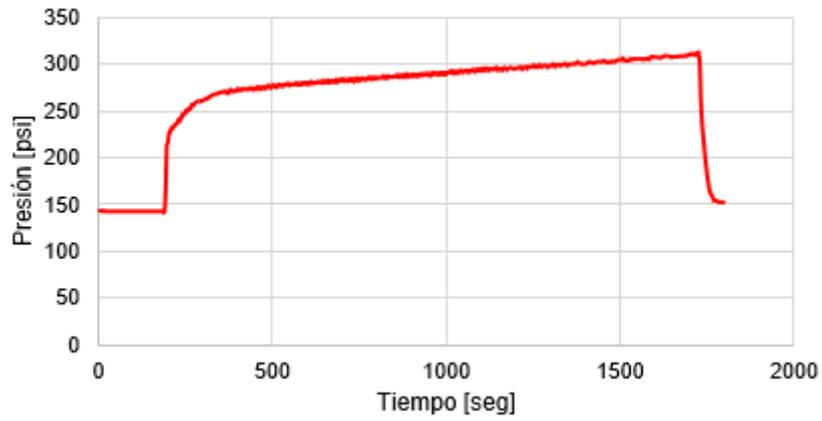


Figura 36. Presión medida en la línea de alta

Presión de alta

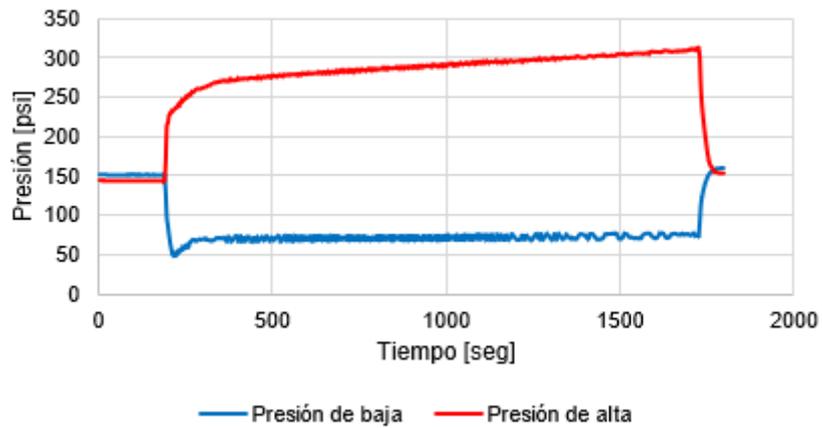


Figura 37. Interpolación de las curvas de presión

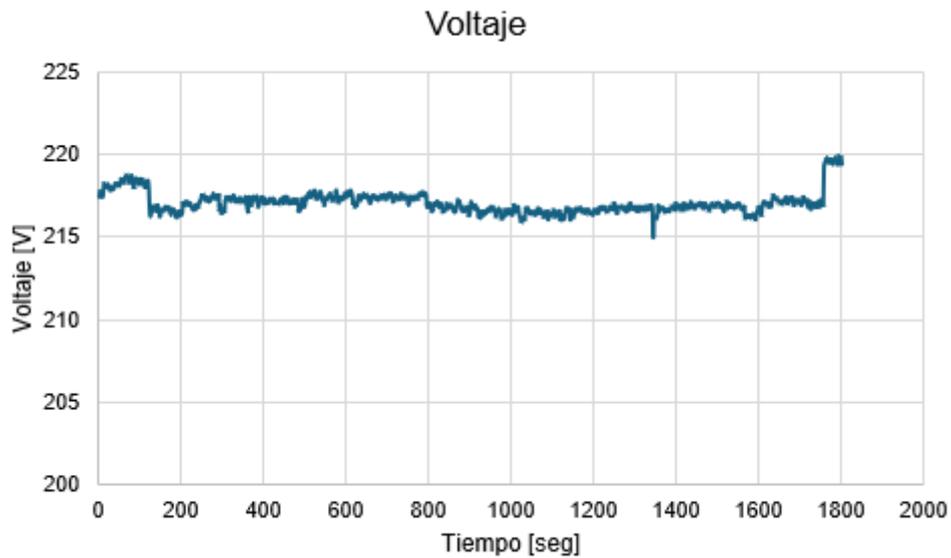


Figura 38. Mediciones de voltaje de las líneas de alimentación del equipo

En la Figura se observa la variación de voltaje que sucede en la bomba de calor antes, durante y después del encendido, lo primero a tomar en cuenta es que, antes de que se encienda e inmediatamente luego de apagarse su voltaje es mayor al medido durante todo su tiempo de trabajo. Esto se explica debido al arranque y apagado del compresor, mismo que genera picos de consumo de corriente al encenderse y apagarse, al momento del encendido se necesita suministrar una alta corriente a la bomba, mientras que al apagarse y no consumir corriente el voltaje en el equipo aumenta instantáneamente y se estabiliza.

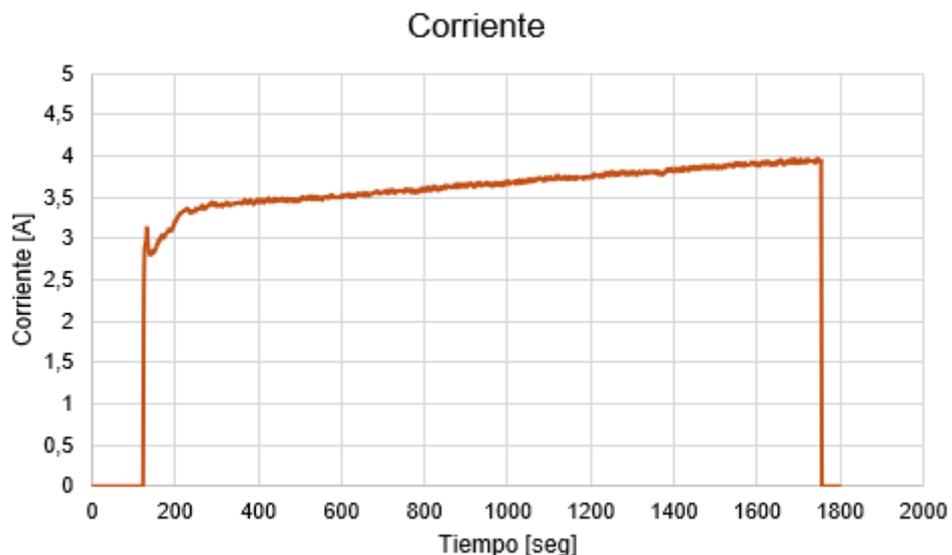


Figura 39. Consumo de corriente del equipo

Como se mencionó en la Figura, siempre que el compresor se encienda o apague va a experimentar picos alto y bajo consumo de corriente respectivamente. Durante el proceso de calentamiento se observa un crecimiento paulatino del consumo de energía eléctrica, conforme el agua se va calentando es necesario mantener una diferencia de temperatura que permita llevar a cabo la transferencia de energía desde el condensador hacia el agua, es por ello por lo que el compresor debe trabajar en mayor medida para suplir esa condición de trabajo. A partir de un criterio más formal, se busca que la eficiencia de la bomba de calor sea la mayor posible, sabiendo que este valor depende directamente del Coeficiente de Rendimiento (COP) y a su vez este depende de las temperaturas de funcionamiento y del trabajo del compresor, a medida que el agua empieza a calentarse le es más difícil al equipo entregarle energía al agua, y por tanto el COP empieza a disminuir, para que el proceso siga trabajando como se desea el compresor debe trabajar más, y por tanto, su consumo de corriente también aumenta.

3.3 Conclusiones

El proceso de recirculación de agua se encuentra ligado a la capacidad de la bomba, y el tiempo de calentamiento es directamente proporcional a este. Con ello se establece que si el caudal es muy alto el tiempo necesario para calentar el volumen de agua deseado también se incrementa, por el contrario, si el caudal que suministra la bomba es bajo pero superior al mínimo requerido, el tiempo necesario para calentar el mismo volumen de agua se reduce. Esta es la razón principal por la que se ha instalado una válvula para la regulación de caudal a la salida de la bomba de agua.

