

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE CARGA RESISTIVA
CON CONTROL Y MONITOREO DE PÉRDIDAS POR EFECTO
JOULE.**

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero (a) Eléctrico (a)

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR (A):

Alex Adrian Picuasi Yamberla

DIRECTOR (A):

Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc

Ibarra – Ecuador 2024



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1005086507		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Picuasi Yamberla Alex Adrian		
DIRECCIÓN:	Otavalo - Karabuela – Picuasi Pugro		
EMAIL:	aapicuasii@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0992721462

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE CARGA RESISTIVA CON CONTROL Y MONITOREO DE PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE.
AUTOR (ES):	Picuasi Yamberla Alex Adrian
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	11/07/2025
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero(a) Eléctrico(a)
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Omar Darío Chacón Herrera MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de Julio de 2025

EL AUTOR:

(Firma).....
Alex Adrian Picuasi Yamberla

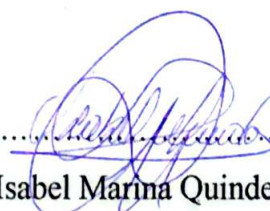
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, Isabel Marina Quinde Cuenca en calidad de director del señor estudiante Alex Adrian Picuasi Yamberla certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE CARGA RESISTIVA CON CONTROL Y MONITOREO DE PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE."

Para la obtención del título de Ingeniero(a) Eléctrico(a), aprobado la defensa, impresión y empastado.



.....

MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****3. DEDICATORIAS**

A mis padres y a mi hermano, por su apoyo y amor incondicional en cada etapa de mi vida, tanto personal como académica. En especial a mi padre, cuyo esfuerzo, ejemplo y compromiso diario han sido una fuente constante de inspiración. Su dedicación me enseñó el valor del trabajo, la disciplina y la constancia, pilares fundamentales para alcanzar esta meta.

A la pequeña huellita naranja, cuya compañía silenciosa y afectuosa me acompañó durante las largas jornadas de estudio. A pesar de su desconocimiento del tema, su presencia fue un refugio emocional indispensable.

A mis amigos y compañeros Bryan, Pablo, Alex, Daniela, Naomi, y Santiago cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental para la realización de este trabajo.

A mis docentes por su paciencia y apoyo para brindarme su guía y conocimientos que fueron fundamentales para esta investigación.

Y, sobre todo, a Dios por darme la fuerza y perseverancia para alcanzar esta meta.

Este logro también es de ustedes.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****4. AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que me brindaron su apoyo y orientación durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Primeramente, agradezco a mi director de tesis, Isabela Mariana Quinde Cuenca, por su valiosa orientación y paciencia, las cuales fueron esenciales para la finalización de este trabajo.

También agradezco a mis compañeros, amigos y colegas, quienes me brindaron su compañía y palabras de apoyo que me ayudaron en momentos difíciles.

Agradezco también a la institución que me brindo la oportunidad de estudiar en su prestigiosa institución, que también me pudo brindar el acceso a recursos bibliográficos y herramientas necesarias para realizar este trabajo.

Finalmente agradezco a mi padre, quien jamás dejó que me faltara nada durante la carrera, a mi madre quien siempre me apoyó y a mi hermano quien siempre supo brindarme su orientación y motivación necesaria para culminar con el presente trabajo.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



INDICE DE CONTENIDOS

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	II
2. CONSTANCIAS	II
3. DEDICATORIAS	IV
4. AGRADECIMIENTOS	V
INDICE DE CONTENIDOS	6
INDICE DE FIGURAS	9
INDICE DE TABLAS	11
RESUMEN	13
Palabras clave	13
ABSTRACT	14
Keywords	14
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 Problema de investigación.	15
1.1.1 Problemática a investigar.	15
1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación.....	16
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Alcance y delimitación	17
1.4 Justificación	18
CAPITULO II	
MARCO TEÓRICO	
2.1 Contextualización	20
2.2 Ley de Joule	23
2.2.1 Causas del efecto Joule	25
2.2.2 Impacto del efecto Joule.....	29
2.2.3 Factores del efecto Joule	32



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



2.2.4 Métodos de control del efecto Joule.....	34
2.3 Equilibrio térmico y transferencia de calor.....	37
2.3.1 Definición de equilibrio térmico.	37
2.3.2 Influencia del entorno.....	37
2.3.3 Relación entre energía disipada y temperatura.	38

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción.	40
3.2 Metodología.	40
3.2.1 Métodos.....	40
3.2.2 Procedimiento.....	43
3.3 Ecuaciones	43
3.4 Determinación de parámetros	47
3.5 Diseño del módulo	48
3.4.1 Selección de componentes.	48
3.4.2 Diseño del circuito de conmutación.	55
3.6 Materiales.....	56
3.6.1 Componentes.....	57
3.6.2 Equipos de Medición.....	62
3.6.3 Software	63

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Diseño del módulo de carga resistiva.	65
4.1.1 Dimensionamiento del Banco de resistencias.	65
4.1.2 Diseño de diagramas de conexión.	68
4.1.3 Diseño del módulo del banco de carga resistiva	80
4.1.4 Dimensionamiento del fusible de protección	91
4.2 Pruebas experimentales y recopilación de datos.....	92
4.2.1 Corrientes obtenidas.....	93
4.2.2 Temperaturas Obtenidas.....	94



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



4.2.3 Energía disipada	95
4.3 Análisis de datos	96
4.3.1 Comparación de corrientes.....	96
4.3.2 Comparación de temperaturas.	99
4.3.2 Comparación de energía disipada.	103
4.3.3 Comparación de Corriente y Energía disipada de los Grupos 1 y 2.	107
Conclusiones.....	110
Recomendaciones	112
Bibliografía.....	113
Anexos	114



