

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO TIPO SPLIT DE REFRIGERANTE R290

SISTEMA DE MONITOREO CON ARDUINO MEGA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO SUPERIOR EN ELECTROMECAÁNICA

CRISTIAN EDUARDO GUERRERO PULUPA

DIRECTOR: ING. HUGO FRANCISCO ZÚÑIGA PUEBLA, MSC.

DMQ, Septiembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, CRISTIAN EDUARDO GUERRERO PULUPA 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.

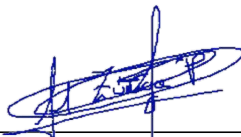


CRISTIAN EDUARDO GUERRERO PULUPA

cristian.guerrero01@epn.edu.ec

crisedu2000@outlook.com

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por CRISTIAN EDUARDO GUERRERO PULUPA, bajo mi supervisión.



Ing. Hugo Francisco Zúñiga Puebla MSc.

DIRECTOR

hugo.zuniga@epn.edu.ec

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmo que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante 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.



CRISTIAN EDUARDO GUERRERO PULUPA

DEDICATORIA

Dedicó este logro a mi difunto abuelito Vicente Pulupa, quien desde siempre me cuidó y abrió las puertas de su casa durante mi infancia y adolescencia.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi padre y madre quienes con su experiencia y consejos me guiaron y brindaron la oportunidad de continuar mis estudios; a mi hermana por su ayuda y regalos, a mis amigos del Club de Robótica que se volvieron mi familia, quienes con sus ocurrencias y locuras hicieron divertida esta etapa de mi vida.

El presente proyecto ha sido financiado por ONUDI y está enmarcado en el convenio: número 21 016 suscrito entre la Escuela Politécnica Nacional y el Ministerio de Producción.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo General.....	2
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
Ciclo de refrigeración.....	3
Aire acondicionado tipo Split.....	4
Variables termodinámicas.....	5
Potencia eléctrica	5
Sistema embebido	6
Arduino	6
Sensores modulares.....	8
Termopar tipo K.....	8
Compensación de unión fría	9
Acondicionamiento de sensores	9
Placa de circuito impreso.....	9
Pantalla de cristal liquido	10
2 METODOLOGÍA	11
2.1 Requerimientos técnicos.....	13
Aire acondicionado Split	13

Sensores a instalar en el equipo Split	13
Requerimientos técnicos del sensor de voltaje	15
Requerimientos técnicos del sensor de corriente.....	15
Requerimientos técnicos del sensor de temperatura	15
2.2 Selección de elementos.....	16
Sensor de voltaje	16
Sensor de corriente	17
Termopar tipo K.....	18
Circuito acondicionador	19
Driver I2C para LCD	20
Placa Base	20
2.3 Diseño del sistema	21
Circuito electrónico	21
Algoritmo	25
Plano de tuberías e instrumentación.....	28
Simulación del circuito y algoritmo.....	31
2.4 Implementación	35
Circuito impreso.....	35
Ensamble del tablero	35
3 RESULTADOS	37
3.1 Implementación del sistema de monitoreo con Arduino	38
Preparación de módulos	38
Prueba en protoboard.....	38
Circuito impreso.....	39
Ensamble del tablero	40
Instalación del tablero.....	43
Instalación de termopares.....	47
3.2 Pruebas de funcionamiento	47
Comunicación pantallas.....	47

Lectura de sensores	48
Toma de datos.....	48
Análisis termodinámico del sistema tipo Split.....	50
Análisis eléctrico del sistema tipo Split.....	52
3.3 Manual de uso y mantenimiento	53
4 CONCLUSIONES	55
5 RECOMENDACIONES.....	56
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
7 ANEXOS.....	59

RESUMEN

El presente trabajo de titulación se desarrolló bajo las normativas y conceptos de instrumentación industrial, para la construcción de un sistema embebido [1] de monitoreo a implementarlo en conjunto del resto de componentes del módulo didáctico de un sistema Split con R290.

Según la hoja de datos de equipo de aire acondicionado tipo Split se determinó que es necesaria una alimentación de 230 (V_{AC}) con un consumo de 6.7 (A_{AC}).

Se seleccionaron los sensores necesarios para medir voltaje entre 0 a 250 (V_{AC}), corriente entre 0 a 30 (A) y temperatura entre 0 a 1024 ($^{\circ}C$), además un conjunto de pantallas que permitan visualizar las características de funcionamiento del módulo didáctico.

Una vez seleccionados los elementos y diseñado un prototipo se fabricó un tablero con dimensiones de 30 * 20 * 8 (cm) que contenga todos los elementos del sistema y posteriormente instalarlo en el módulo.

En la etapa de pruebas de funcionamiento, se comprobó que los distintos sensores y pantallas se comuniquen correctamente, además se verificó que la lectura de los sensores tenga un error relativo de medición menor al del 5.00% comparándolos con valores teóricos y mediciones con instrumentos adicionales[2].

Posteriormente, se redactó manuales de uso y de mantenimiento para cada componente del módulo didáctico.

Para finalizar se concluye que, con el diseño y algoritmo implementado el sistema de monitoreo cumple su objetivo de monitorear temperaturas en el ciclo de refrigeración, además de los parámetros eléctricos de la unidad condensadora del equipo Split.

PALABRAS CLAVE: Instrumentación industrial, Split, sistema embebido, prototipo, algoritmo

ABSTRACT

The present degree project was developed using industrial instrumentation's regulations and concepts, for the construction of an embedded monitoring system to be implemented together with the other components of the didactic module of a Split system with R290.

According to the split-type air conditioning equipment data sheet, it was determined that a 230 (V_{AC}) power supply with a consumption of 6.7 (A_{AC}) is necessary.

The sensors were selected to measure voltage between 0 to 250 (V_{AC}), current between 0 to 30 (A) and temperature between 0 to 1024 ($^{\circ}C$), as well as a set of screens that allow visualizing the operating characteristics of the didactic module.

Once the elements had been selected and a prototype designed, a panel with dimensions of 30 × 20 × 8 (cm) was manufactured containing all the elements of the system and, subsequently, it was installed in the module.

In the performance tests, it was verified that the different sensors and screens communicated correctly. Also, it was verified that the sensor's values had a relative measurement error less than 5.00%, comparing them with theoretical values and those measured with additional instruments.

Subsequently, user's guide and maintenance manual were done for each component of the didactic module.

Finally, it is concluded that with the design and algorithm implemented, the monitoring system meets the objective of monitoring temperatures in the refrigeration cycle, in addition to the electrical parameters of the condensing unit of the Split equipment.

KEYWORDS: industrial instrumentation, Split, embedded system, prototype, algorithm.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El proyecto de implementación del módulo didáctico de un sistema de aire acondicionado tipo Split de refrigerante R290 está conformado de 4 componentes independientes siendo: la estructura y conexión eléctrica, sistema de refrigeración, monitoreo con instrumentos especializados e instrumentación con microcontroladores.

En este componente, se desarrolló un sistema embebido que permite medir: temperatura en distintos puntos de un ciclo de refrigeración; además, permitirá medir voltaje y corriente de la unidad condensadora.

Como placa base del proyecto, se utilizó un Arduino MEGA 2560 con el propósito de tener las suficientes entradas y salidas para la conexión de los distintos sensores y pantallas [3].

Para la medición de temperatura se utilizaron termopares tipo K que tiene un rango de trabajo de entre -200 a 1370 (°C) [2], para la adaptación de la señal del termopar se utilizan módulos MAX6675 que se conecta directamente a la placa Arduino mediante protocolos de comunicación [4], [5]. El sensor de corriente seleccionado ACS712 trabaja con un rango de 0 a 30 (A) [6] y el sensor de voltaje ZMPT101B con un rango de 0 a 250 VAC que tienen salidas normalizadas entre 0 a 5 (V).

Se identificaron 8 puntos para medir temperatura en el sistema de refrigeración, además se medirá voltaje y corriente de la unidad condensadora; y estos datos serán presentados en 3 pantallas de cristal líquido (LCD).

La programación del sistema se la realizó en la plataforma Arduino IDE con las respectivas librerías de cada sensor, se verificó el funcionamiento del programa realizando una simulación en el software Proteus realizando conexión respectiva de los sensores y pantallas.

Como primera prueba, se implementó el circuito en una placa de pruebas (protoboard) verificando el funcionamiento real y posteriormente se diseñó una placa de circuito impreso (PCB) para la conexión final del circuito; en paralelo se diseñó el tablero con los modelos de cada uno de los elementos para determinar el espacio físico necesario.

Posteriormente se quemaron las PCB, ensambló el tablero y se instaló en el módulo; en la etapa de pruebas se comprobó la comunicación y lectura con sensores y pantallas y para finalizar se redactó el manual de uso y mantenimiento.

En el Anexo II se incluye el certificado de funcionamiento del equipo.

1.1 Objetivo General

Implementar un sistema embebido de monitoreo de temperatura, corriente y voltaje para el módulo didáctico de un sistema de aire acondicionado tipo Split de refrigerante R290.

1.2 Objetivos Específicos

1. Identificar los requisitos operativos para el tablero del sistema de monitoreo.
2. Seleccionar elementos del sistema de monitoreo.
3. Identificar los sitios de instalación de los sensores en el sistema de refrigeración.
4. Diseñar, programar y simular el sistema de monitoreo.
5. Realizar pruebas de funcionamiento del tablero instalado.
6. Redactar un manual de uso y mantenimiento del sistema de monitoreo del módulo didáctico.

1.3 Alcance

El módulo didáctico cuenta con un sistema embebido de monitoreo para temperatura, voltaje y corriente; basado en la placa Arduino Mega

Para la medición de temperatura se implementaron termopares tipo K, cada una con su circuito de acondicionamiento siendo los módulos MAX6675 [4], [5]; en 8 puntos del sistema de refrigeración siendo: entrada y salida del compresor, salida del condensador, salida de la válvula de expansión, entrada y salida del evaporador; además puntos intermedios tanto del evaporador como del condensador. Para la medición de los parámetros eléctricos de la unidad condensadora se emplearon sensores de corriente y voltaje ACS712 y ZMPT101B respectivamente [6], [7].

Los datos de las respectivas mediciones se presentan en pantallas LCD del panel frontal del sistema.

Con los datos del sistema de monitoreo implementado y en conjunto con el resto de los componentes se realizó el análisis termodinámico del ciclo de refrigeración con propano o R290.

1.4 Marco teórico

Para un mejor entendimiento de lo descrito en el documento es necesario el conocimiento de nociones de termodinámica, electricidad, programación de microcontroladores; los cuales se describen en la siguiente sección.

Ciclo de refrigeración

Definido como ciclo invertido de Carnot o ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, es un proceso de varias etapas que utiliza como fluido de trabajo gas refrigerante y está compuesto de 4 elementos: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador [8]; como se observa en la Figura 1.1, cumpliendo 4 etapas con características conocidas.

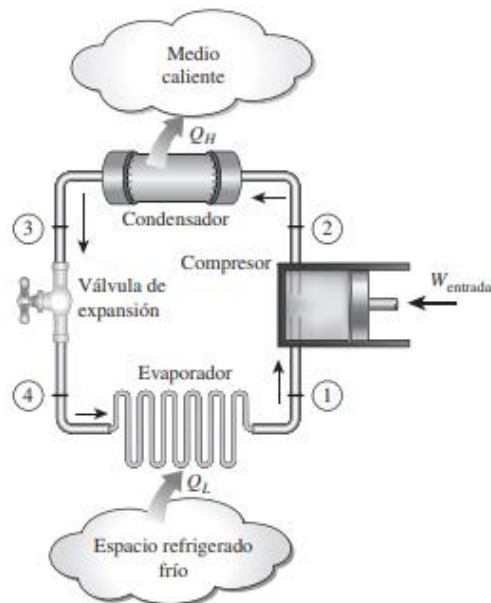


Figura 1.1 Esquema del ciclo de refrigeración [8].

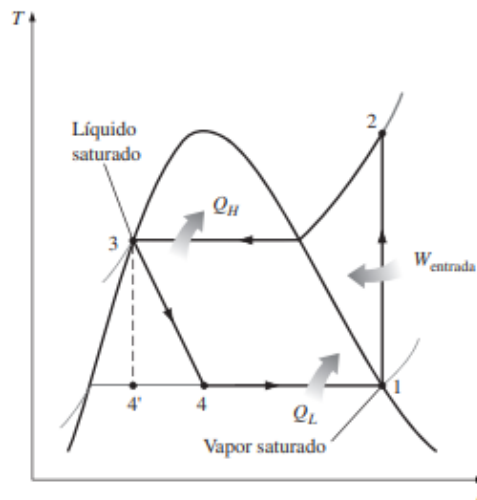


Figura 1.2 Gráfico temperatura vs entropía (T-s) del ciclo de refrigeración [8].

En la Figura 1.2, se observa las distintas etapas del ciclo de refrigeración; etapa de 1-2 corresponde a la compresión, un proceso de isentrópico en el cual también aumenta la temperatura; de 2-3 corresponde al rechazo de calor esto implica que la temperatura disminuye además de mantener la presión constante; de 3-4 es el proceso de expansión la presión y temperatura disminuye; y el proceso de 4-1 de absorción de calor que se realiza a presión constante [8].

Aire acondicionado tipo Split

El sistema Split es una modificación al ciclo de refrigeración tradicional en el cual se divide en 2 componentes, unidad exterior e interior siendo la unidad condensadora y el evaporador respectivamente; y a su vez la unidad condensadora está compuesta por el compresor, condensador y válvula de expansión [9].

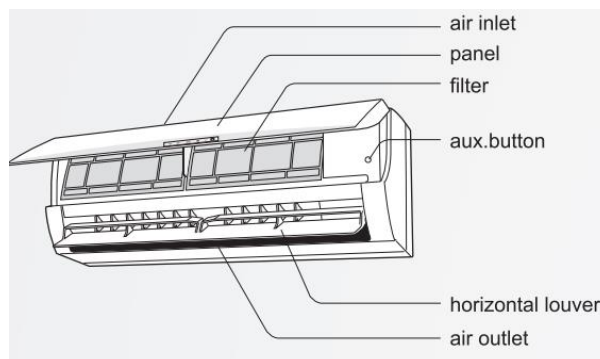


Figura 1.3 Unidad interior [10].

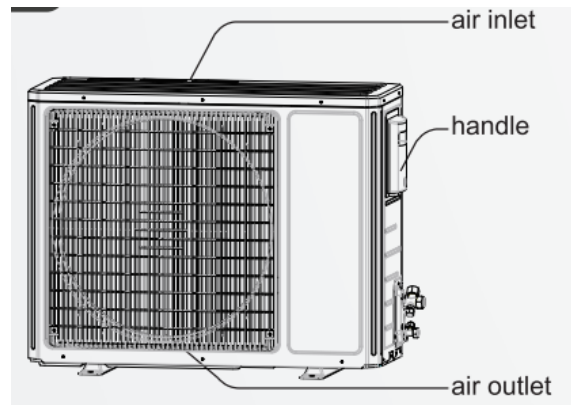


Figura 1.4 Unidad exterior [10].