Una vez se han instalado los sensores de temperatura, es primordial no reducir su longitud, esto debido a que los datos tomados con un sensor recortado van a ser diferentes que los tomados con un sensor intacto, las mediciones se toman en función de la resistencia, al cortar los cables la resistencia del elemento disminuye, y por ende la medición pierde confiabilidad y exactitud.

Al no tener polaridad, los cables de los sensores PT100 pueden conectarse a las borneras soldadas de los módulos MAX31865 sin problema, sin embargo, se debe verificar que todos los pequeños cables de platino han ingresado a la bornera, esto debido a que las mediciones dependen de la resistencia eléctrica que otorga todos esos pequeños cables, un caso aparte son los cables del transductor de presión, este posee tres cables y deben conectarse correctamente para no hacer toma de datos incorrecta o en defecto dañar el elemento.

Luego de instalar los transductores de presión se debe verificar que no existen fugas de refrigerante y que no se presentan obstrucciones dentro de la tubería, si no se confía en los

datos medidos por los sensores, la forma más fácil de verificar que se encuentran trabajando en los parámetros adecuado es conociendo de antemano el rango de funcionamiento de la presión (máximos y mínimos), teniendo en cuenta el tipo de refrigerante utilizado y el rango de temperatura en el que se va a trabajar.

El comportamiento de las curvas de temperatura ligados a cada punto de medición tiene una relación directa al proceso que se lleva a cabo antes de ese punto de medición, es decir, al realizar la medición de la temperatura 3, misma que se establece a la salida del compresor, se observa un aumento paulatino de la temperatura, esto debido a que el propósito del compresor es aumentar la presión y también aumentar la temperatura, en esta curva se tiene la mayor magnitud de temperatura de todo el sistema. Lo mismo sucede al comparar las Figuras 27 y 28, una es la curva obtenida antes de entrar al condensador, y la siguiente es la curva a la salida del condensador, sabiendo que dentro del condensador se lleva a cabo la transferencia de energía hacia el agua de consumo, es de esperarse que la temperatura de salida se haya reducido.

Al analizar las figuras de los parámetros eléctricos se puede observar que durante el funcionamiento del equipo no se presenta un aumento exagerado o picos en el consumo eléctrico más que en el arranque y apagado, llevar un registro del consumo le permite al operario saber si el equipo se encuentra trabajando dentro de un rango aceptable, evitando que el compresor sea sobre exigido y por tanto su tiempo de vida útil sea mayor. Incluso este parámetro permite establecer cuando es necesario llevar a cabo un mantenimiento preventivo de toda la bomba de calor.

3.4 Recomendaciones

Teniendo presente que todo el circuito de tuberías por donde pasa el agua de recirculación se encuentra sometido a una alta presión, se recomienda revisar periódicamente las conexiones y para el caso de la bomba de calor los empaques de caucho, estos sufren deterioro y con el tiempo ya no cumplen con un ajuste óptimo y, por tanto, la tubería llegar a desacoplarse de la conexión al condensador.

En caso de adquirir equipos que trabajan con un voltaje mayor al proporcionado en la red, la conexión eléctrica debe llevarse a cabo por una persona con los debidos conocimientos y una correcta capacitación. Dado que la bomba de calor no cuenta con su propia bomba de recirculación, pero si cuenta con un sistema para controlar su encendido y apagado, se debe verificar que la bomba de recirculación adquirida trabaje al voltaje del equipo, de no ser el caso se debe utilizar componentes eléctricos que permitan acoplar de forma segura la nueva bomba

al controlador del equipo.

Una vez se ha realizado la toma de datos, se recomienda drenar toda el agua almacenada dentro del tanque y añadir nueva desde la red, esto tiene como finalidad reducir el tiempo de enfriamiento del agua que se encuentra dentro de las tuberías y equipo para llevar a cabo un nuevo proceso de toma de datos.