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

INDICE DE FIGURAS



Figura 1 Flujograma de trabajo	43
Figura 2 Conmutación de Resistencia	56
Figura 3 Resistencias.....	57
Figura 4 Sensor de corriente ACS712ELCTR-20A-T	58
Figura 5 Arduino Mega 2560	58
Figura 6 Módulo Relé 5V	59
Figura 7 Resistencia de potencia	59
Figura 8 Puertos Jack Banana.....	60
Figura 9 Ventiladores de PC.....	60
Figura 10 Fusible de vidrio.....	61
Figura 11 Sensor de temperatura DS18B20	61
Figura 12 Termómetro de Cocina.....	62
Figura 13 Multímetro digital	62
Figura 14 Simulador Proteus	63
Figura 15 AUTOCAD	64
Figura 16 Diagrama general	71
Figura 17 Partes del circuito.....	72
Figura 18 Circuitos de Activación.....	73
Figura 19 Cursor.....	74
Figura 20 Bus 1 Wire (Sensores DS18B20).....	75
Figura 21 "Pines conectados a los Sensores de Corriente"	75
Figura 22 Sensores de corriente A0 al A6.....	76
Figura 23 Sensores de corriente A7 al A12.....	76
Figura 24 Sensor de corriente general	76
Figura 25 Ventilación	77
Figura 26 LCD de Referencia.....	78
Figura 27 Banco de Carga Resistiva.....	79



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



Figura 28 Arduino Mega2560 en Proteus.....	80
Figura 29 Ambiente Abierto.....	81
Figura 30 Ambiente Cerrado	83
Figura 31 Comparación de Resultados.....	88
Figura 32 Exterior del módulo	89
Figura 33 Entrada de Multímetro	89
Figura 34 Vista interna de la Resistencia	90
Figura 35 Control del módulo	91
Figura 36 Módulo de carga resistiva con control y monitoreo.....	92
Figura 37 Comparación de corrientes Teóricas.....	97
Figura 38 Comparación de corrientes medidas	98
Figura 39 Comparación de Temperaturas teóricas o ideales.....	101
Figura 40 Comparación de Temperaturas medidas	101
Figura 41 Comparación de la Energía Disipada en las resistencias	104
Figura 42 Energía Disipada Medida.....	105



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

INDICE DE TABLAS



Tabla 1 Resistividad de los materiales más comunes.....	26
Tabla 2 Temperatura de Transición (Tc) en Superconductividad	28
Tabla 3 Especificaciones eléctricas del panel solar	47
Tabla 4 Sensores de Corriente de Efecto Hall	49
Tabla 5 "Series de resistencias"	50
Tabla 6 Comparativa de Sensores de Temperatura disponibles en el Mercado	52
Tabla 7 Comparación de Relés.....	52
Tabla 8 Comparativa de varios Arduino del mercado	54
Tabla 9 Resistencias Disponibles	65
Tabla 10 Potencias conforme a la tolerancia de la resistencia	67
Tabla 11 Valores estimados a diferentes voltajes.....	67
Tabla 12 Pines Asignados	70
Tabla 13 Pines disponibles	71
Tabla 14 Datos Ambiente Abierto.....	82
Tabla 15 Datos Ambiente Cerrado	83
Tabla 16 Ajuste de h.....	86
Tabla 17 Temperatura Final Teórica	87
Tabla 18 Corrientes Medidas.....	93
Tabla 19 Corriente General	94
Tabla 20 Temperaturas Unitarias	94
Tabla 21 Energía disipada	95
Tabla 22 Energía Disipada por grupo.....	96
Tabla 23 Corriente teórica o ideal	97
Tabla 24 Porcentaje de error entre las corrientes medidas y calculadas	99
Tabla 25 Temperaturas teóricas o ideales.....	100
Tabla 26 Porcentaje de error entre medidas calculadas y medidas	102
Tabla 27 Comparación de temperaturas	103



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



Tabla 28 Energía Disipada Estimada o Teórica	103
Tabla 29 % Error de Disipación de Energía	105
Tabla 30 Resultados Individuales.....	106
Tabla 31 Corriente General ideal o Teórica	107
Tabla 32 %Error de la Corriente General de los Grupos 1 y 2.....	107
Tabla 33 Energía Disipada Teórica o ideal general.....	108
Tabla 34 %Error de la Energía Disipada de los Grupos 1 y 2.....	109
Tabla 35 Resumen de recursos y presupuesto por rubro	143

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****RESUMEN**

El efecto Joule es un efecto bastante común en sistemas eléctricos tanto AC como DC, en especial en este último. Este efecto representa una fuente de ineficiencia y desperdicio de la energía eléctrica, por tanto, es necesario que los aspirantes al título de ingeniero eléctrico deban estudiarlo y comprenderlo a totalidad. El presente trabajo tiene la finalidad de elaborar un módulo interactivo con un enfoque integral que considere los mecanismos de control y monitoreo de las pérdidas por efecto Joule para tener el control a tiempo real que permita cumplir esta función educativa, además de ser un equipo útil en el estudio de la eficiencia energética o en la realización de pruebas de equipos y dispositivos de generación eléctrica que trabajen con corriente en DC. Mediante este trabajo se investigará algunos métodos de mitigación del efecto Joule. La metodología empleada permitió seleccionar la forma más practica del control de este efecto, misma que también deja al usuario poder experimentar con los equipos eléctricos al exponerlos a diferentes valores de carga resistiva que se desee con la finalidad de simular diferentes situaciones a las que se puede enfrentar de manera controlada. Finalmente, se validan los datos comparando los resultados calculados con los observados durante las pruebas de funcionamiento, lo que permite demostrar la confiabilidad del módulo y su correcto funcionamiento.

Palabras clave: Efecto Joule, Control, Monitoreo, Carga Resistiva, Módulo

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****ABSTRACT**

The Joule effect is a common phenomenon in both AC and DC electrical systems, particularly in DC systems. This effect represents a source of energy loss and reduced efficiency; therefore, it is essential for electrical engineering students to study and fully understand it. The objective of this work is the development of an interactive module with a comprehensive approach that considers the control and monitoring mechanisms of losses due to the Joule effect, enabling real-time control to fulfill this educational function. In addition, it serves as a useful tool for the study of energy efficiency and for conducting tests on equipment and devices for electrical generation that operate with direct current. Through this work, several methods for mitigating the Joule effect will be investigated. The methodology employed allowed the selection of the most practical form of control for this effect, which also enables users to experiment with electrical equipment by exposing it to different resistive load values in order to simulate, in a controlled manner, various situations that may be encountered. Finally, the data is validated by comparing the calculated results with those observed during the functional tests, demonstrating the reliability of the module and its proper operation.