Variables termodinámicas

En el estudio de la termodinámica se utilizan variables que permiten determinar el estado de las sustancias y la energía que intercambian los fluidos, siendo las más utilizadas la temperatura, presión, entropía, entalpía; cada uno teniendo unidad, símbolo del sistema internacional (SI) como se observa en Tabla 1.1 [8].

Tabla 1.1 Variables termodinámicas.

Variables termodinámicas		
Variable	Símbolo	Unidad
Temperatura	T	(K)
Presión	P	(Pa)
Entropía	S	(J/K)
Entropía específica	S	(J/(K*kg))
Entalpía	H	J/kg

Potencia eléctrica

Al estudiar el funcionamiento de las máquinas eléctricas, la potencia que esta consume se divide en potencia activa, reactiva y aparente; estas dependen del desfase que existe entre el voltaje y corriente. En la Tabla 1.2, se enlistan las variables implicadas con su respectivo símbolo y unidad [11].

Tabla 1.2 Variables eléctricas

Variables eléctricas		
Variable	Símbolo	Unidad
Voltaje	V	(V)
Corriente	I	(A)
Potencia aparente	S	(VAR)
Potencia activa	P	(W)
Potencia reactiva	Q	(VA)

La potencia se la puede analizar con números complejos como se observa en la Figura 1.5, siendo la activa y reactiva la parte real e imaginaria respectivamente; el módulo equivale a la aparente y el coseno del ángulo al factor de potencia[11].

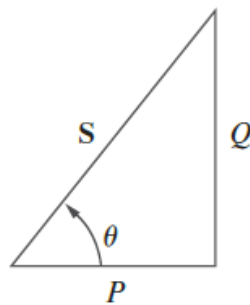


Figura 1.5 Triángulo de potencia [11].

Sistema embebido

Un sistema embebido es un sistema computacional dedicado a realizar funciones específicas [1], normalmente desarrollados con microcontroladores como unidad central de procesamiento conteniendo todo lo necesario para su funcionamiento en una sola placa.

Arduino

Es una compañía dedicada a la elaboración y comercialización de placas de desarrollo basadas en microcontroladores de la familia AVR como el Arduino MEGA de la Figura 1.6 [1].

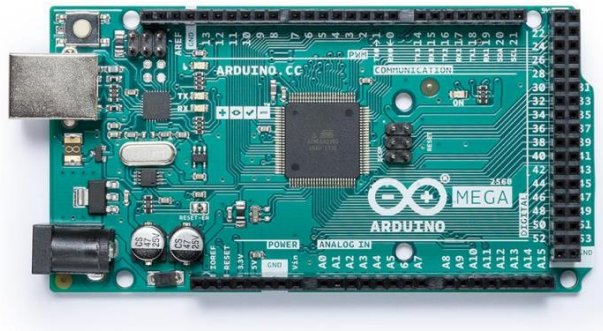


Figura 1.6 Arduino Mega 2560 [3].

Como se observa en la Figura 1.7, la plataforma Arduino IDE, es la plataforma de lenguaje de alto nivel basado en C y C++ dedica para la programación de las placas de desarrollo Arduino. En la Figura 1.8, se muestra el gestor de librerías que permite el uso de comandos especializados, protocolos de comunicación y uso de módulos adicionales.

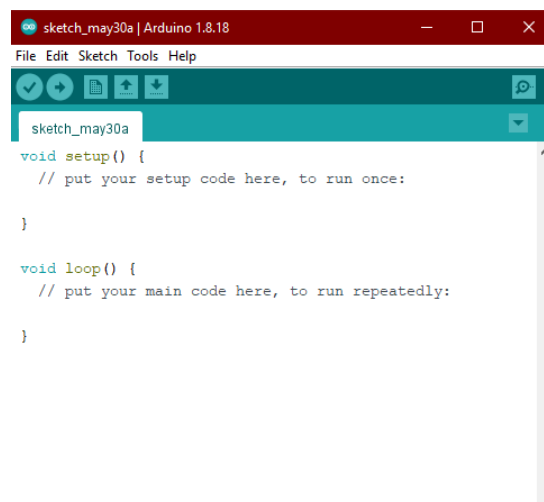


Figura 1.7 Interfaz Arduino IDE.

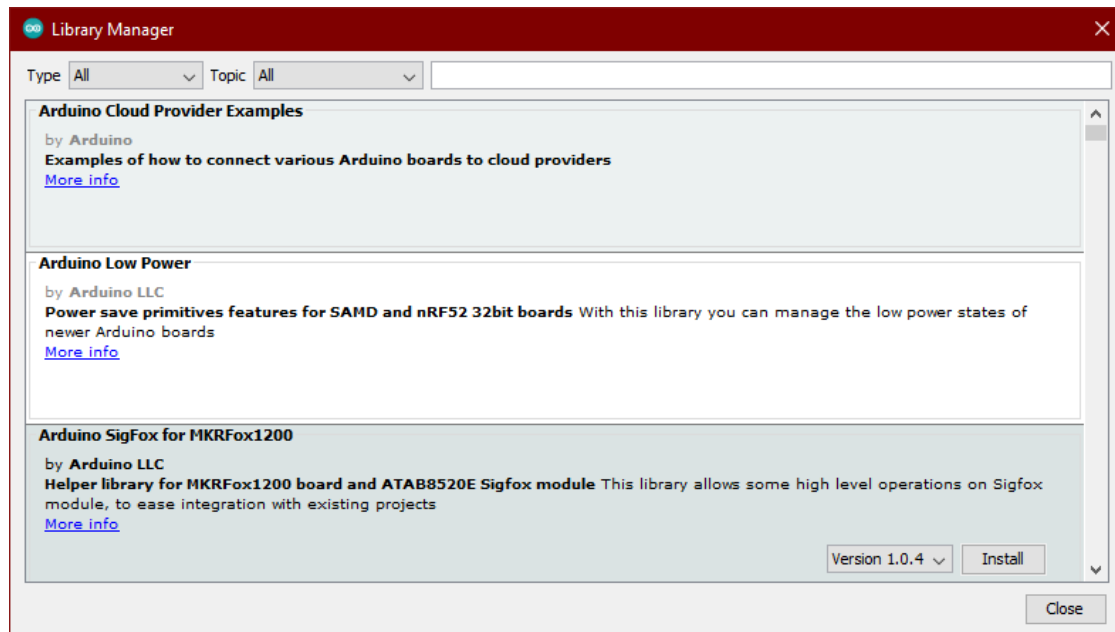


Figura 1.8 Gestor de librerías Arduino IDE.

Sensores modulares

Comercialmente existe una gran variedad de sensores genéricos para la instrumentación o domótica, diseñados para el uso en conjunto de microcontroladores como o placas de desarrollo como AVR, PIC, Arduino o Raspberry [1].

La mayoría de los sensores como los que miden voltaje, corriente, luminosidad, humedad, temperatura, etc. Tiene una salida de voltaje análoga que se puede conectar al conversor análogo digital y realizar una conversión a bits y mediante programación obtener un valor numérico [12].

También existen módulos especializados como los Wi-Fi, Bluetooth, RC, etc. Que utilizan protocolos de comunicación como: Universal Synchronous and Asynchronous serial Reciver and Trasnmittter (USART), Serial Peripheral Interface (SPI), Inter Integrated Circuit (I2C); que envían los datos directamente al microcontrolador [12].

Termopar tipo K

Los termopares están basados en el fenómeno termoeléctrico Seebeck [2], estos están constituidos por dos alambres de aleación con una unión llamada junta caliente la cual se utiliza en la medición; y mediante una relación proporcional del voltaje diferencial en la junta fría se obtiene la temperatura en la junta caliente [13].

Los termopares del tipo K están constituidos por alambre cromel (níquel - cromo) y alumel (níquel - aluminio); con un rango de -200 a 1370 (°C) [2].

Compensación de unión fría

Al utilizar termopares el voltaje diferencial que se obtiene está relacionado con la temperatura de la unión caliente y fría. Teóricamente la temperatura de la unión fría es de 0 (°C) por lo cual no influye en la medición; pero en campo la temperatura de la unión fría es igual a la ambiental por lo que se debe compensar mediante acondicionamiento insertando un voltaje en la unión fría como se observa en la Figura 1.9 proporcional a la temperatura ambiente [2].

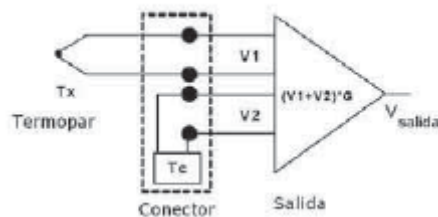


Figura 1.9 Compensación de termopar [2].

Acondicionamiento de sensores

Los sensores o transductores son elemento que permiten medir una magnitud física y transformarla en una señal eléctrica, normalmente dicha señal está en el orden de los milivoltios siendo muy baja para que los instrumentos la detecten [2].

El acondicionamiento de los sensores implica el uso de circuitos electrónicos para amplificar la señal a un rango de valores normalizados. Los valores normalizados para señales se especifican en la Tabla 1.3. [2].

Tabla 1.3 Señales normalizadas de instrumentación [2]

Señales normalizadas	
Voltaje	0 a 5 (V)
Corriente	4 a 20 (mA)

Placa de circuito impreso

Una PCB es una placa de material dieléctrico con una superficie de cobre en la cual se graba un circuito de manera permanente. Estas pueden tener la superficie de cobre en una o ambas caras de la placa, esto depende de la complejidad del circuito y el modo de montaje de los elementos [13].

La PCB puede fabricarse de distintas formas: grabando el circuito en el cobre usando ácido o mediante maquinado CNC desbastando las zonas innecesarias.

Pantalla de cristal líquido

Son módulos prefabricados con controlador incluido que se manejan mediante un bus de datos y control; estas se usan para graficar caracteres alfanuméricos del código ASCII.

El bus de datos es de 8 bits por lo cual emplea 8 pines de un microcontrolador para su uso, se puede configurar para trabajar únicamente con 4 reduciendo la velocidad de trabajo. El bus de control tiene 2 bits, uno para habilitar y el segundo para comandos.

2 METODOLOGÍA

En este capítulo, se explica el proceso de desarrollo del componente de sistema de monitoreo con Arduino Mega, del módulo didáctico.

Con base a los conceptos revisados de instrumentación industrial, electrónica analógica y digital, y microcontroladores se desarrollan las actividades detalladas en la Figura 2.1.

Con la revisión del manual del equipo de aire acondicionado tipo Split se identificó que este tiene potencia de 1380 (W) con alimentación de 220 (V_{AC}) y un consumo de 6.7 (A) [10]. Se determinó utilizar el sensor de voltaje ZMPT101B que permite medir hasta 250 (V_{AC}) [7], y el sensor de corriente ACS712 que permite medir hasta 30 (A)[6].

Se identificó 8 puntos para medir temperatura, implementando termopares tipo K con un rango de -200 a 1370 ($^{\circ}C$) [2], para el acondicionamiento de los termopares se emplean dos tipos de módulos siendo el MAX6675 para temperaturas mayores a 0 ($^{\circ}C$) [5]. Para mostrar los datos se emplean 3 pantallas LCD 20*4, en estas se presentan los 8 valores de temperatura, adicionalmente el voltaje, corriente, potencia y factor de potencia.

Como placa base se decidió usar un Arduino Mega ya que este cuenta con 54 pines de entradas o salidas digitales, y 16 entradas analógicas [3], siendo suficiente para la conexión de todos los módulos y pantallas.

Se seleccionan los sensores, módulos y placa base y posteriormente, se desarrolló un algoritmo en la plataforma Arduino IDE, que permita tomar los datos y mostrarlos en las pantallas LCD. Paralelamente, se realizó un diagrama esquemático de la conexión de los módulos, pantallas y el Arduino en el software Proteus 8 Professional; posteriormente se simuló el funcionamiento del sistema previo a la implementación del mismo.

Una vez adquiridos los componentes, se ensambló el sistema en un protoboard, verificando el funcionamiento de los sensores. Se diseñó una PCB para la conexión definitiva de los elementos; en el software Inventor Professional se diseñó un tablero para determinar el espacio físico necesario para montar los sensores, módulos y microcontrolador. Finalmente, se ensambló el sistema en el tablero para la instalación en el módulo didáctico.

Se estableció un periodo de pruebas para corregir fallas y optimizar el sistema. Posteriormente se redactó un manual de uso y mantenimiento.



Figura 2.1 Esquema de metodología.

2.1 Requerimientos técnicos

En esta sección, se revisa las hojas de datos y manuales del equipo de aire acondicionado tipo Split, para determinar las características necesarias de los componentes electrónicos que se utilizarán en el sistema.

Aire acondicionado Split

El equipo de aire acondicionado a emplearse de la marca Godrej GIC 18 LAH 5 GWQG; de tipo Split con refrigerante R290 [10]. En la Tabla 2.1, se detallan los parámetros eléctricos de funcionamiento.

Tabla 2.1 Parámetros operativos del equipo Split [10].

GIC 18 LAH 5 GWQG	
Tipo de alimentación	Monofásica
Frecuencia	50 (Hz)
Voltaje	220 (V)
Corriente	6.7 (A)
Potencia	1380 (W)

Sensores a instalar en el equipo Split

Considerando equipo tipo Split, esto implica que el la unidad exterior o evaporador se instala en una ubicación diferente a la unidad exterior o unidad condensadora. Considerando lo anterior mencionado se seleccionaron 8 puntos para medir temperatura en el ciclo de refrigeración como se observa en la Figura 2.2.

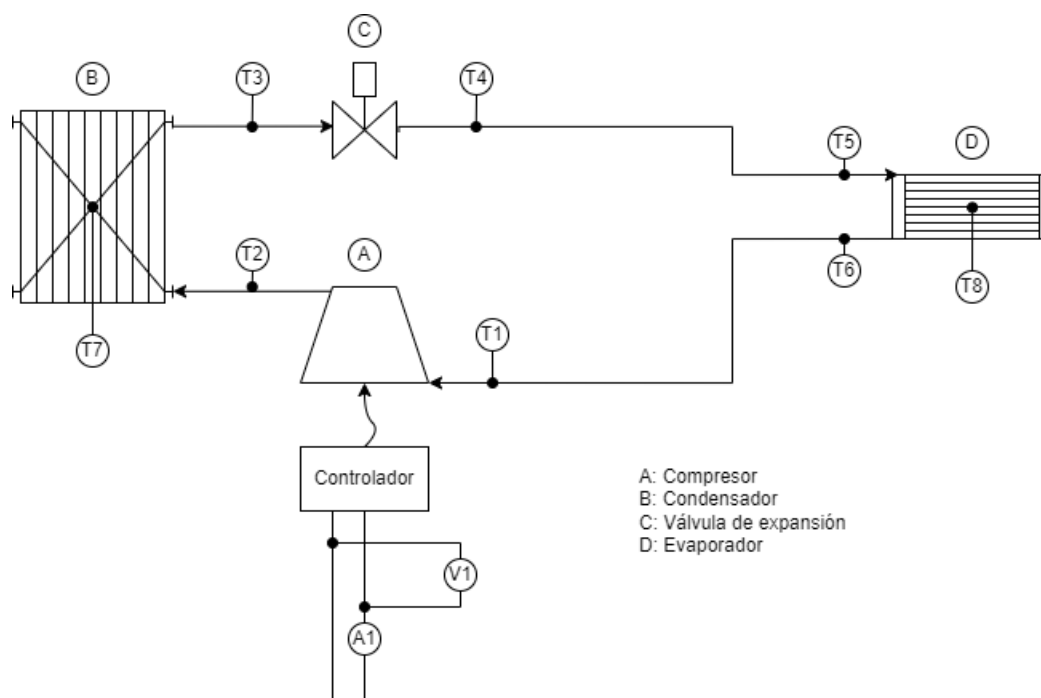


Figura 2.2 Puntos de instalación de sensores.