Al tener todos los sensores de temperatura PT100, es de vital importancia cuidar los cables, estos no pueden estar expuestos a las tuberías que alcanzan temperaturas, la principal razón es que, al estar recubiertos de un plástico muy fino, este se malogrará de forma acelerada, en el peor de los casos incluso los pequeños cables pueden quedar expuestos, esto conlleva un nuevo factor que vuelve a los datos tomados como poco confiables.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Guamán, D. Guevara y A. Ríos, «Evaluación del Impacto Económico en Diferentes Escenarios de Implementación de Tecnologías Eficientes de Calentamiento de Agua en el Ecuador,» *Revista Técnica “energía”,* pp. 270-283, 2016.
- [2] Anónimo, «ARISTON,» 28 01 2024. [En línea]. Available: <https://www.ariston.com/en-me/the-comfort-way/news/what-is-the-ideal-temperature-for-domestic-hot-water>. [Último acceso: 10 07 2024].
- [3] ASHRAE, «Service Water Heating,» de *American Society oh Heating, Heating, Ventilating, and Air Conditioning Applications,* Atlanta, 2011.
- [4] P. Espiñeira, «caloryfrio.com,» 06 04 2022. [En línea]. Available: <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor.html#como-funciona>. [Último acceso: 10 07 2024].
- [5] M. García, «International Business School,» 26 10 2020. [En línea]. Available: <https://eiposgrados.com/blog-ingenieros/valvula-de-4-vias/#:~:text=La%20v%C3%A1lvula%20de%204%20v%C3%ADas,calefacci%C3%B3n%20o%20en%20modo%20refrigeraci%C3%B3n..> [Último acceso: 11 07 2024].
- [6] D. Ibañez, «frionline,» [En línea]. Available: <https://www.frionline.net/articulos-tecnicos/123-el-uso-de-r417a-en-refrigeracion-y-aire-acondicionado.html>. [Último acceso: 12 07 2024].
- [7] Anónimo, «Ontrose Industrial Corporation Inc,» 11 01 2024. [En línea]. Available: <https://ontarose.com/pt100-sensors>. [Último acceso: 12 07 2024].
- [8] «ICMASTER,» [En línea]. Available: <https://icmasteronline.com/product/pt100-temperature-probe-with-platinum-resistance-200c-to-500c/>. [Último acceso: 13 07 2024].
- [9] «FullGauge,» 03 06 2024. [En línea]. Available: https://fullgauge-strapiproduct-media-f340da7.s3.sa-east-1.amazonaws.com/SB_69_100_V_Wika_ing_e5249b6f8e.pdf. [Último acceso: 14 07 2024].
- [10] «Electronilab,» 02 07 2024. [En línea]. Available: <https://electronilab.co/tienda/medidor-de-energia-potencia-voltaje-corriente-pzem-004t-uart/#:~:text=El%20modulo%20de%20medidor%20multi-funci%C3%B3n%20PZEM-004T%20permite%20medir,disponible%20para%20eta%20aplicaci%C3%B3n%29%20o%20a%20un%20PLC..> [Último acceso: 15 07 2024].
- [11] Anónimo, «SSDIELECT ELECTRONICA SAS,» [En línea]. Available: <https://ssdielect.com/magnitudes-electricas-1/2820-pzct-02.html>. [Último acceso: 16 07 2024].
- [12] «LEO,» [En línea]. Available: <http://www.leo-pumps.com/2-7-1-booster-pump.html>. [Último acceso: 14 07 2024].

- [13] M. Electronic, «Installation & User Instructions,» de *Air to Water Heat Pump*, Livingston, 2019, p. 9.
- [14] T.-C. G.-G. P.-S. Torres-Silva, «Análisis físico - químico e influencia de los minerales disueltos en el sabor del agua potable, de las principales plantas de tratamiento de Quito,» *ENFOQUE UTE*, vol. 11, nº 4, pp. 57-70, 2020.
- [15] «Simagas.es,» [En línea]. Available: https://www.simagas.es/pdf/gases_refrigernates/Ficha-tecnica-R417A--l59-.pdf. [Último acceso: 18 07 2024].