Keywords: Joule Effect, Control, Monitoring, Resistive Load, Module.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****CAPITULO I****INTRODUCCIÓN**

El primer capítulo tiene como objetivo establecer el contexto general del estudio, definiendo el problema de investigación, así como los objetivos que guían el desarrollo del trabajo. Además, se delimitan el alcance y las restricciones que orientan el proyecto, permitiendo un enfoque claro y específico.

Tema

Implementación de un módulo de carga resistiva con control y monitoreo de pérdidas por efecto Joule.

1.1 Problema de investigación.

A continuación, se presenta la problemática a investigar y la formulación de la pregunta de investigación.

1.1.1 Problemática a investigar.

En el ámbito de la ingeniería eléctrica y electrónica, la eficiencia energética y el control de pérdidas son aspectos fundamentales. Según la empresa Venture Electronics: Las pruebas de componentes electrónicos, ya sea que se realicen durante las fases de I+D (Investigación y Desarrollo) y fabricación del producto o después, son una parte crucial para garantizar la funcionalidad y la vida útil de los dispositivos y sistemas eléctricos. Estas pruebas ayudan a identificar componentes defectuosos y pueden utilizarse para sugerir mejoras en el producto [1]. También es necesario prevenir situaciones peligrosas provocadas por las enormes cantidades de energía liberada en forma de calor (efecto Joule) que pueden llegar a existir en el conductor por motivos de seguridad, ya que representan una significativa fuente de ineficiencia en muchos dispositivos y sistemas eléctricos. Estas pérdidas no solo afectan el rendimiento energético, sino que, al causar

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

sobrecalentamiento, perjudican a los componentes del sistema, comprometiendo su vida útil y aumentando los costos operativos y de mantenimiento.

A pesar de los avances en tecnologías de materiales y métodos de enfriamiento, las pérdidas por efecto Joule siguen siendo un desafío persistente. En el ámbito educativo, este es un factor para tomar en cuenta en las diferentes pruebas de laboratorio que incluyen sistemas de corriente directa (DC), donde es mayormente evidenciado, y también ha tomado relevancia gracias al resurgimiento de su integración con las energías renovables. La carga resistiva tiene un gran impacto en los niveles de corriente y temperatura en estos circuitos, ya que cuando la corriente eléctrica pasa a través de una resistencia, se produce una conversión de energía eléctrica en energía térmica debido a la resistencia del material al flujo de corriente, este fenómeno se conoce como efecto Joule, por lo que conocer estos niveles de corriente y temperatura sobre esta resistencia es crucial para obtener una muestra de estudio amplia. Sin embargo, con los módulos de carga resistiva que posee la universidad, este proceso se ve obstaculizado debido a la dificultad para obtener los datos de temperatura y niveles de corriente en tiempo real por la necesidad de alternar varios equipos de medición y carga al momento de realizar esos procesos de medición y recolección de datos de forma simultánea.

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Qué parámetros se deben tener en cuenta para controlar y monitorear las pérdidas por efecto Joule en un módulo de cargas resistivas?

1.2 Objetivos

Se presenta el objetivo general y los específicos.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****1.2.1 Objetivo general**

Implementar un módulo de cargas resistivas integradas a una placa de desarrollo que controle y monitoree el efecto Joule, regulando tanto la resistencia efectiva, corriente y la temperatura aplicada.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar una investigación bibliográfica sobre las causas y efectos del efecto Joule.
- Diseñar un módulo de carga resistiva con control de la resistencia efectiva para el control de pérdidas por efecto Joule.
- Implementar un algoritmo en el controlador para el uso del módulo que permita controlar y monitorear el efecto Joule al moderar la resistencia efectiva y los niveles de energía liberados en forma de calor por este efecto.

1.3 Alcance y delimitación

La presente investigación plantea implementar un módulo con control de la resistencia efectiva para gestionar las pérdidas provocadas por efecto Joule en corriente directa (DC) sobre el módulo de carga resistiva. Se realizará una investigación sobre las causas y efectos a considerar para desarrollar un control sobre el efecto joule, para ello se realizarán búsquedas de información en bases de datos confiables como libros o artículos científicos que traten sobre este fenómeno electromagnético.

Con la información adquirida se construirá el módulo con resistencias al cual se le implementará un control de lazo cerrado utilizando un Arduino Mega 2560 (debido a su cantidad de salidas digitales y fácil programación) esto para el control de la resistencia efectiva, también sensores de temperatura DS18B20 (gracias a su tolerancia a altas temperaturas, compatibilidad y alta precisión), y sensores de corriente ACS758 (por su



capacidad para altos voltajes, compatibilidad y alta precisión). En el prototipo se incluirá un multímetro digital que permitirá verificar el funcionamiento adecuado del módulo, al medir los datos de variación de la resistencia y niveles de corriente aplicados. Posteriormente se realizará una investigación cuantitativa, en la cual se recreará con corriente directa (DC) el efecto Joule en un ambiente controlado y con la ayuda del módulo de carga resistiva con control junto a una fuente de energía se pondrá a prueba un voltaje (DC) de 12, 24 y 30V debido a que son voltajes en corriente continua que son los más convencionales en fuentes de alimentación en prácticas de laboratorio y equipos electrónicos.

Adicionalmente el módulo se implementará en el laboratorio de Electrónica de Potencia (EP) de la carrera de Electricidad que está ubicado en el edificio CIELE perteneciente a la Universidad Técnica del Norte.

Para la validez de los datos se desarrollarán los diferentes cálculos matemáticos con sus respectivas pruebas prácticas del funcionamiento al modificar en diferentes niveles la capacidad resistiva del módulo y ser expuesta ante los voltajes mencionados, para realizar las mediciones con ayuda del multímetro que validen los resultados, para que posteriormente sea posible comparar los resultados teóricos y prácticos logrando mostrar que el sistema de control diseñado cumple la función de controlar las pérdidas provocadas por el calentamiento en el conductor eléctrico (efecto Joule).