Se detallan las ubicaciones de instalación de los sensores en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Sitios de instalación de sensores.

Puntos de instalación de termopares		
Sensor	Tipo de sensor	Ubicación
T1	Termopar	Entrada del compresor
T2	Termopar	Salida del compresor
T3	Termopar	Salida del condensador
T4	Termopar	Salida de la válvula de expansión
T5	Termopar	Entrada del evaporador
T6	Termopar	Salida del evaporador
T7	Termopar	Condensador
T8	Termopar	Evaporador
V1	Voltímetro	Cable de alimentación
A1	Amperímetro	Cable de alimentación

Se decidió medir temperatura en 8 puntos del sistema de refrigeración para determinar: la temperatura de condensación, evaporación, sobrecalentamiento y subenfriamiento; conociendo dichos valores se puede estimar las propiedades termodinámicas del refrigerante y calcular el calor absorbido y rechazado del ciclo.

Al medir voltaje y corriente de la unidad condensadora, se calcula la potencia eléctrica que consume y el factor de potencia. Con los datos se puede determinar la energía eléctrica que ingresa a la unidad condensadora (compresor y ventilador).

Requerimientos técnicos del sensor de voltaje

Considerando que el sistema debe ser capaz de medir voltaje del equipo de aire acondicionado, se estableció como requisito los parámetros del sensor de voltaje que se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Requisitos del sensor de voltaje.

Características	Valores
Alimentación	5 (V _{DC})
Rango de medida	< 220 (V _{AC})
Salida de datos	Normalizada 0 – 5 (V _{DC})
Comunicación (opcional)	Serial, SPI o I2C

Requerimientos técnicos del sensor de corriente

El sistema también deber medir la corriente que consume el equipo, se estableció que el sensor debe ser capaz de medir lo descrito en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Requisito del sensor de corriente.

Características	Valores
Alimentación	5 (V _{DC})
Rango de medida	< 7 (A)
Salida de datos	Normalizada 0 – 5 (V _{DC})
Comunicación (opcional)	Serial, SPI o I2C

Requerimientos técnicos del sensor de temperatura

El sistema también mide temperatura en el ciclo de refrigeración. Para esto se estableció que el sensor tenga las características expuestas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Requisitos del sensor de temperatura.

Características	Valores
Alimentación	5 (V _{DC})
Rango de medida	-50 a 100 (°C)
Salida de datos	Normalizada 0 – 5 (V _{DC})
Comunicación (opcional)	Serial, SPI o I2C

2.2 Selección de elementos

Con los requisitos detallados en la sección anterior, se revisó la hoja de datos distintos sensores, módulos, circuitos de acondicionamiento; para seleccionar aquellos que cumplen los parámetros.

Sensor de voltaje

Se seleccionó el sensor ZMPT101B ya que, es el único módulo comercial que permite medir voltaje de hasta 250 (V_{AC}) [7], el resto de sus características se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Características de ZMPT101B [7].

ZMPT101B	
Voltaje de trabajo	3.3 o 5 (V _{dc})
Corriente de trabajo	50 (mA _{dc})
Temperatura de trabajo	-40 a 80 (°C)
Rango	0 a 250 (V)
Tiempo de subida	5 (μs)
Sensibilidad	0.01 (V/V)

El módulo tiene como salida una señal análoga senoidal en fase con el voltaje medido, entre 0 y 5 (V), con un desplazamiento de 2.5 (V) para su lectura mediante el conversor análogo digital (ADC) de cualquier microcontrolador [7].

En la Figura 2.3, se observa el módulo, este cuenta con borneras para la conexión de voltaje a medir y pines de conexión de señal y alimentación.

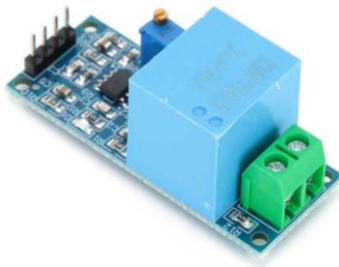


Figura 2.3 Módulo sensor de voltaje ZMPT101B [7].

Sensor de corriente

Para la selección del sensor de corriente a implementarse, se revisó los módulos EL0426 y ACS712; se descartó el uso del primer módulo ya que el rango de medida era menor al establecido como requisito. Se revisó la hoja de datos del ACS712, se encontró que dicho módulo tiene tres versiones para medir hasta 5, 20 y 30 (A) [6], siendo respectivamente la Tabla 2.7, Tabla 2.8 y Tabla 2.9.

Tabla 2.7 Características de ACS712ELCTR-05B-T [6].

ACS712ELCTR-05B-T	
Voltaje de trabajo	5 (V_{dc})
Corriente de trabajo	10 (mA_{dc})
Temperatura de trabajo	-40 a 80 ($^{\circ}C$)
Rango	0 a 5 (A)
Tiempo de subida	5 (μs)
Sensibilidad	185 (mV/A)

Tabla 2.8 Características de ACS712ELCTR-20A-T [6].

ACS712ELCTR-20A-T	
Voltaje de trabajo	5 (V_{dc})
Corriente de trabajo	10 (mA_{dc})
Temperatura de trabajo	-40 a 80 ($^{\circ}C$)
Rango	0 a 20 (A)
Tiempo de subida	5 (μs)
Sensibilidad	100 (mV/A)

Tabla 2.9 Características de ACS712ELCTR-30A-T [6].

ACS712ELCTR-30A-T	
Voltaje de trabajo	5 (V _{dc})
Corriente de trabajo	10 (mA _{dc})
Temperatura de trabajo	-40 a 80 (°C)
Rango	0 a 30 (A)
Tiempo de subida	5 (μs)
Sensibilidad	66 (mV/A)

Se decidió implementar el modelo que permite medir hasta 30 (A) ya que, al tener el mayor rango de medida, en caso de tener una sobre corriente en el módulo didáctico esta no excediera el límite máximo de medida del sensor.

El módulo cuenta con pines macho para conexión a protoboard para la alimentación y señal y borneras para la conexión al circuito como se puede ver en la Figura 2.4.



Figura 2.4 Módulo sensor de corriente ACS712 [6].

El sensor tiene como salida una señal analógica senoidal en fase con la corriente, entre 0 a 5 (V) y un desplazamiento de 2.5 (V), compatible para la lectura con ADC [6].

Termopar tipo K

Se decide implementar termopares tipo K de calibre AWG 24 ya que, estos están disponibles en el laboratorio de termodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM). El rango de medida de temperatura para este tipo de termopar es de -200 a 1370 (°C) [2].

Circuito acondicionador

Como se describe en la sección 1.4, al usar termopares estos necesitan la compensación de unión fría, además un circuito de acondicionamiento para amplificar la señal de voltaje. Se descartó realizar el acondicionamiento empleando amplificadores operacionales y se optó por buscar un circuito integrado que realice la compensación y el acondicionamiento directamente.

Tabla 2.10 Características MAX6675 [5].

MAX6675	
Voltaje de trabajo	3.3 o 5 (V_{dc})
Corriente de trabajo	50 (mA_{dc})
Temperatura de trabajo	-20 a 85 ($^{\circ}C$)
Rango	0 a 1024 ($^{\circ}C$)
Tiempo de subida	170 (ms)
Sensibilidad	41 ($\mu V/^{\circ}C$)
ADC	12 (bits)
Comunicación	SPI, solo lectura

En la Tabla 2.10, se especifican los parámetros del módulo MAX6675. Dicho módulo no tiene una señal de salida análoga, la salida de datos se transmite directamente a un microcontrolador puesto que, internamente tiene un ADC y un transmisor para comunicación SPI [4], [5].

La estructura del módulo incluye borneras para la conexión del termopar y pines de conexión para alimentación y comunicación como se puede ver en la Figura 2.5 del módulo MAX6675.



Figura 2.5 Módulo de acondicionamiento MAX6675 [5].

Driver I2C para LCD

Para conectar una pantalla LCD a un microcontrolador se necesitan al menos de 8 pines y al implementar 3 pantallas el número de conexiones aumenta a 24. Para disminuir el número de conexiones se optó por incluir el módulo de expansión PCF8574. Este puede ser usado como driver para el control de las LCD ya que, se conecta directamente a los pines de la LCD y se comunica con el microcontrolador mediante comunicación I2C [14] reduciendo el número de conexiones a 2.

En la versión modular dedicada para la conexión de LCD este cuenta con pines de conexión a la pantalla y pines de conexión para alimentación y comunicación como se ve en la Figura 2.6.

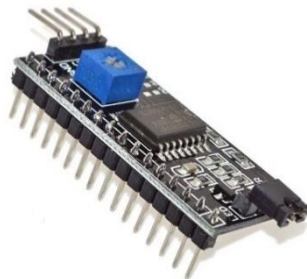


Figura 2.6 Módulo de expansión PCF8574 para LCD [15].

Placa Base

La placa base se seleccionó tomando en cuenta que tipos y cuantos módulos se van a implementar en el sistema. Esta necesita al menos 2 ADC, comunicación I2C, SPI y USART

Se revisó el catálogo de placas Arduino, se descartó utilizar la placa UNO y NANO puesto que, estas tienen 14 pines de entrada o salida digital limitando la posibilidad de expansión del sistema. En cambio, se seleccionó el MEGA ya que, tiene 54 pines de entradas o salidas digitales [3].

Tabla 2.11 Características Arduino MEGA 2560 [3].

Arduino MEGA 2650	
Voltaje de alimentación	Jack 6 a 20 (V_{dc}) Vin 5 (V_{dc})
I/O pin	54
ADC pin	16
PWM pin	15
USART	4
SPI	1
I2C	1
Vout	5 (V_{dc}) 3.3 (V_{dc})

2.3 Diseño del sistema

Una vez seleccionados los módulos, sensores y placa base, se diseñó el circuito electrónico, posteriormente se realizó la programación del algoritmo y para finalizar la simulación del sistema.

Circuito electrónico

El diagrama esquemático se lo realiza en el software de Proteus 8 Professional. En este se realizó las conexiones de los sensores, módulos y pantallas con el Arduino mega. En la librería por defecto no existe las placas de Arduino por lo cual se descargó una librería extra para agregarla.

En la librería de Proteus tampoco se encuentran los módulos como tal, por lo cual primero se realizó el circuito del módulo y posteriormente la conexión al Arduino.

Primero, se realizó la conexión interna del módulo ZMPT101B, constituido por un transformador de corriente, amplificadores operacionales y elementos pasivos como resistencias y capacitores como se observa en la Figura 2.7 [7].

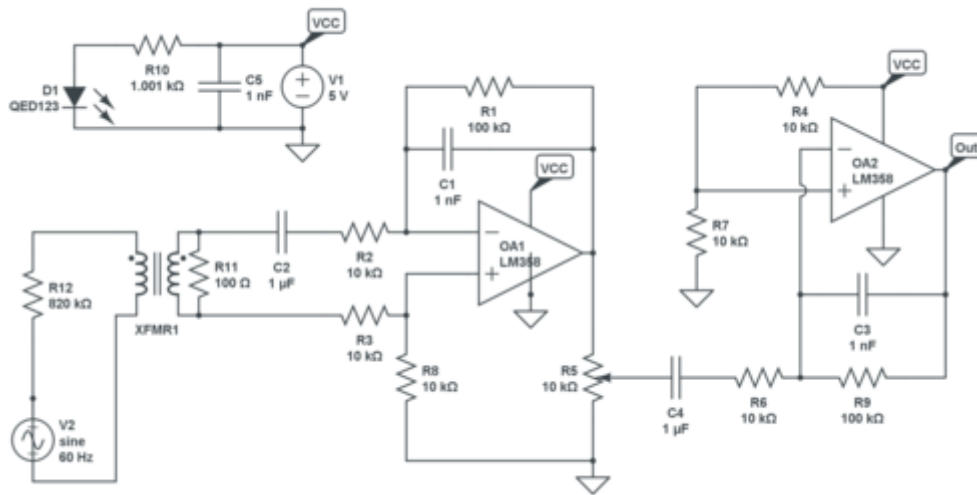


Figura 2.7 Diagrama de conexiones ZMPT101B [7].

Para la conexión interna del módulo ACS712 se conectaron capacitores a modo de filtro como se observa en la Figura 2.8 según lo especifica la hoja de datos [6].

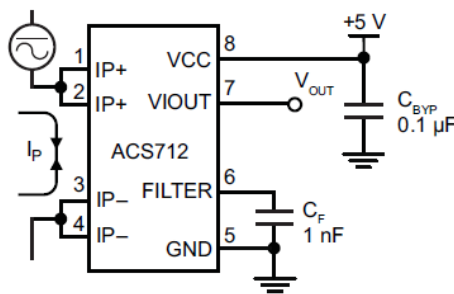


Figura 2.8 Diagrama de conexión ACS712 [6].

El módulo de acondicionamiento MAX6675 conecta un capacitor entre los pines de VCC y GND como filtro y no requieren ninguna conexión o elemento adicional, posteriormente se conectan directamente al Arduino y al termopar como se muestra en la Figura 2.9 según lo revisado en la hoja de datos [4], [5].

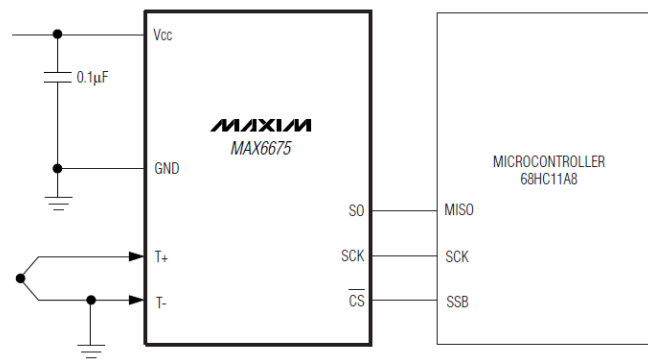


Figura 2.9 Diagrama de conexiones MAX6675 [5].

Para el controlador I2C de LCD se conectó el circuito integrado PCF8574 a los pines correspondientes de la LCD como se observa en Figura 2.10 según la hoja de datos del módulo [15].