5 ANEXO

ANEXO 1

Se adjunta el código QR y enlace para acceder al código generado para la toma de datos del equipo



https://epnecuador-my.sharepoint.com/:t/g/personal/diego_enriquez01_epn_edu_ec/Ed9_QVxIC6pMkB9H8cXNw-egBTtBv16e1WWVaSOR823eAQg?e=BUOJ4j

ANEXO 2

Se adjunta el código QR y enlace para acceder a la base de datos de las mediciones de temperatura, presión, voltaje y corriente.



https://epnecuador-my.sharepoint.com/:x/g/personal/diego_enriquez01_epn_edu_ec/EQKPzGBEsWVMhKv5L3jZvS8BI5kYpc55mBaQ38NbPz3bhg?e=0xl6PG

ANEXO 3

Se adjunta el esquema de distribución de las conexiones dentro del circuito.

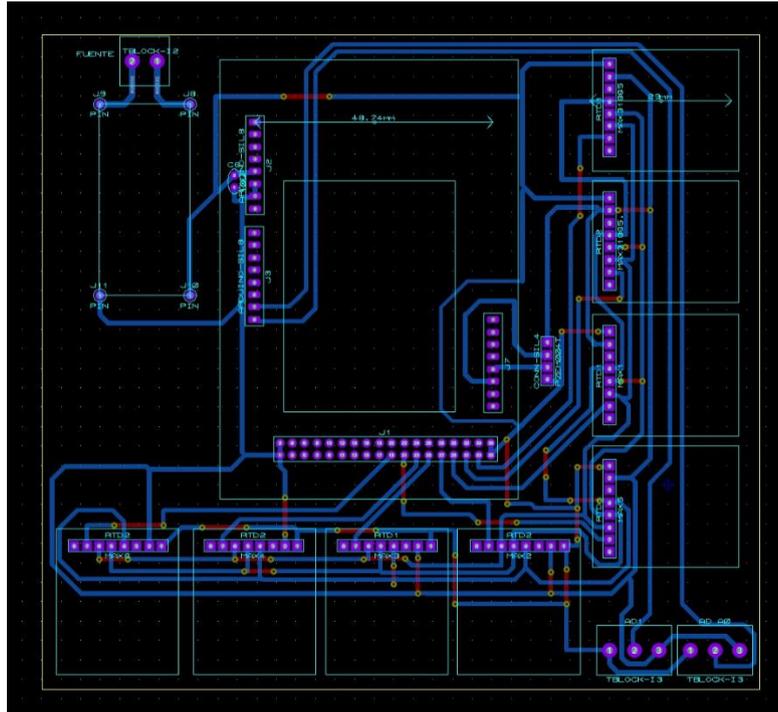


Figura 40. Diagrama del circuito

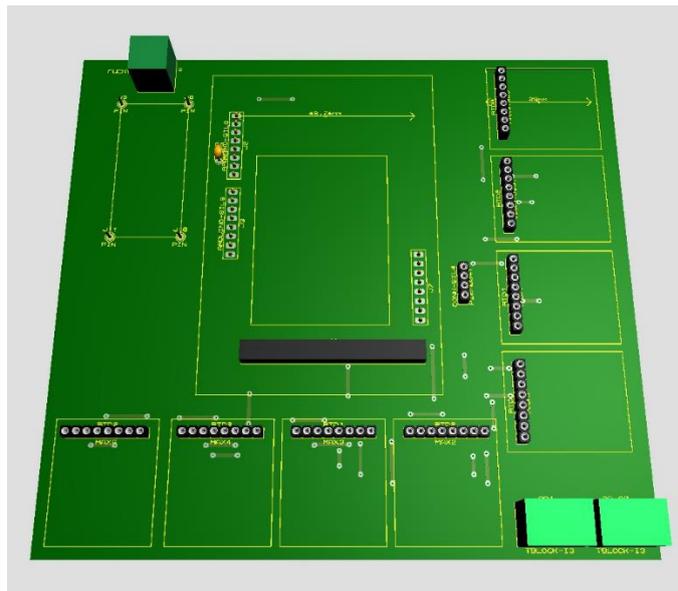


Figura 41. Visualización 3D del diagrama del circuito