1.4 Justificación

A diferencia de los módulos de carga resistiva que posee la Universidad, estos módulos requieren un enfoque integral que considere los mecanismos de control con monitoreo de las pérdidas por efecto Joule para tener un control a tiempo real y poder realizar un posterior análisis. En la Carrera de Electricidad de la Universidad Técnica del Norte, este proyecto tiene sus beneficios porque no solo controlara las pérdidas por efecto Joule, sino que también permitirá monitorearlas y gestionarlas en tiempo real, ya que los elevados niveles de temperatura por largos periodos de tiempo pueden llegar a ser perjudiciales, ya que la emisión de calor (Joules) causa la disminución del tiempo de vida

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

de los conductores debido al ineficiente paso de la energía aumentando el riesgo de fallos o cortocircuitos además de acortar el tiempo de vida útil de los equipos electrónicos. Este equipo facilitará realizar diferentes pruebas ya sea en los paneles solares (para medir rendimiento y eficiencia bajo diferentes condiciones de carga), realizar estudios de eficiencia energética, control de calidad o poner a prueba equipos eléctricos o ciertos componentes electrónicos que necesiten mantenerse bajo cierto límite de temperatura, verificar el funcionamiento de fuentes de alimentación como inversores y otros dispositivos electrónicos, pero en específico para medir y controlar los niveles de corriente y temperatura sobre una carga resistiva en donde está enfocado este proyecto.

Esta investigación representará una propuesta novedosa en lo que respecta al estudio de consumo eléctrico, ya que, al diseñar un módulo de cargas resistivas con control de estas pérdidas, se podrá mantener un control y monitoreo de los niveles de corriente y temperatura al controlar la resistencia efectiva del módulo (al conectar o desconectar las cargas resistivas en paralelo conforme sea necesario). De esta manera, se disminuirá o aumentará la resistencia efectiva conforme el controlador lo considere en base a su programación, datos de corriente, temperatura mínima - máxima ingresados por el usuario al módulo de acuerdo con el uso que se le dé.

Adicionalmente representa un impacto académico debido a que su implementación permitirá conocer y estudiar la incidencia de este efecto al analizarlo en un ambiente controlado como lo es el laboratorio de EP de la carrera de Electricidad por lo cual los beneficiarios del proyecto son los estudiantes y docentes de la carrera de Electricidad que podrán hacer uso del módulo para la ejecución de diferentes proyectos, talleres o laboratorios que requieran mantener bajo control el nivel de estas pérdidas.

La novedad del estudio radica en generar el algoritmo de control y monitoreo para emplear las cargas resistivas para reducir o aumentar la resistencia efectiva del módulo conforme sea necesario para controlar las pérdidas por efecto Joule, además de su interfaz para control manual y bajo costo frente a otras opciones del mercado.



Este capítulo abordará sobre los antecedentes relacionados a las bases teóricas relacionadas al Efecto Joule.

2.1 Contextualización

En el ámbito de la ingeniería eléctrica, la optimización de la eficiencia energética y la prevención del desperdicio de energía constituyen objetivos prioritarios. Esta situación adquiere especial relevancia en el contexto actual, donde la eficiencia energética representa una preocupación creciente motivada por la necesidad de reducir el consumo energético y contribuir a la mitigación del cambio climático.

En múltiples investigaciones sobre consumo energético, evaluación de equipos electrónicos y desarrollo de sistemas eléctricos, se ha requerido determinar los niveles de corriente en los circuitos para lograr un dimensionamiento adecuado o ejecutar pruebas exitosas. Adicionalmente, resulta necesario controlar estos niveles de corriente para identificar y evaluar la curva de operación, así como para medir el voltaje y la corriente de salida del sistema.

Por ejemplo, las pruebas con estas cargas resistivas, permite identificar la variación significativa de la eficiencia de los paneles solares a medida que cambia la posición del sol, ayuda a identificar cómo la temperatura afecta el rendimiento del panel y determinar las condiciones excepcionales en las que un panel genera la energía especificada por el fabricante [2]. En estas pruebas se hace un control parcial del efecto Joule debido a su relación de corriente, resistencia y colar, esto da un importante punto de vista de cómo este efecto mediante las cargas resistivas resulta ser de gran utilidad gracias a su integración con las energías renovables. Teniendo en cuenta su creciente interés por usar los sistemas de corriente directa (DC).

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

La aplicación de transferencia de calor mediante este método para calefacción o inducción de calor en líquidos o sólidos resulta muy común en la actualidad, debido a que se busca reemplazar las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles por su elevado impacto ambiental. En estos sistemas se emplean circuitos para el control de este efecto. Es importante mencionar que no constituye la única forma de generar calor por medio de la electricidad, ya que existen otros métodos como las ondas de microondas, el calentamiento por inducción, la radiación infrarroja y el efecto Peltier. Sin embargo, el efecto Joule representa el método más utilizado debido a su simplicidad y bajo costo, aunque esto no implica que sea la forma más eficiente para generar energía térmica.

Para el ámbito industrial se han realizado estudios sobre el efecto Joule, y se han construido módulos para realizar pruebas de resistencia y durabilidad de materiales, así como en sistemas de calefacción por resistencia controlada. La investigación de este fenómeno en estos sistemas ha permitido el estudio detallado de la disipación de energía y la eficiencia térmica de diferentes materiales y diseños de circuitos.

Un ejemplo de esto es la forma de mejorar las propiedades mecánicas de los aceros la cual se realiza mediante la modificación de la estructura. Se aplican tratamientos térmicos mismos que han sido desde hace muchos años la forma primordial de lograr este fin, sin embargo, el diseño de tratamientos se realiza para una composición química específica, dimensión y medio de enfriamiento, y mediante la metodología de prueba y error, por lo que al tener un cambio en algún parámetro del proceso se debe repetir para obtener las propiedades mecánicas deseadas [3]. Durante este se deben realizar varias pruebas en las cuales es necesario variar los parámetros térmicos provocados por efecto Joule, además se debe medir y controlar estos parámetros, estas mediciones permiten no solo la optimización del rendimiento del sistema, sino también la detección precoz de anomalías que puedan indicar fallos inminentes.

Además, el efecto Joule es fundamental en numerosos dispositivos y aplicaciones industriales, desde calefacción eléctrica hasta la soldadura. El estudio y control del efecto Joule es esencial para mejorar la eficiencia y seguridad de los sistemas eléctricos. En la

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

industria, las cargas resistivas también se utilizan para pruebas de equipos, simulación de condiciones de carga y en sistemas de calefacción controlada.