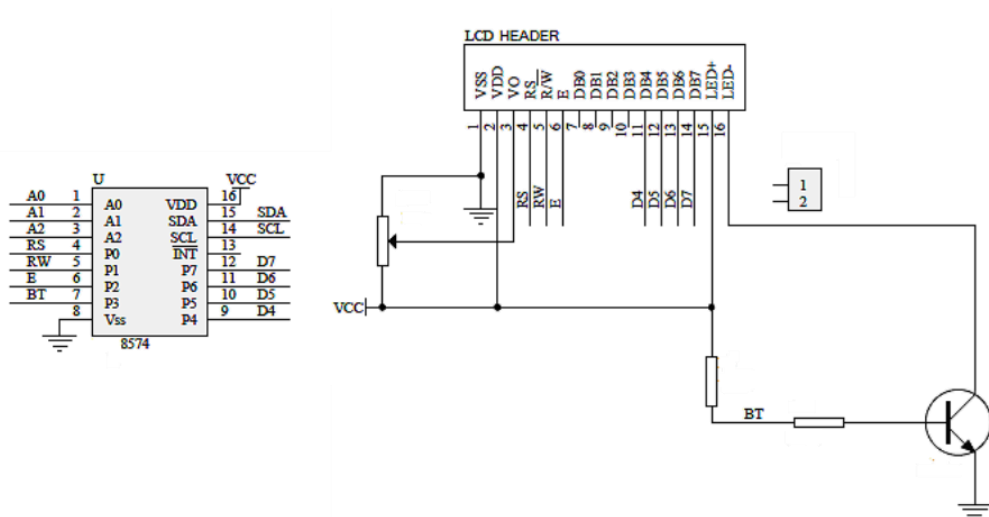


Figura 2.10 Diagrama de conexiones driver I2C para LCD [15].

Para la conexión del Arduino Mega, se revisó la hoja de datos para identificar los pines correspondientes de comunicación SPI e I2C, además de seleccionar los pines para la conexión de los módulos de entrada analógica. La Figura 2.11, Tabla 2.12 muestra detalladamente la función de cada uno de los pines del Arduino MEGA [3].



ARDUINO MEGA 2560 REV3

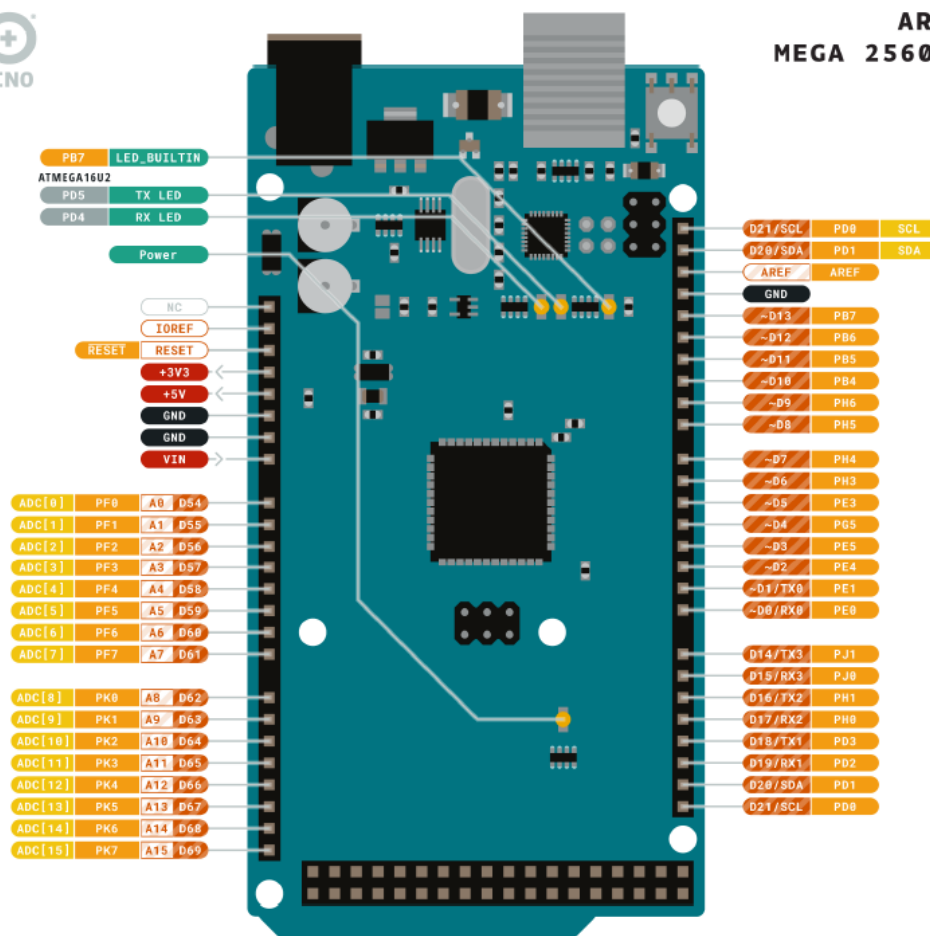


Figura 2.11 Pin Out Arduino MEGA [3].

Los pines seleccionados para la conexión de los módulos se detallan en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Conexiones Arduino MEGA.

Conexiones Arduino MEGA		
Pin	Conexión módulo	Descripción
5v	Vcc	Vcc I2C LCD Vcc MAX6675 Vcc ZMPT101B Vcc ACS712
3v3	Vcc	Vcc MAX31855
GND	GND	GND
A15	Vout	Vout ZMPT101B
A14	Vout	Vout ACS712
D20	SDA	SDA I2C LCD

D21	SCL	SCL I2C LCD
D23	CLK	CLK MAX6675
D25	DO	DO MAX6675
D27	CS	CS MAX6675:8
D29	CS	CS MAX6675:7
D31	CS	CS MAX6675:6
D33	CS	CS MAX6675:5
D35	CS	CS MAX6675:4
D37	CS	CS MAX6675:3
D39	CS	CS MAX6675:2
D41	CS	CS MAX6675:1
D47	SO	SO MAX 6675
D49	SCK	SCK MAX6 6675

En el Anexo III. se visualiza el diagrama esquemático exportado desde Proteus 8 Professional.

Algoritmo

Para el desarrollo del algoritmo se empleó la plataforma Arduino IDE, en esta se encuentran disponibles las librerías para cada sensor, además de que incluye ejemplos para el uso de esta.

Para la configuración de la placa utilizada simplemente se seleccionó en el menú de herramientas como se muestra en la Figura 2.12.

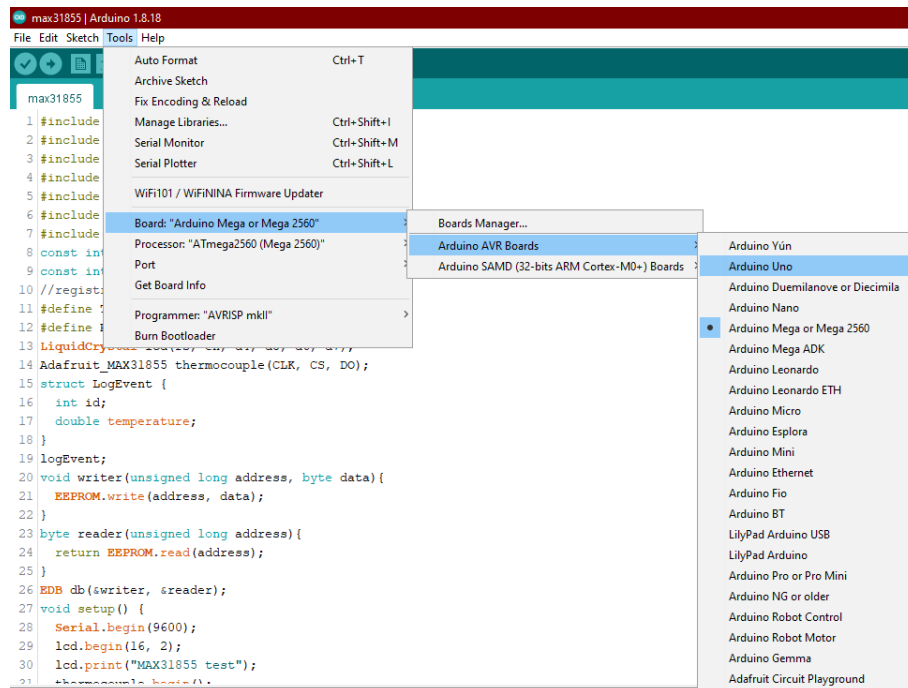


Figura 2.12 Configuración de placa.

En el diagrama de flujo de la Figura 2.13, se representa el funcionamiento básico del algoritmo a implementarse en el sistema. El sistema recibe los datos de los módulos de temperatura, voltaje, corriente; realizando tratamiento de datos se obtiene la potencia y factor de potencia. Posteriormente muestra los datos en las pantallas. También tiene la opción de guardar los datos en la memoria y crear un registro exportable mediante la conexión USB.

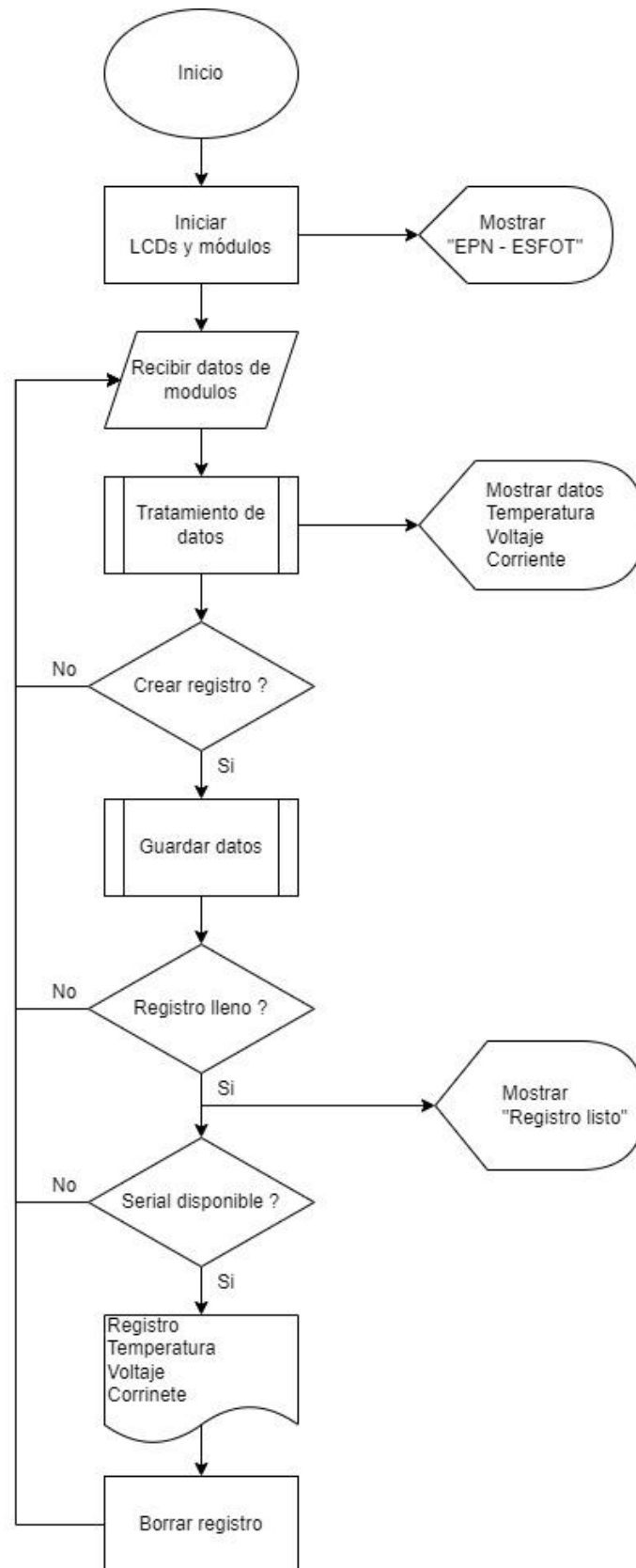


Figura 2.13 Diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo.

En la Tabla 2.13, se especifican las librerías utilizadas respectivamente para cada función o módulo.

Tabla 2.13 Librerías implementadas en el código de Arduino.

Librerías		
Módulo / Función	Librería	Descripción
Comunicación SPI	SPI.h	Configuración para comunicación SPI
Comunicación SPI	Wire.h	Configuración de maestro y múltiples esclavos de para comunicación SPI
I2C LCD	LiquidCrystal_I2C.h	Configuración LCD con módulo I2C
MAX6675	max6675.h	Lectura y tratamiento de módulo, comunicación SPI
Registro	EDB.h	Configuración para crear tablas en memoria
Registro	EEPROM.h	Configuración para usar memoria EEPROM

El código se lo desarrolló con subrutinas para acciones específicas y evitar repeticiones que retrasen el tiempo de respuesta del sistema. Se determinaron subrutinas para leer los sensores, mostrar etiquetas en las pantallas, mostrar datos en pantallas, guardar registro y enviar registro.

El código del algoritmo desarrollado se encuentra en el Anexo IV.

Plano de tuberías e instrumentación

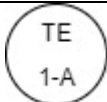
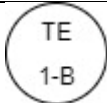
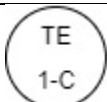
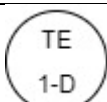
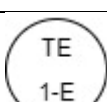
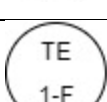
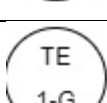

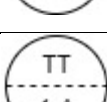
Para levantar el plano de tuberías e instrumentos (P&ID) se revisó la simbología y nomenclatura detallada en la norma de la Sociedad de Instrumentistas de América (ISA), para realizar el diagrama de instrumentos del sistema de monitoreo basado en el Arduino mega del módulo didáctico.

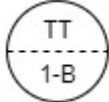
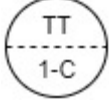
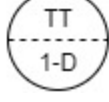
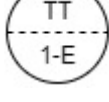
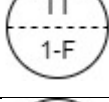
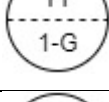
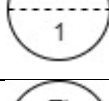

Se clasificó los instrumentos según la variable de proceso y se le asigna un lazo de siendo: el lazo 1 para temperatura, lazo 2 para voltaje y lazo 3 para corriente.

Posteriormente se clasifican los instrumentos según su función en su respectivo lazo además de establecer su nomenclatura y simbología.

En el lazo de 1 correspondiente a temperatura, al tener varios termopares y módulos de acondicionamiento se implementó sufijos para diferenciarlos como se observa en la Tabla 2.14. Los termopares corresponden al elemento primario o sensor, el módulo de acondicionamiento corresponde al transmisor, el Arduino es el registrador y por último la pantalla el indicador.


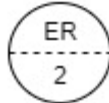
Tabla 2.14 Lista de instrumentos del lazo 1.