En los sistemas eléctricos el control y monitoreo ha evolucionado significativamente con el avance de la electrónica y las tecnologías de la información. Ahora los sistemas de control modernos, incluyendo los sistemas basados en microcontroladores, permiten una gestión precisa y eficiente de los niveles de corriente y voltaje. En el Ecuador el encargado de monitorear y garantizar el abastecimiento de energía eléctrica de manera continua es el CENACE, el cual cuenta con tecnología de monitoreo y control de la red eléctrica pública, esta tecnología de monitoreo es de las más importantes ya que permite anticipar fallos eléctricos y asegurar una buena calidad de energía de acuerdo con los reglamentos del país [4]. Cabe recalcar la importancia que tienen los sistemas de control y monitoreo de la electricidad, ya que no es solo importante en una escala mayor, sino que también es aplicable para pequeños sistemas para su optimización y correcto funcionamiento a largo plazo.

El desarrollo de un módulo de cargas resistivas con control y monitoreo presenta varios desafíos técnicos. Estos comprenden la precisión en la medición de variables eléctricas y térmicas, la integración de sistemas de control con alta capacidad de respuesta, el uso de sensores avanzados, técnicas de procesamiento y la gestión eficiente de la energía. No obstante, también se presentan oportunidades significativas para la innovación, especialmente en la mejora de la eficiencia energética y la seguridad de los sistemas eléctricos.

Las tendencias futuras en el campo del control y monitoreo de cargas resistivas con efecto Joule apuntan hacia una mayor integración de tecnologías IoT (Internet de las Cosas) y Big Data. La capacidad de conectar múltiples dispositivos y sistemas a una red centralizada [5]. Esto permitirá un monitoreo más detallado y una gestión más eficiente de los recursos energéticos. Además, el uso de algoritmos de inteligencia artificial para el análisis de datos promete revolucionar la forma en que se controlan y optimizan estos sistemas.



2.2 Ley de Joule

La ley de Joule es un efecto el cual fue descrito por el físico inglés James Prescott Joule quien estudio el calentamiento resistivo, posteriormente fue estudiado por Heinrich Lenz en 1842 y no fue hasta 1843 que descubrió la relación entre la conductividad de los cuerpos con su temperatura cuando Joule sumergió un trozo de alambre en una masa fija de agua y midió el aumento de temperatura causada por el paso de una corriente conocida que fluyó a través del alambre durante un período de 30 minutos, y descubrió que existía una relación entre el calor y la corriente que atravesaba el conductor, esto luego fue ampliado y desarrollado por James Prescott Joule, por lo que pasaría a llamarse "Ley de Joule" [6]. A partir de este descubrimiento se comenzó a conocer la relación entre corriente y la generación de calor.

La ley de Joule muestra la relación que existe entre el calor generado por una corriente eléctrica que fluye a través de un conductor, la resistencia del conductor y el tiempo que la corriente existe. Esta ley a diferencia de la ley de Ohm que relaciona la corriente y la resistencia, también la relaciona con el tiempo. El calor generado por este efecto recibe el nombre de Joules.

Según los autores Alan I. Cuevas Guzmán, David Silva Roy, y Guillermo Alejandro Pérez Lobato, la explicación microscópica de este efecto establece que:

“El flujo de corriente en una resistencia lleva consigo disipación de energía. Esto se debe a que cuando un elemento de carga se mueve de un potencial mayor a uno menor en un circuito eléctrico, la fuerza eléctrica produce trabajo. El promedio de la energía cinética del elemento de carga permanece constante, y su energía potencial eléctrica perdida, por conservación, aparece como energía térmica en el resistor y su entorno. Esta transferencia se debe a las colisiones entre el elemento de carga y los átomos del resistor” [7]. En otras palabras, se podría decir que la fuerza eléctrica que produce una carga al moverse de un lugar a otro por conservación produce energía térmica.

Para entender este efecto desde la física clásica, emplea el método de Drude, este modelo propone que un material está formado a nivel microscópico por una red que conforma una nube de electrones. Los iones están formados por el núcleo del átomo del



material conductor y sus electrones no libres. La nube de electrones evita que los iones se repelan, permitiendo que conformen la red o los materiales. La nube de electrones se encuentra en movimiento caótico debido a la energía proporcionada por la temperatura, pero no produce una corriente eléctrica neta porque no es direccional [8]. En pocas palabras los materiales conductores poseen electrones en movimiento que forman su estructura, pero carecen de sentido y dirección para producir corriente eléctrica.

Cuando se aplica un campo eléctrico constante, esta fuerza proporciona una dirección y sentido específicos a los electrones. Conforme establece la segunda ley de Newton, esta fuerza constante genera una aceleración constante sobre el electrón. Si el campo eléctrico fuera la única fuerza que actuara sobre los electrones, se producirían corrientes arbitrarias, ya que la velocidad de los electrones continuaría incrementándose con el tiempo.

Sin embargo, existe un factor que limita la velocidad de los electrones y, por consiguiente, la corriente. Este factor se origina por la interacción entre los electrones libres y la red fija de iones: los electrones colisionan con un ion y, en esta colisión, transfieren su energía a la red de iones, reduciendo su velocidad.

Cuando la corriente atraviesa un alambre, se produce un aumento de temperatura. La energía térmica que se obtiene de este modo es generada indirectamente por la fuente del campo eléctrico, a través de los electrones libres y la red. Según la hipótesis de Drude, se supone que en cada colisión con la red el electrón disminuye su velocidad, por lo que se espera que la red se caliente. Este aumento de temperatura es a lo que se llama efecto Joule. La energía que transfiere un electrón a la red por una colisión es igual a la energía cinética en dicha colisión [9]. En conclusión, el efecto Joule es un fenómeno electromagnético producto del paso de la corriente eléctrica a través de un conductor que presenta oposición.

El efecto Joule puede ser producido de forma intencional como también puede llegar a ser un problema ya que es un reto constante porque representa una fuente de ineficiencia energética, por lo cual se analizaron tanto las causas, efectos, factores que tiene este fenómeno electromagnético y por último los métodos para controlar este efecto.



2.2.1 Causas del efecto Joule

El efecto Joule es provocado por diversos factores que están presentes en un circuito eléctrico, estos factores son importantes para tomar en cuenta ya sea si se quiere producir este efecto de manera intencional o si se desea regular las pérdidas producidas por el mismo. Las causas para tomar en cuenta son: Resistencia Eléctrica del Material, Flujo de corriente Eléctrica y la Potencia disipada.

Resistencia Eléctrica del Material

La resistencia eléctrica de un material se encuentra determinada por su resistividad, la cual constituye una propiedad intrínseca del material y depende de factores como su composición y estructura. La resistividad se expresa en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$) y describe la capacidad del material para resistir el paso de corriente eléctrica. La resistencia de un objeto específico se calcula considerando su resistividad junto con las dimensiones del material, como su longitud y el área de su sección transversal. Por esta razón, los diferentes materiales ofrecen resistencias variadas frente al flujo de corriente, siendo la resistividad una medida clave para la caracterización y selección de materiales en aplicaciones eléctricas y electrónicas. Gracias a estas propiedades que poseen todos los materiales, estos pueden ser clasificados como: Conductores, Semiconductores, Aislantes y Superconductores.

- Conductores, los conductores pueden ser materiales como los metales por ejemplo el cobre, aluminio, oro. Estos materiales tienen muy baja resistencia eléctrica. Lo que significa que permiten el flujo de corriente eléctrica con muy poca oposición. En la Tabla 1 se describe la resistividad de los conductores más comunes. Nótese que la plata y el cobre son los materiales con menor resistencia eléctrica, por lo cual son los mejores conductores.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD***Tabla 1 Resistividad de los materiales más comunes*

Material	Resistividad
Plata	$1.64 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$
Cobre	$1.72 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$
Oro	$2.45 \times 10^{-8} \Omega$
Aluminio	$2.8 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$
Estaño	$11.50 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$
Grafito	$60 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$
Hierro	$8.90 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$

Dentro del estándar internacional el cobre recocido se compara con todos los demás conductores eléctricos; la conductividad del Estándar internacional de cobre recocido es 58 MS/m (mili siemens por metro), aunque el cobre ultrapuro puede superar ligeramente el 101% de la Norma Internacional de Cobre Recocido (IACS). El grado principal de cobre utilizado para aplicaciones eléctricas, como cables de construcción, bobinados de motores eléctricos, cables y barras colectoras, es el cobre libre de oxígeno (CW004A o ASTM designación C100140). Por otro lado, si la aplicación requiere que el cobre sea de alta conductividad para usarlo en una soldadura o utilizado en una atmósfera reductora, entonces puede utilizarse cobre de alta conductividad libre de oxígeno (CW008A o designación ASTM C10100) [10]. El cobre tiene una alta conductividad eléctrica y bajo costo económico, por lo cual es de los más usados comercialmente. Sin embargo, incluso los mejores conductores tienen una resistencia eléctrica pequeña pero no nula.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

- Semiconductores, los semiconductores son fundamentales para la fabricación de los componentes electrónicos como diodos, transistores y circuitos integrados. Estos componentes electrónicos son esenciales en dispositivos como teléfonos móviles, computadoras y paneles solares [11]. Los semiconductores forman una parte fundamental de la tecnología que actualmente existe.

Los materiales más conocidos como semiconductores son el silicio y el germanio, estos materiales tienen una resistencia eléctrica que es intermedia entre la de los conductores y los aislantes. La resistencia de los semiconductores puede cambiar significativamente con la adición de impurezas (dopaje) o con cambios en las condiciones como la temperatura y la luz, por lo cual son ampliamente utilizados en la electrónica para crear componentes electrónicos como los diodos.

- Aislantes, el vidrio, la cerámica y el plástico, tienen una resistencia eléctrica muy alta, por lo cual son considerados como materiales aislantes. Estos materiales no permiten el flujo de corriente eléctrica bajo condiciones normales, por lo cual la mayoría de las veces sirven como protección. Sin embargo, si se aplica un voltaje suficientemente alto, incluso los aislantes pueden conducir electricidad (aunque esto puede dañarlos o destruirlos).
- Superconductores, bajo ciertas condiciones como las bajas temperaturas, ciertos materiales pueden convertirse en superconductores, lo significa que tienen resistencia eléctrica cero. Esta propiedad fue descubierta en 1911 por el físico Holandés H. Kamerlingh Onnes quien observó que la resistividad eléctrica de una muestra de mercurio (Hg) cambiaba abruptamente conforme se enfriaba [12]. En la Tabla 2 se muestra algunos superconductores que representan superconductividad y sus valores de temperatura de transición para presentar superconductividad. Nótese que para llegar a esas temperaturas se requieren equipos especializados los cuales son utilizados en laboratorios de investigación y aplicaciones industriales específicas.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



Tabla 2 Temperatura de Transición (T_c) en Superconductividad

Fórmula Química	T_c en escala Kelvin	T_c en escala Celsius
Al	1.18	-271.97
V	5.40	-267.75
Nb	9.25	-263.9
Hg	4.15	-269

Como se observa, para presentar superconductividad se requieren valores de temperatura extremos, aunque hay superconductores de alta temperatura que operan a temperaturas más altas, pero aún muy frías. Los superconductores permiten el flujo de corriente sin ninguna pérdida de energía, pero debido a la complejidad de mantener las condiciones de estos materiales tienen un uso limitado. A pesar de no presentar pérdidas, todavía poseen un pequeño valor de resistencia, ya que esta nunca es nula, pero si puede ser despreciable en estos casos, por eso se dice que estos materiales no presentan resistencia.

Flujo de Corriente Eléctrica

Se refiere al fenómeno que ocurre cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor, donde los electrones se desplazan y colisionan con los átomos del material. Estas colisiones transfieren energía cinética a los átomos, incrementando su vibración y generando calor.

Potencia disipada

La potencia disipada es la cantidad de calor generado por el efecto Joule la cual es proporcional al cuadrado de la corriente que fluye a través del conductor y a la resistencia del material, aquí se puede ver reflejada la estricta relación que tiene la corriente frente a la producción de energía térmica liberada por efecto Joule.



2.2.2 Impacto del efecto Joule

Dependiendo de la aplicación y necesidad, el impacto que tiene el efecto Joule trae tanto efectos positivos como negativos.

Efectos positivos

El efecto Joule puede ser aprovechado gracias a su característica de generar calor de forma controlada, el cual tiene diversas aplicaciones tanto cotidianas como industriales. Entre estas aplicaciones están la calefacción, cocina, soldadura, etc. Lo cual resulta ser un medio más amigable con el medioambiente ya que la energía eléctrica siempre representa menos contaminación frente a los combustibles fósiles los cuales fueron la principal fuente de producción de energía térmica.