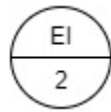
Instrumentos del Lazo 1		
Nomenclatura	Descripción	Simbología
TE 1-A	Sensor de temperatura del lazo 1 montado en campo	
TE 1-B	Sensor de temperatura del lazo 1 montado en campo	
TE 1-C	Sensor de temperatura del lazo 1 montado en campo	
TE 1-D	Sensor de temperatura del lazo 1 montado en campo	
TE 1-E	Sensor de temperatura del lazo 1 montado en campo	
TE 1-F	Sensor de temperatura del lazo 1 montado en campo	
TE 1-G	Sensor de temperatura del lazo 1 montado en campo	
TE 1-H	Sensor de temperatura del lazo 1 montado en campo	
TT 1-A	Transmisor de temperatura del lazo 1 en tablero no accesible	

TT 1-B	Transmisor de temperatura del lazo 1 en tablero no accesible	
TT 1-C	Transmisor de temperatura del lazo 1 en tablero no accesible	
TT 1-D	Transmisor de temperatura del lazo 1 en tablero no accesible	
TT 1-E	Transmisor de temperatura del lazo 1 en tablero no accesible	
TT 1-F	Transmisor de temperatura del lazo 1 en tablero no accesible	
TT 1-G	Transmisor de temperatura del lazo 1 en tablero no accesible	
TT 1-H	Transmisor de temperatura del lazo 1 en tablero no accesible	
TR 1	Registrador de temperatura del lazo 1 en tablero no accesible	
TI 1	Indicador de temperatura del lazo 1 en tablero accesible	

En el lazo 2 de voltaje o tensión; el módulo es el sensor y transmisor, el Arduino es el registrador y la pantalla el indicador, esto se puede ver en la Tabla 2.15.


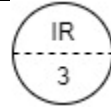
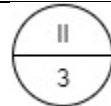
Tabla 2.15 Lista de instrumentos del lazo 2.

Instrumentos del Lazo 2		
Nomenclatura	Descripción	Simbología
EET 2	Sensor y transmisor de voltaje del lazo 2 en tablero no accesible	
ER 2	Registrador de voltaje del lazo 2 en tablero no accesible	

El	Indicador de voltaje del lazo 2 en tablero accesible		
----	--	---	--

En la Tabla 2.16, se detallan los instrumentos del lazo 3 de corriente, el módulo cumple como elemento primario y transmisor, el Arduino como registrador y la pantalla como indicador.

Tabla 2.16 Lista de instrumentos lazo 3.

Instrumentos del Lazo 3		
Nomenclatura	Descripción	Simbología
IET 3	Sensor y transmisor de corriente del lazo 3 en tablero no accesible	
IR 3	Registrador corriente del lazo 3 en tablero no accesible	
II	Indicador de corriente del lazo 3 en tablero accesible	

El plano P&ID se encuentra en el Anexo V.

Simulación del circuito y algoritmo

Una vez desarrollado el circuito electrónico y la programación del algoritmo se procede con la simulación del sistema en Proteus. Con la simulación se verificó que las pantallas estén correctamente configuradas, que el Arduino lea correctamente los datos de los módulos, que el registro se guarde y exporte correctamente.

En Proteus para utilizar el Arduino es necesario cargar el código en la ventana de propiedades de Figura 2.14.

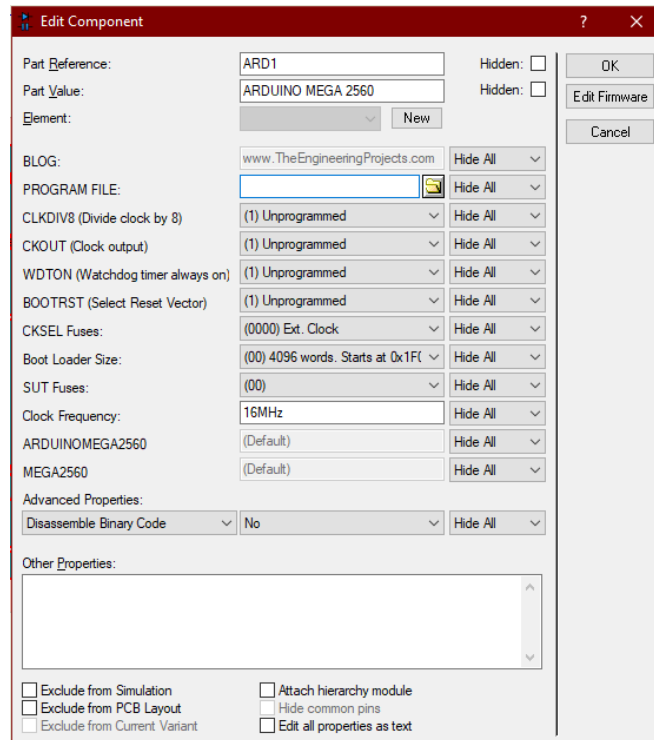


Figura 2.14 Propiedades de Arduino en Proteus.

El código puede ser ingresando mediante el compilador nativo configurándolo para la placa de Arduino correcta como se observa en la Figura 2.15; o cargando el archivo de instrucciones hexadecimal (.hex).

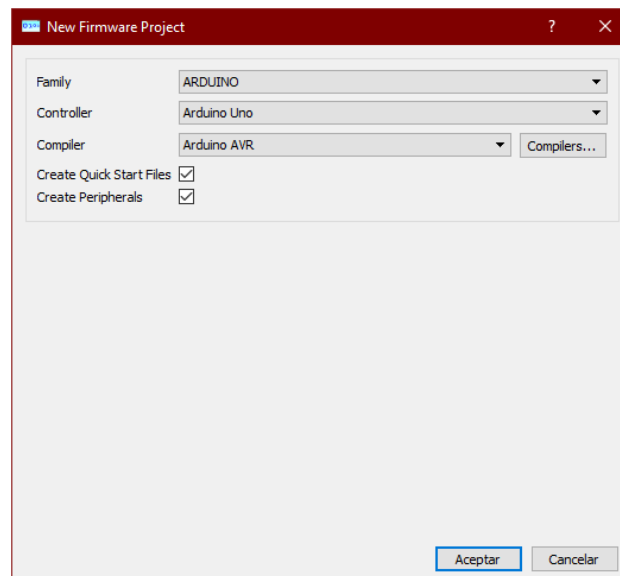


Figura 2.15 Compilador nativo de Proteus.

Por defecto Arduino IDE no genera el archivo hexadecimal, para generarlo es necesario configurarlo en las propiedades del programa; desde el archivo de preferencias.

En la primera prueba que se realizó, se configuró los módulos de comunicación de las 3 pantallas, para esto únicamente se mostraron las etiquetas en las pantallas como se observa en la Figura 2.16.

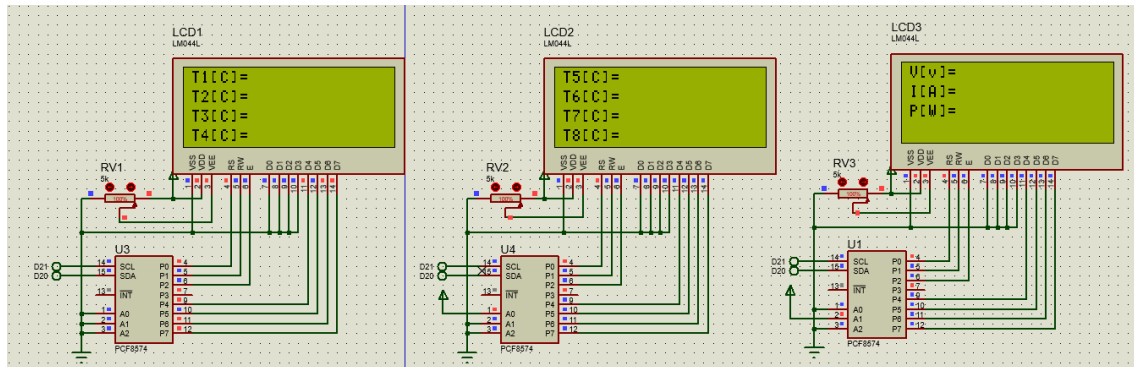


Figura 2.16 Simulación de uso de pantallas.

Para simular el funcionamiento de los sensores de voltaje y corriente se agregó una fuente de voltaje de corriente alterna configurada a 220 (V_{AC}) y se verificó con el osciloscopio virtual como se observa en la Figura 2.17.

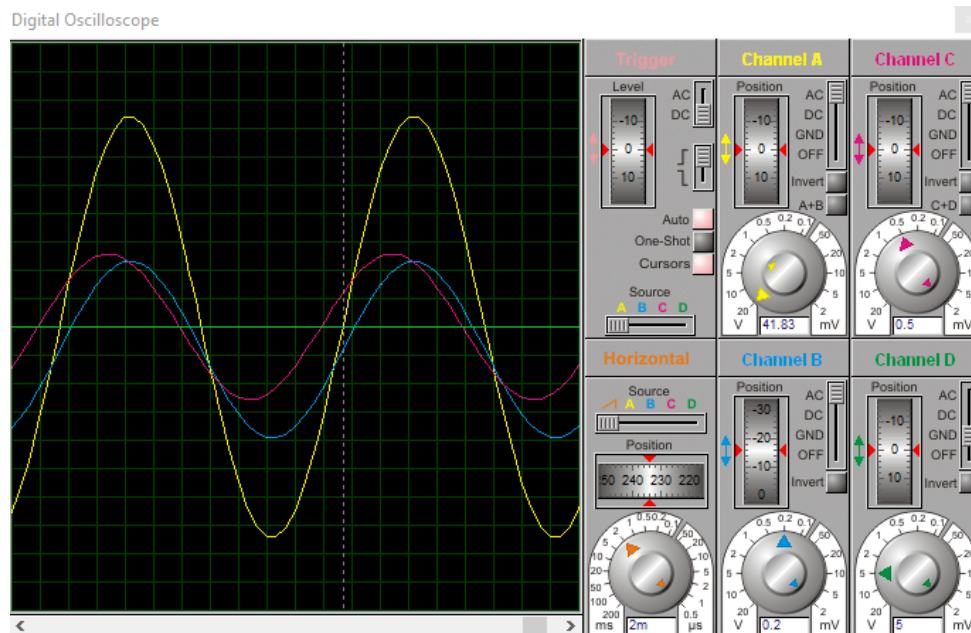


Figura 2.17 Señales en osciloscopio.

Con la gráfica del osciloscopio se verifica la señal de salida los sensores, este dentro del rango de 0 a 5 (V). Además, se realizó cálculos para verificar que el valor de la señal de la salida es correcto.

En Proteus también se simuló los termopares, en la librería están disponibles termopares tipo J y K. Se puede modificar la temperatura de la junta caliente en las propiedades como se observa en Figura 2.18.

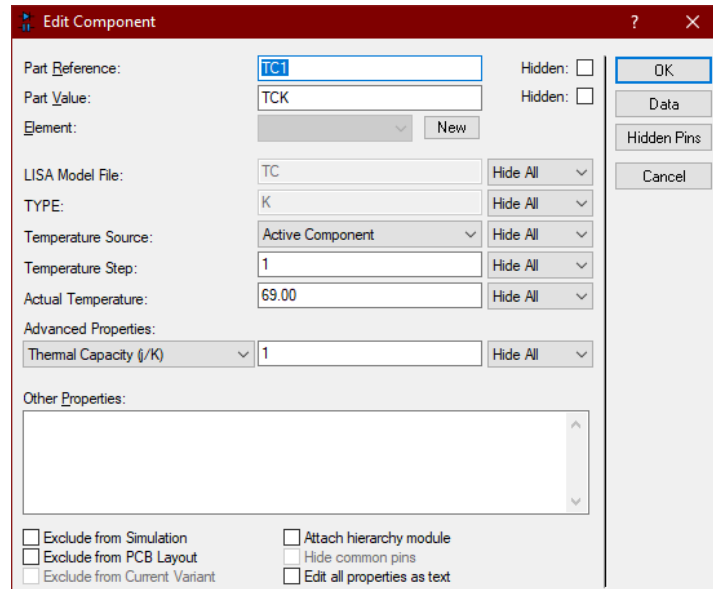


Figura 2.18 Ventana de propiedades del termopar.

En la Figura 2.19, se muestra las propiedades del módulo de acondicionamiento, en las cuales se puede establecer la temperatura ambiente que corresponde a la temperatura de unión fría.

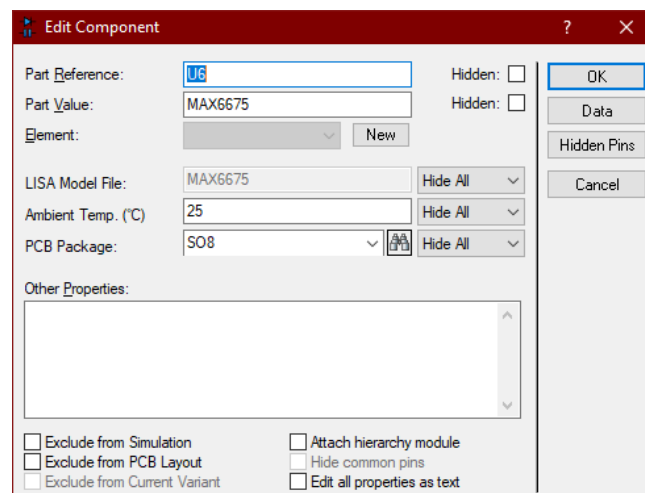


Figura 2.19 Propiedades de MAX6675.

2.4 Implementación

Una vez que se verificó que todo funciona correctamente con la simulación, se procedió a diseñar un PCB para la conexión final de los elementos en el tablero además del diseño propio del tablero.

Circuito impreso

En el mismo programa de Proteus se desarrolla el diseño del PCB, se realizaron 2 placas: una para la conexión del Arduino y la segunda para conectar los módulos, estas placas se conectan entre si con un bus de datos.

La primera placa para la conexión del Arduino es similar a los shield comerciales como la que se observa en la Figura 2.20, siendo esta dedicada a la conexión de un bus de datos a la otra placa.

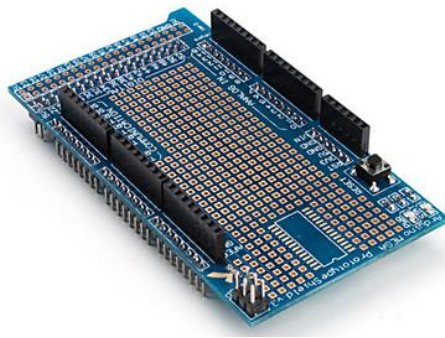


Figura 2.20 Shield Mega Proto [16].

La segunda placa estará dedicada a la conexión de los 8 módulos MAX6675, ZMPT101B, ACS712 y pines de conexión a las pantallas del frontal, borneras para la conexión de la fuente y reguladores de voltaje, además de la conexión del bus de datos.

Del software, se obtuvo el diseño de las pistas de un solo lado y se los puede visualizar en el Anexo VI; el diseño se imprimió a laser en papel fotográfico y mediante calor se transfirió a la placa, posteriormente se quemó la placa, se realizaron perforaciones y soldaron los elementos.

Para las soldaduras se utilizó cautín y alambre para soldar de 60% estaño y 40% plomo.

Ensamble del tablero

Se realizó el diseño en Inventor Professional, para estimar las dimensiones necesarias para la instalación de módulos, placa base, pantallas y fuente de alimentación. En este no se incluye las PCBs ya que, Proteus no entrega un modelo.

Como se observa en la Figura 2.21, se realizó un archivo de ensamble con los modelos de todos los elementos tomando en cuenta como se debe ensamblar cada uno de los módulos su conexión en cada placa y su instalación en el tablero.