La existencia de este efecto también ha sido aprovechada para generar límites de protección, como los fusibles, los cuales son elementos de protección los cuales reaccionan a este efecto y evitan accidentes manteniendo la integridad del sistema eléctrico. Entonces se puede afirmar que en este contexto el efecto Joule no es malo.

Efectos negativos

En determinados contextos, el efecto Joule presenta consecuencias negativas debido a que genera pérdidas inevitables que representan un problema y un desafío a resolver cuando se busca la eficiencia en los sistemas eléctricos o la protección de dispositivos sensibles a altas temperaturas. Estos son ejemplos de algunas ocasiones cuando calor generado resulta perjudicial dentro de los circuitos eléctricos.

Las pérdidas pueden originarse por un dimensionamiento inadecuado de conductores o por la sobrecarga del circuito o sistema, ya que en determinado punto la corriente alcanza niveles demasiado elevados para la tolerancia del circuito o del conductor. Esto da como resultado efectos negativos que pueden ser críticos para el correcto funcionamiento del sistema.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Entre los efectos negativos que son causados por este fenómeno se tiene: pérdida de energía, sobrecalentamiento de componentes, reducción de seguridad y reducción de eficiencia energética.

- Pérdidas de energía, dentro de los sistemas eléctricos en AC y DC el efecto Joule causa pérdidas de energía en forma de calor, por ejemplo, en las líneas de transmisión la energía transportada por la corriente a través de los cables eléctricos de transporte y distribución se pierde por efecto de la energía cinética generada por el movimiento de los electrones en su circulación por el interior del propio conductor [13]. Esto resulta en que el voltaje de un punto a otro sea menor, reduciendo así la eficiencia del transporte de energía. Este problema es mayormente evidenciado en los sistemas eléctricos en DC pero también se encuentran en los sistemas AC, solo que aquí también existen otros efectos como el efecto piel o el efecto corona los cuales son los principales causantes de las pérdidas en estos sistemas más que las que pueda producir el efecto piel, sin embargo gracias al creciente interés de los sistemas eléctricos en DC por su integración con las energías renovables ha vuelto a tomar relevancia el buscar formas para reducir este efecto.
- Sobrecalentamiento de componentes, el calor excesivo generado puede dañar a los dispositivos electrónicos como los transistores, diodos, inductores, entre otros que pueden ser sensibles al calor y esto puede dañar o reducir la vida útil de dispositivos electrónicos como las computadoras, teléfonos móviles y otros aparatos. Algunas causas de este sobrecalentamiento son:
 - Aumento de la resistencia eléctrica por malos contactos, la resistencia puede ocurrir por deficiencia en las conexiones o por pérdida de sección en los conductores las cuales representan un porcentaje de resistencia.
 - Sobrecarga en conductores y componentes eléctricos, sucede cuando la intensidad que soportan los conductores y componentes eléctricos están por encima de los valores nominales para los que fueron fabricados.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

- Exceso de polvo y suciedad, la acumulación de polvo y otras partículas también puede reducir la capacidad de disipación del calor. Estos pueden actuar como agentes abrasivos, deteriorando el aislamiento de los conductores y aumentando el riesgo de cortocircuitos y fallas de corriente.
- Ventilación deficiente, el sobrecalentamiento en equipos eléctricos puede deberse a una ventilación deficiente, cuando la carga térmica generada por los componentes electrónicos y eléctricos es mayor que la capacidad pasiva de disipar calor y la ventilación no es suficiente para mantenerla controlada.
- Vida útil de los componentes, algunos de estos componentes tienen una vida útil limitada por lo que su eficiencia disminuye, aumentando la probabilidad de fallas y generación de calor [14].

El calentamiento excesivo puede causar fallos y disminuir la eficiencia de los transformadores y motores eléctricos, debido a que el calor puede dañar el aislante que poseen sus bobinas y producir cortos circuitos, también pueden producir pérdidas de energía adicionales y deformar los componentes que estos posean al dañar la soldadura y dañar sus conexiones internas.

- Riesgos de seguridad, la generación de calor no controlado debido a las corrientes elevadas puede causar incendios en los sistemas eléctricos ya que el calor desgasta el aislante de los conductores provocando corto circuitos que pueden llegar a terminar en incendios. El calor que genera el efecto Joule también puede ser lo suficientemente para generar ambientes inflamables [15]. El calor generado puede ser peligroso para las personas que entran en contacto con superficies o componentes sobrecalentados, provocando quemaduras que pueden llegar a ser graves dependiendo de la temperatura a la que se haya encontrado el componente.



2.2.3 Factores del efecto Joule

La magnitud de la intensidad de energía liberada por el efecto Joule depende directamente de varios factores entre los cuales esta: Materiales del Conductor, Intensidad de la Corriente, Tiempo de aplicación y Temperatura inicial del conductor.

Material del conductor

Los materiales con mayor resistencia eléctrica, como el níquel o el tungsteno, generan más calor por el efecto Joule en comparación con materiales de menor resistencia, como el cobre o el aluminio.

Intensidad de la corriente

A mayor corriente eléctrica que fluye a través del conductor, mayor será el calor generado. Es uno de los factores más importantes que influye en el efecto Joule, es decir, en la cantidad de calor generado cuando una corriente pasa a través de un conductor. La corriente se refiere al flujo de electrones a través de un material conductor y se mide en amperios (A). La intensidad de la corriente impacta el efecto Joule y cómo se maneja en aplicaciones prácticas.

La cantidad de calor generado en un conductor aumenta significativamente con la intensidad de la corriente. Cuanta más corriente fluye a través del conductor, más energía se transforma en calor debido al efecto Joule. Esto se debe a que los electrones, al moverse a través del material, colisionan con los átomos del conductor, transfiriendo energía en forma de calor. Este proceso es más pronunciado cuando la corriente es alta, aumentando la temperatura del conductor.