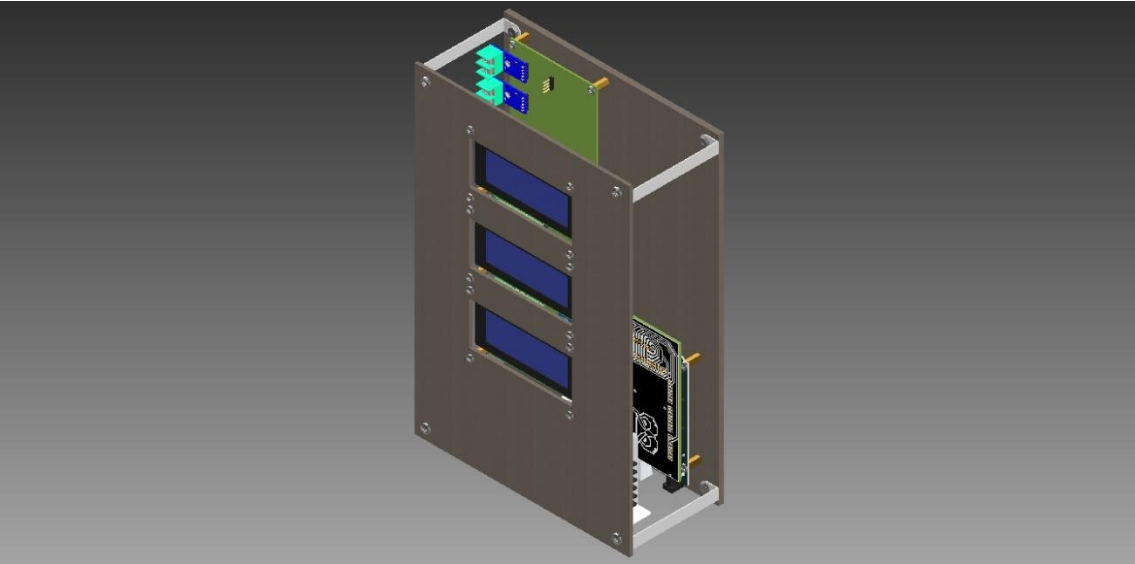


Figura 2.21 Tablero.

En la Tabla 2.17 se detallan las dimensiones del tablero.

Tabla 2.17 Dimensiones brutas del tablero.

Dimensiones del tablero	
Altura	300 (mm)
Ancho	200 (mm)
Profundidad	80 (mm)

En el Anexo VII se muestran los planos de conjunto y despiece del tablero.

La estructura del tablero se la fabricó con planchas de 3 (mm) de espesor; los módulos de acondicionamiento y sensores de voltaje y corriente se instalan en su respectiva placa y esta se ancla al tablero con postes; los drivers se soldaron a las pantallas, posteriormente se empotraron en el frontal del tablero. La fuente de voltaje, el Arduino y su placa se fijó al tablero con postes.

3 RESULTADOS

El proyecto global al estar dividido en cuatro componentes individuales para cada estudiante en cuanto al diseño, para la implementación se lo desarrollo de manera colaborativa.

En el desarrollo del primer componente se realizó el ensamble de la estructura metálica, instalación del equipo Split y conexiones eléctricas como se observa en la Figura 3.1.



Figura 3.1 Equipo instalado en la estructura metálica.

El segundo componente correspondiente al ensamble y puesta en marcha del sistema de refrigeración lo que de forma general contempla: conexión de tuberías del equipo Split, pruebas de fugas, vacío y la carga del refrigerante.

En la Figura 3.2, correspondiente al tercer componente se realizó la instalación de los instrumentos de la marca Full Gauge, conexión de transductores y conexión de comunicación serial.



Figura 3.2 Instrumentos Full Gauge.

Y el cuarto componente correspondiente al sistema de monitoreo con Arduino que se describe en esta sección.

3.1 Implementación del sistema de monitoreo con Arduino

Preparación de módulos

Una vez adquiridos los elementos necesarios para el desarrollo, se revisaron y ensamblaron los módulos.

En los módulos MAX6675, ZMPT101B y ACS712; que tiene pines de conexión en la parte superior, se los retiró y se colocaron en la parte inferior para la conexión en protoboard y posterior instalación en la placa.

Para las pantallas y los módulos PCF8574 se sueldan entre si con pines macho.

Prueba en protoboard

Antes de la implementación del circuito impreso, se realizó una prueba en protoboard, como se observa en la Figura 3.3; las tres pantallas se instalaron en el frontal del tablero; los módulos MAX6675, ACS712 Y ZMPT101B se conectaron en la protoboard directamente al Arduino.

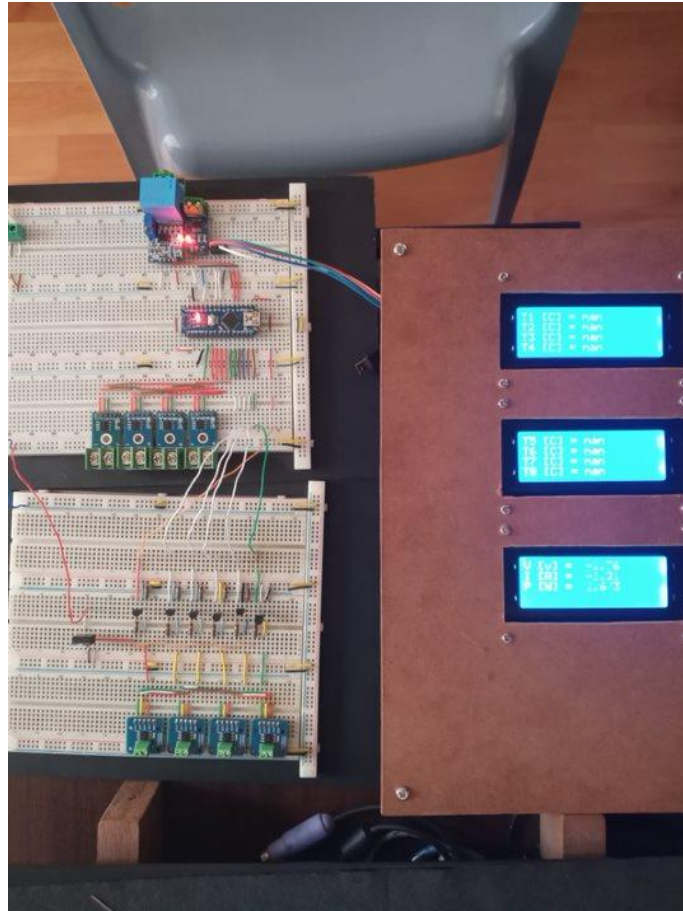


Figura 3.3 Prueba en protoboard.

Circuito impreso

Finalizada la prueba en protoboard, se verificó que el diseño de pistas sea correcto y se quemaron las placas.

Se realizaron perforaciones y se verificó que no existan cortocircuitos o desconexiones con el probador de continuidad del multímetro, posteriormente se soldaron todos los elementos como se observa en la Figura 3.4 y Figura 3.5.

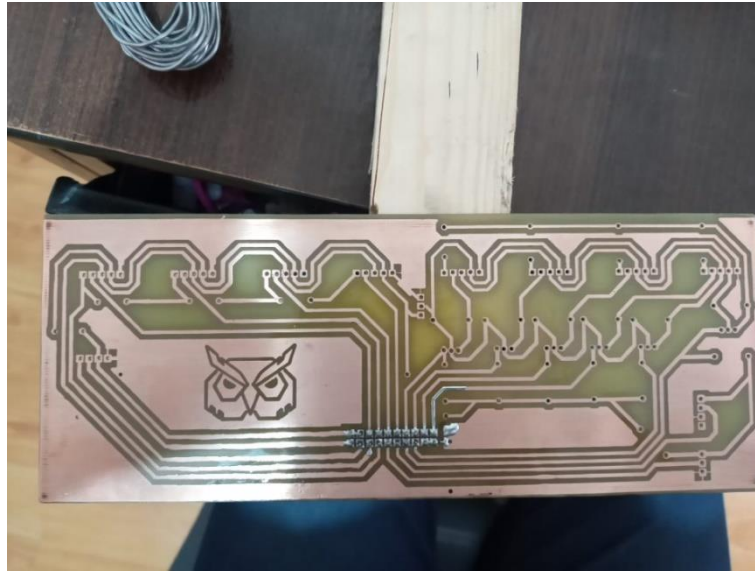


Figura 3.4 Placa de módulos.

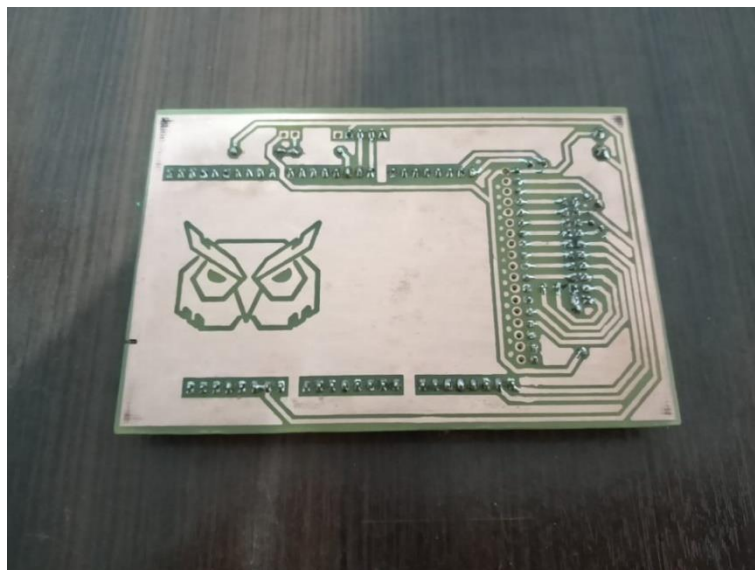


Figura 3.5 Placa de Arduino.

Ensamble del tablero

Para el ensamble del frontal del tablero se utilizó una plancha de 30 * 20 (cm), para la instalación de las pantallas se perforo y realizado ranuras, como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Panel frontal.

En la Figura 3.7, se observa que el montaje se lo realizó con postes de bronce y tornillos.



Figura 3.7 Pantalla.

Las pantallas se conectan entre si dejando un conector libre para la conexión al Arduino como se observa en la Figura 3.8.



Figura 3.8 Conexión entre pantallas.

En el frontal también se agrega la fuente e interruptor como se observa en la Figura 3.9.

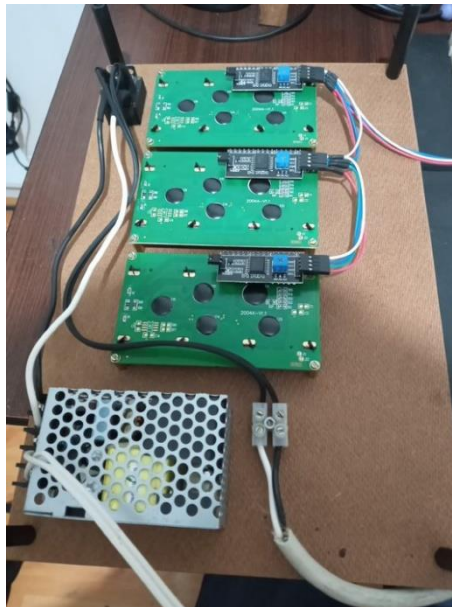


Figura 3.9 Frontal completo.

En la parte interior del tablero se instaló las placas con postes y se conectó mediante el bus de datos, también se conectan la fuente de alimentación como se muestra en Figura 3.10.

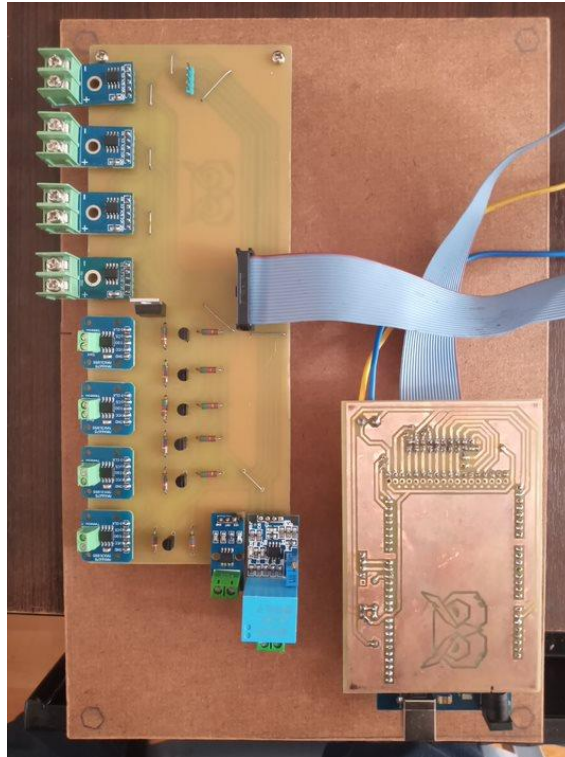


Figura 3.10 Instalación de placas.

Instalación del tablero

El tablero se instala en el frontal del módulo didáctico en conjunto con los instrumentos Full Gauge. En el interior del tablero se instalaron las placas de módulos y Arduino, en el frontal se instalan las 3 pantallas, botón, interruptor y fuente. En la Figura 3.11, Figura 3.12 y Figura 3.13; se muestra los elementos que constituyen el tablero y en la Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3; se muestra la descripción de cada elemento respectivamente.

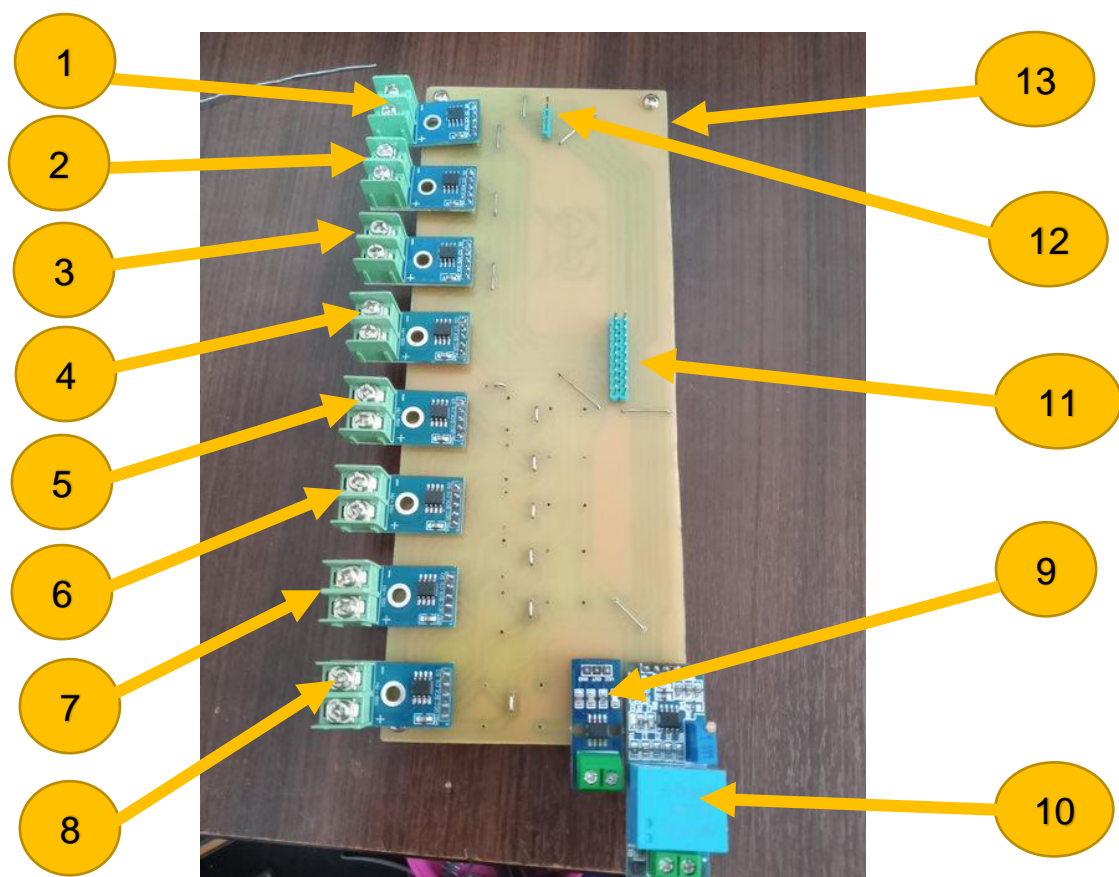


Figura 3.11 Elementos en placa de módulos.

Tabla 3.1 Lista de partes de placa de módulos.

Lista de elementos	
Número	Descripción
1	MAX6675
2	MAX6675
3	MAX6675
4	MAX6675
5	MAX6675
6	MAX6675
7	MAX6675
8	MAX6675
9	ACS712
10	ZMPT101B
11	Pines bus de datos
12	Pines bus pantallas
13	Placa de módulos

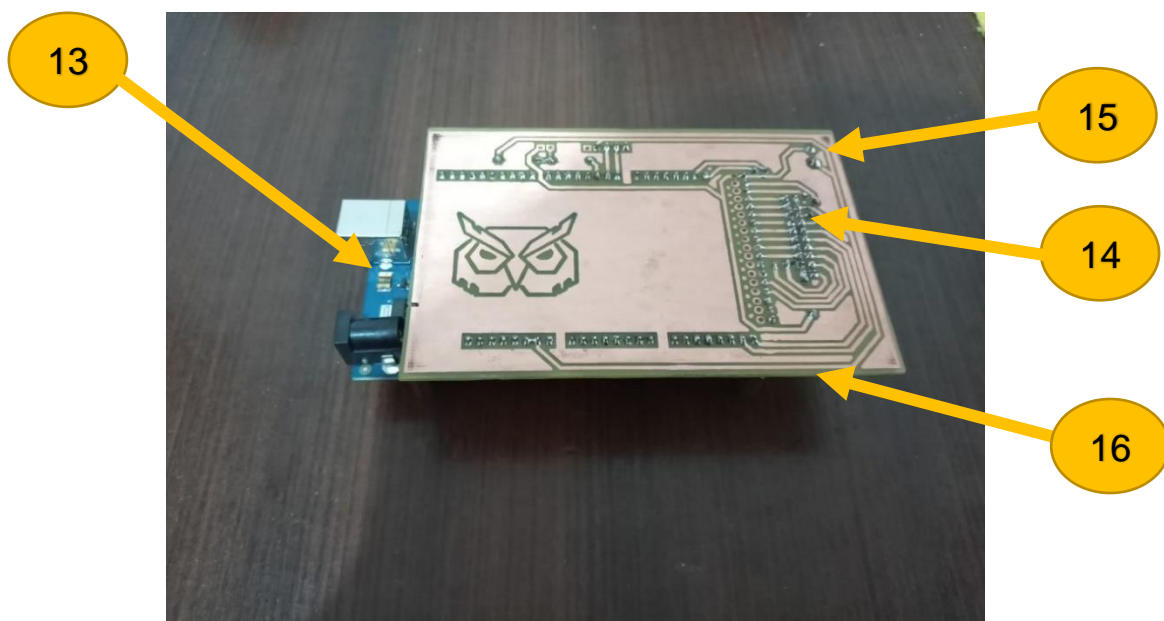


Figura 3.12 Elementos placa de Arduino.

Tabla 3.2 Lista de partes de placa de Arduino.

Lista de elementos	
Número	Descripción
13	Arduino Mega
14	Pines bus de datos
15	Bornera de alimentación
16	Placa de Arduino

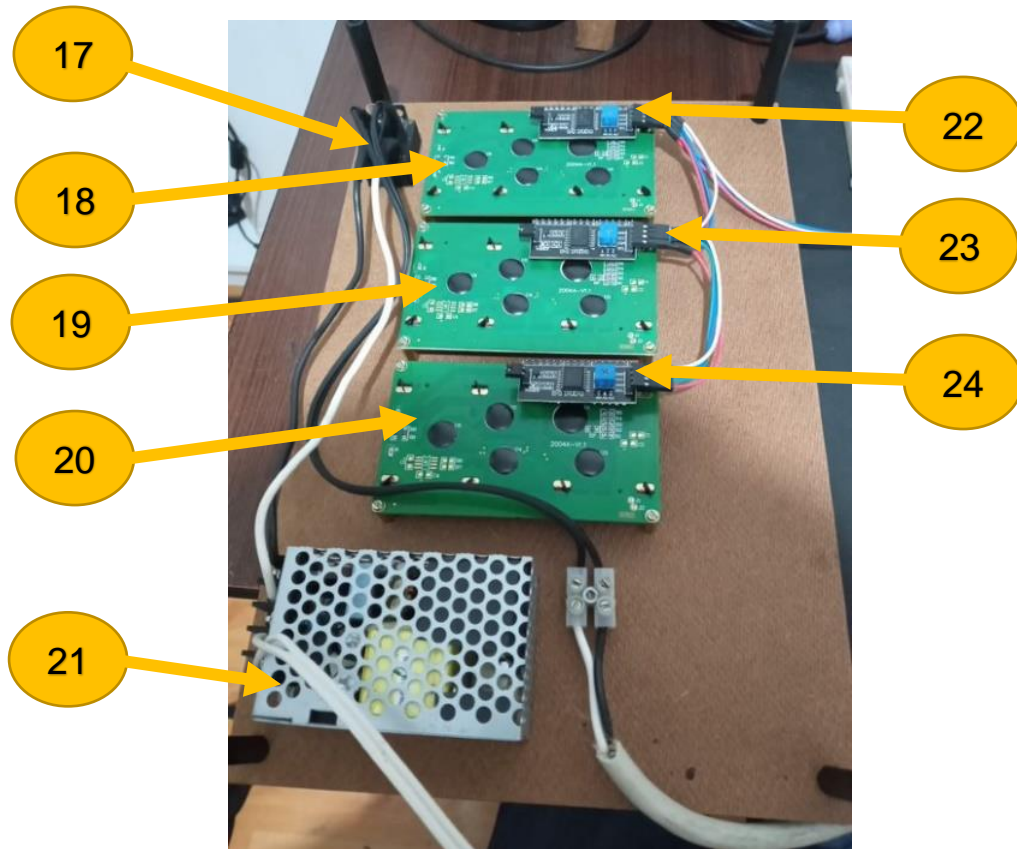


Figura 3.13 Elementos del frontal.

Tabla 3.3 Lista de partes del frontal.

Lista de elementos	
Número	Descripción
17	Interruptor
18	Pantalla
19	Pantalla
20	Pantalla
21	Fuente 5V
22	PCF8574
23	PCF8574
24	PCF8574

Instalación de termopares

La instalación del termopar se la realizo separando cada alambre y enrollándolo en la tubería como se muestra en la Figura 3.14, esta al ser de cobre permite el paso de la electricidad; de este modo la medición del termopar corresponde a la temperatura de la sección de tubería entre los dos puntos de conexión de los alambres[17].



Figura 3.14. Instalación de termopares.

A diferencia de la instalación convencional donde ambos alambres están conectados directamente y la temperatura medida es puntual a ese punto de conexión.

3.2 Pruebas de funcionamiento

Comunicación pantallas

Una vez conectadas las pantallas LCD con su respectivo controlador se configuró la dirección de cada módulo. Para revisar la dirección se utilizó un código de prueba propio de la librería I2C.

Se conectó y cargó parte del algoritmo en el Arduino para mostrar únicamente el mensaje inicial de presentación y las etiquetas como se observa en la Figura 3.15.

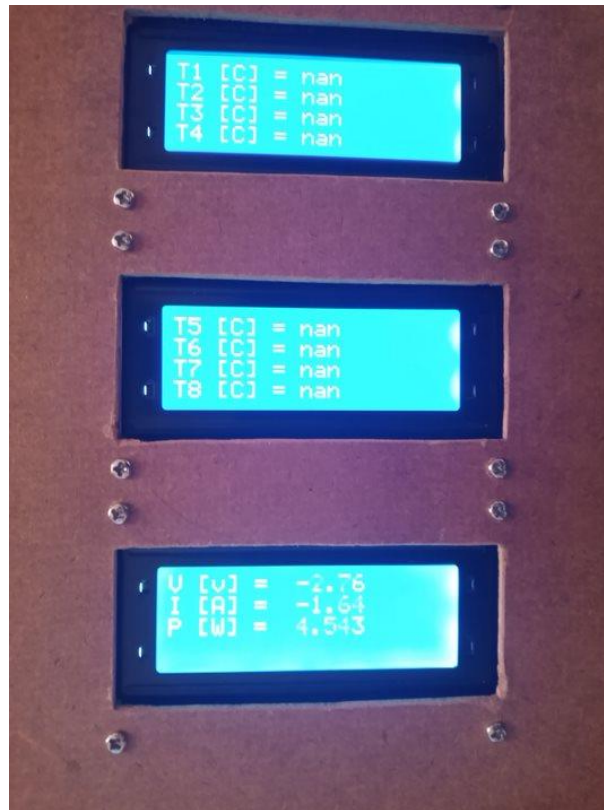


Figura 3.15 Etiquetas en pantallas.

Lectura de sensores

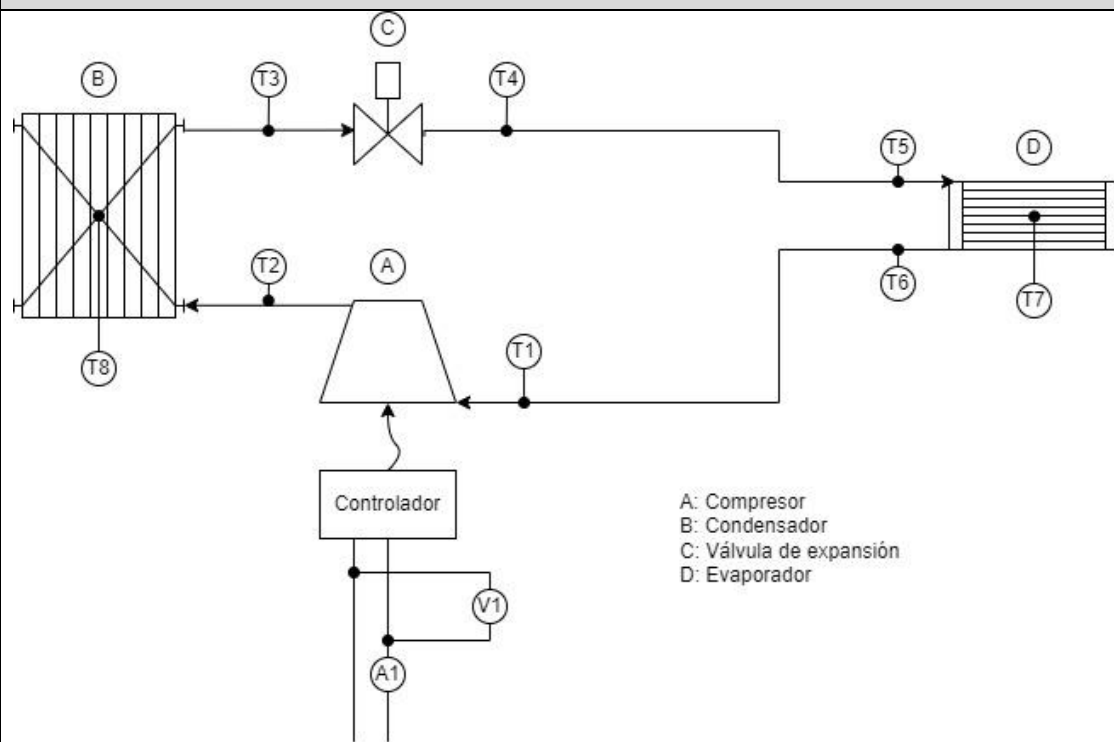
Para verificar que los sensores envíen datos al Arduino se modificó el algoritmo para enviar los datos al computador o celular con comunicación serial.

En una segunda prueba se conectó a la pantalla y se verificó el funcionamiento completo.

Toma de datos

Una vez ya instalado el sistema de monitoreo con Arduino, se realizan pruebas de funcionamiento del módulo completo, para la prueba se fija una temperatura de control en el equipo Split y los datos se toman de forma manual anotándolos desde las pantallas, en la Tabla 3.4, se observa el diagrama del equipo, los datos de presión del sistema Full Gauge y datos de temperatura del sistema de Arduino.

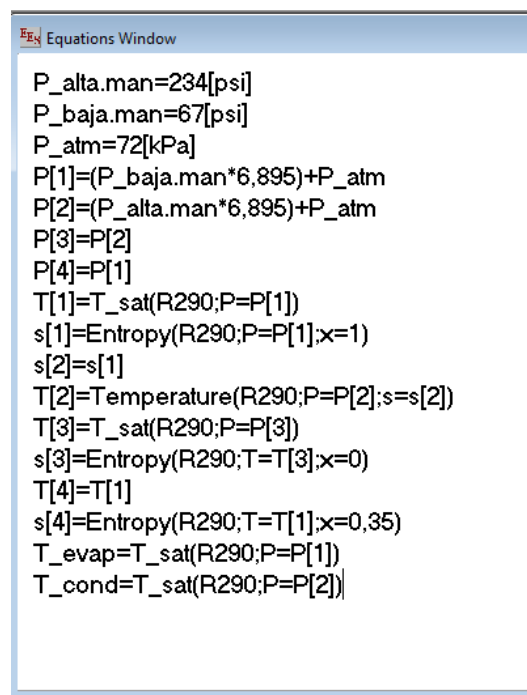
Tabla 3.4 Datos del módulo didáctico.

Hoja de datos			
Esquema módulo didáctico			
 <p>A: Compresor B: Condensador C: Válvula de expansión D: Evaporador</p>			
Datos Presión			
	(PSIG)	(kPa man)	(kPa abs)
P alta manómetro	240	1654.74	1726.8
P alta transductor	234	1613.37	1685.43
P baja manómetro	70	482.63	554.65
P baja transductor	67	461.94	533.96
Datos Temperatura			
Pto.	Descripción	(°C)	
1	Entrada del compresor	15.5	
2	Salida del compresor	59.0	
3	Salida condensador	41.5	
4	Salida válvula de expansión	16.5	
5	Entrada del evaporador	6.25	
6	Salida del evaporador	7	
7	Evaporador	6.5	
8	Condensador	40.75	

Análisis termodinámico del sistema tipo Split

Con los datos obtenidos de temperatura, presión, se realiza el análisis teórico del ciclo de refrigeración. Para el análisis se utilizó el programa Engineering Equation Solver (EES), para realizar los calculo para determinar las propiedades termodinámicas del refrigerante R290.

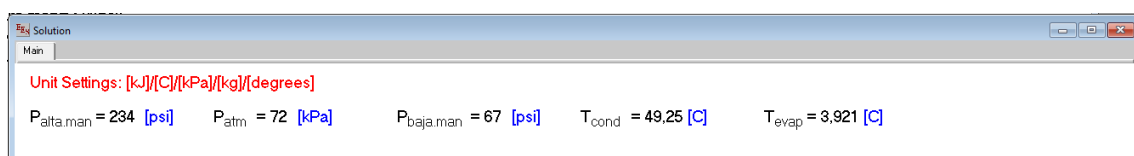
En el programa se ingresan los valores de presión de alta y baja en (psig), y se calcula la presión absoluta en (kPa) como se muestra en Figura 3.16.



```
P_alta.man=234[psi]
P_baja.man=67[psi]
P_atm=72[kPa]
P[1]=(P_baja.man*6,895)+P_atm
P[2]=(P_alta.man*6,895)+P_atm
P[3]=P[2]
P[4]=P[1]
T[1]=T_sat(R290;P=P[1])
s[1]=Entropy(R290;P=P[1];x=1)
s[2]=s[1]
T[2]=Temperature(R290;P=P[2];s=s[2])
T[3]=T_sat(R290;P=P[3])
s[3]=Entropy(R290;T=T[3];x=0)
T[4]=T[1]
s[4]=Entropy(R290;T=T[1];x=0,35)
T_evap=T_sat(R290;P=P[1])
T_cond=T_sat(R290;P=P[2])
```

Figura 3.16 Ecuaciones en EES.

En la Figura 3.17, se observa la ventana de resultados donde se aprecia la temperatura de evaporación y de condensación. Notando que la temperatura de evaporación es similar a la temperatura del punto 5, 6 y 7; en cuanto a la temperatura de condensación es similar a la de los puntos 3 y 8.



```
Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]
P_alta.man = 234 [psi]   P_atm = 72 [kPa]   P_baja.man = 67 [psi]   T_cond = 49,25 [C]   T_evap = 3,921 [C]
```

Figura 3.17 Ventana de resultados.

Con los resultados del EES y datos del tablero, se graficó la campana de saturación del R290, las marcas de temperatura del módulo de Arduino y los puntos del ciclo de refrigeración ideal. Esto se observa en la Figura 3.18.

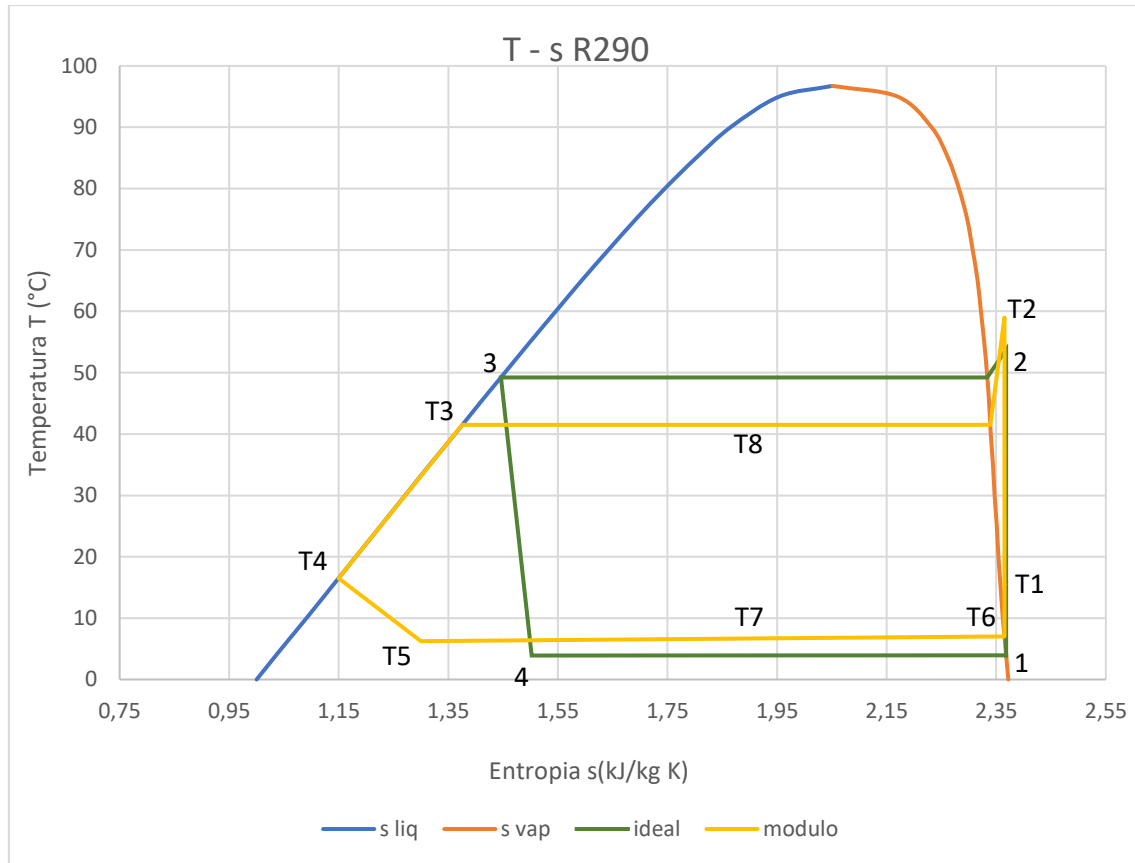


Figura 3.18 Curva T – s R290.

De la Figura 3.18, se puede deducir que de la T6 a T1 correspondiente a la tubería de la salida del evaporador a la entrada del compresor existe calentamiento; desde T4 a T5 correspondiente a la tubería de la salida de la válvula de expansión a la entrada del evaporador, ocurre el proceso de expansión del refrigerante por tal razón en el punto T4 donde empieza el proceso de expansión la temperatura es alta de esta concluye que la expansión se realiza en todo el trayecto de la tubería.

En T7 y T8 correspondientes al evaporador y condensador, la temperatura medida difiere de la calculada por que la medición se la realizó con el termopar instalado en la superficie de los canales del evaporador y condensador, además en estos elementos se tiene el flujo de aire de los ventiladores para el intercambio de calor.

Es necesario mencionar que la presión se mide en contacto con el fluido de trabajo mientras que la temperatura se mide en la superficie de la tubería, por tal motivo la temperatura calculada en función de la presión tiene una variación con respecto a la temperatura medida con el sistema de monitoreo.

Análisis eléctrico del sistema tipo Split

Con los datos de voltaje, corriente y potencia se puede analizar el comportamiento de todo el equipo en sus diferentes etapas de funcionamiento.

Tabla 3.5 Parámetros eléctricos.

Parámetros eléctricos				
Condición	Medidor			
	General		Tablero	
	(V)	(A)	(V)	(A)
Split apagado	246	0.29	245.01	0.2
Ventilador prendidos	245	0.58	242.25	0.53
Arranque compresor	243	2.8	237.78	2.6
Estable	244	4.9	244.69	4.55

Cuando el equipo esta apagado el consumo es de 0.3 (A), ya que sólo se alimenta el controlador del equipo, al encender el equipo en el modo de enfriamiento se encienden inicialmente los ventiladores del condensador y evaporador subiendo el consumo a 0.5 (A), posterior a ello en función de la temperatura de control se enciende el compresor.

El controlador modifica la velocidad del compresor por lo cual tiene un arranque suave a 2.7 (A), el equipo pasa a un estado transitorio hasta que el compresor llega a su condición de trabajo cuando las presiones de alta y baja se estabilizan teniendo un consumo de 4.7 (A)

Existe una diferencia entre los valores del analizador de energía y las mediciones realizadas con el Arduino ya que, uno corresponde a la potencia del módulo en general y el otro valor solo a la unidad condensadora; además de que el medidor general es un dispositivo comercial y el implementado en el sistema de monitoreo es un módulo con acondicionamiento por hardware y software.

Como evidencia del proceso de implementación y fase de pruebas del sistema de monitoreo con Arduino Mega del módulo didáctico, se presenta un video explicativo. Se lo puede acceder escaneando el código QR que se presenta en la Figura 3.19.



Figura 3.19 QR video implementación y funcionamiento.

(https://youtu.be/k_otxGALt8Y)

3.3 Manual de uso y mantenimiento

Para asegurar correcto uso y manipulación del sistema de monitoreo implementado se redactó un manual de uso y mantenimiento en el cual se detallan los lineamientos a seguir para el uso adecuado además de las tareas necesarias para el mantenimiento preventivo y correctivo.

Los manuales respectivos se encuentran en el Anexo VIII, también se presenta un video explicativo del uso y mantenimiento que se presenta en la Figura 3.20.

.



Figura 3.20 QR video manual uso y mantenimiento.

(<https://youtu.be/tVxbecmtlNk>)

4 CONCLUSIONES

- Para el sistema de monitoreo se ha decidido medir temperatura en ocho puntos del ciclo de refrigeración, y permite determinar los cambios que sufre el refrigerante en los distintos componentes del ciclo de refrigeración, así como en los tramos de tubería.
- Las pantallas LCDs se pueden conectar directamente al Arduino y ocupan seis pines para la comunicación de cada una, mencionado esto se implementó el módulo que PCF8574 dedicado al control de la LCD reduciendo el número de conexión a dos para conectar las tres LCDs mediante la comunicación I2C.
- Al implementar varios módulos de acondicionamiento MAX6675, que trabajan con comunicación SPI, se implementó una configuración de múltiples esclavos conectando en paralelo los pines SCK y MISO, y cada pin SS se conecta individualmente a un pin del Arduino.
- Arduino por defecto tiene definidos los pines D50 (MISO), D51 (MOSI), D52 (SCK) y D53 (SS) para la comunicación SPI, al implementar la librería SPI.h, se puede configurar mediante código cualquiera de los pines digitales como pines dedicados como en el algoritmo implementado donde D23 (SCK), D25 (MISO), D27, D29, D31, D33, D35, D37, D39 y D41 (SS).
- Las temperaturas registradas por el tablero muestran una variación con el valor esperado obtenido mediante cálculo esto se debe a que el valor registrado corresponde a la temperatura superficial de la tubería y no a la del refrigerante.
- Para evitar que la temperatura ambiente afecte a la medida de los termopares se cubren los tramos de tubería donde con rubatex que tiene una conductividad térmica de 0.0034 (W/mK), considerándolo un material aislante térmico.
- Los termopares se instalaron en la tubería de cobre enrollando cada alambre por separado comprobando continuidad con un multímetro; se lo instaló de tal manera porque la tubería de cobre tiene un valor de resistividad de 0.0176 ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$) siendo uno de los mejores conductores eléctricos, además tiene una conductividad térmica de 390 (W/mK) siendo uno de los mejores metales conductores térmicos.

5 RECOMENDACIONES

- Para alimentar el sistema se implementó una fuente de voltaje externa que se conecta directamente a los PCBs energizando por separado los módulos, pantallas y Arduino evitando utilizar la salida de voltaje propia, ya que esta está limitada a 500 (mA).
- Verificar la dirección I2C de los módulos PCF8754 con el datasheet o con el código de ejemplo de la librería de Arduino.
- Para el diseño de las placas en Proteus no usar la herramienta de Auto-placer y Auto-router, ya que estas opciones configuran la placa a doble lado, con pistas a 90 (deg); y antes de imprimir en el papel fotográfico verificar que el tamaño y orientación sea el adecuado.
- Al momento de instalar los termopares lijar y limpiar para eliminar el óxido de la superficie de la tubería, para que los alambres logren buen contacto, posteriormente colocar rubatex cubriendo totalmente el termopar y sus alrededores.
- Al desarrollar el algoritmo, implementar funciones y subrutinas para ejecutar partes específicas del algoritmo como leer la información de los sensores de temperatura, cálculo de voltaje, corriente y potencia, presentar datos en pantallas, etc. para mejorar el tiempo de respuesta del sistema.
- Un indicativo de que las medidas de temperatura son correctas cuando el módulo este encendido: es que el valor de T5, T6 y T7 son similares a la temperatura de evaporación entre 3 a 5 (°C); la T4 y T8 son similares a la temperatura de condensación entre 42 a 46 (°C).

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. L. Alva y N. F. Alcorta, *SISTEMAS EMBEBIDOS Guía metodológica para su desarrollo*. 2020.
- [2] A. Creus, *Instrumentación industrial*. 2010.
- [3] Arduino, “Arduino ® MEGA 2560 Rev3”. pp. 1–18, 2021.
- [4] Maxim Integrated Products, “MAX31855 Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter”. pp. 1–13, 2011.
- [5] Maxim Integrated Products, “Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)”. pp. 1–8, 2002.
- [6] Allegro MicroSystems, “ACS712 Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor”. pp. 1–14, 2010.
- [7] InnovatorsGuru, “ZMPT101B Micro Precision Voltage Transformers”. [En línea]. Available: <https://innovatorsguru.com/zmpt101b/>
- [8] Y. Cengel y M. Boles, *Termodinámica*. 2009.
- [9] J. Medina, “¿Cómo funciona un aire acondicionado minisplit?”, 2022. <https://bit.ly/3AvVC3f> (consultado jun. 05, 2022).
- [10] Godrej, “Inverter AC with green balance technology”. pp. 1–49, 2018.
- [11] C. Alexander y M. Sadiku, *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. McGRAW-HILL, 2006.
- [12] A. Jiménez, *Sensores y Actuadores*. Grupo Editorial Patria, 2014.
- [13] C. Belove, *Enciclopedia de la Electrónica Ingeniería y Técnica*. Grupo Editorial Oceano, 1992.
- [14] Texas Instruments, “Remote 8-Bit I / O Expander for I 2 C Bus”. pp. 1–26, 2008.
- [15] Handson Technology, “User Guide I2C Serial Interface 1602 LCD Module”. Consultado: ago. 26, 2022. [En línea]. Available: www.handsontec.com
- [16] Arduino, “Shield - MEGA Proto KIT”, 2022. <https://bit.ly/3KoWACG> (consultado jun. 15, 2022).

- [17] H. Zúñiga, "Modelación termodinámica y optimización energética de un ciclo de refrigeración por absorción difusión". pp. 1–121, 2017.

7 ANEXOS

ANEXO I. Certificado de Originalidad

ANEXO II. Certificado de Funcionamiento de Trabajo de Integración Curricular.

ANEXO III. Diagramas eléctricos.

ANEXO IV. Algoritmo de Arduino.

ANEXO V. Plano de tuberías e instrumentación.

ANEXO VI. Diseño de placas de circuito impreso.

ANEXO VII. Planos de conjunto y despiece.

ANEXO VIII. Manual de uso y mantenimiento.