Tiempo de aplicación

La cantidad de calor generado también depende del tiempo durante el cual la corriente eléctrica fluye a través del conductor. El tiempo de aplicación de la corriente



eléctrica a través de un conductor es otro factor crucial que influye en el efecto Joule, es decir, en la cantidad de calor generado. Este aspecto se refiere a la duración durante la cual una corriente fluye a través de un material conductor. El tiempo de aplicación afecta el calor generado y cómo se maneja en diversas aplicaciones prácticas.

Cuanto más tiempo fluye la corriente a través de un conductor, mayor será la cantidad total de calor generado. Este fenómeno ocurre porque el calor acumulado es proporcional al tiempo durante el cual la corriente fluye. Así, incluso una corriente moderada puede generar una cantidad significativa de calor si se aplica durante un período prolongado.

Temperatura inicial del conductor

La resistencia de muchos materiales cambia con la temperatura. En general, para la mayoría de los metales, la resistencia aumenta con la temperatura, lo que puede amplificar el efecto Joule a medida que el material se calienta.

La temperatura inicial del conductor es un factor crítico que influye en el efecto Joule, es decir, en la cantidad de calor generado cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor. Este aspecto se refiere a la temperatura del material conductor antes de que se aplique la corriente. La temperatura inicial afecta el calor generado y cómo se maneja en diversas aplicaciones prácticas.

La temperatura inicial del conductor influye directamente en su resistencia eléctrica, que a su vez afecta la cantidad de calor generado por el efecto Joule. En general, a medida que la temperatura del conductor aumenta, su resistencia también aumenta (para la mayoría de los materiales conductores comunes). Este aumento de resistencia significa que, para una corriente constante, se generará más calor si la temperatura inicial del conductor es mayor [16]. La temperatura inicial de los componentes electrónicos puede variar según el uso previo. Por ejemplo, los dispositivos que han estado en funcionamiento continuo tienen una temperatura inicial más alta comparada con aquellos que han estado apagados. Esto influye en la cantidad de calor adicional generado cuando se encienden. También pueden afectar los factores medioambientales, como por ejemplo



el clima, ya que en el Ecuador, este varía de región a región y también depende de la estación del año en la que se encuentre, esto puede producir una elevada temperatura inicial en el conductor, en especial en las líneas de transmisión ya que generalmente estas se encuentran mayormente expuestas a climas extremos por su necesidad de transportar la energía de un lugar a otro, esto eventualmente afectará a la resistencia del conductor provocando así mayor cantidad de pérdidas por efecto Joule.

2.2.4 Métodos de control del efecto Joule.

Para implementar un control o mitigar el efecto Joule se pueden considerar los siguientes métodos, los cuales son: Selección de materiales, Optimización del diseño estructural, Control de la corriente y el Control de la temperatura.

Selección de materiales.

Si se tiene en cuenta de que la resistencia del material es uno de los factores causantes de este efecto, se puede optar por seleccionar materiales que presenten poca resistencia, metales como el cobre y la plata son ejemplos de materiales con alta conductividad eléctrica y, por lo tanto, baja resistividad. Según la Tabla 1 se puede notar que la Plata es el mejor conductor, pero por costos económicos se optan por otros metales como el Cobre.

Otro tipo de materiales con el que se puede reducir o evitar las pérdidas por efecto Joule son el uso de los superconductores, pues como se describió anteriormente son materiales que tienen cero resistividades a temperaturas extremadamente bajas. Utilizar superconductores elimina prácticamente el efecto Joule, pero su implementación es limitada debido a las necesidades de enfriamiento extremo.

Por otro lado, si se requiere experimentar como se reduce o aumenta este efecto a una escala que pueda ser más apreciable, se puede optar por el uso de resistencias, al realizar pruebas exponiéndolas a diferentes voltajes o cambiando el valor de su



resistencia. Un ejemplo de este tipo de control sería los sistemas de calefacción o los calentadores de agua como de las duchas eléctricas.

Optimización del diseño estructural.

Optimizar el diseño estructural de los dispositivos eléctricos y electrónicos para una mejor disipación del calor es una práctica clave, para esto se debe diseñar los circuitos de manera eficiente para minimizar las resistencias innecesarias, o el uso de trazas anchas en placas de circuito impreso (PCB) y la minimización de la longitud de los conductores es otra forma de controlar el efecto Joule. También incluye la disposición de componentes en una placa de circuito y el uso de disipadores de calor.

En el diseño estructural se debe tener en cuenta el uso de aislamiento térmico porque ayuda a controlar el calor generado por el efecto Joule. Algunos materiales como la fibra de vidrio, el poliestireno expandido y la lana de roca son ejemplos comunes de aislantes térmicos que se utilizan para mantener el calor en lugares deseados y evitar la pérdida de energía. Estos aislantes se deben aplicar para los recubrimientos y tratamientos superficiales a los conductores para ayudar a mejorar su conductividad y a reducir la generación de calor. Por ejemplo, el estañado de cables de cobre mejora la resistencia a la corrosión y puede reducir la resistividad superficial.

Control de la corriente.

Reducir la corriente que pasa a través de un conductor es una manera directa de disminuir el efecto Joule debido a su estricta relación con el mismo. Para lograr controlar el efecto Joule por este método se puede hacer mediante el uso de transformadores para ajustar la corriente y el voltaje según sea necesario.

El control de corriente se puede clasificar como control activo y pasivo.



- Control activo, para este tipo de control se utiliza un dispositivo activo para controlar la corriente, como puede ser un transistor o un amplificador operacional. Estos controles son comúnmente usados en aplicaciones de alta potencia y frecuencia [17]. Este tipo de control es de los más flexibles, pero son más costosos y complicados para implementar.
- Control pasivo, en este tipo de control de corriente, los dispositivos pasivos como las resistencias y los inductores se usan para limitar la corriente. Aunque son menos flexibles que los controles activos, son más sencillos y menos costosos de implementar.

Control de la temperatura.

Monitorear y controlar la temperatura de los dispositivos eléctricos y conductores es esencial para prevenir el sobrecalentamiento y el daño debido al efecto Joule. En este tipo de control se puede hacer uso de sensores de temperatura y sistemas de control automático PID los cuales son herramientas comunes para este fin.

Para controlar la temperatura se puede optar por el enfriamiento activo, para el cual se hace uso de sistemas con el uso de ventiladores, radiadores y sistemas de refrigeración líquida, este tipo de enfriamiento es crucial en aplicaciones donde se generan grandes cantidades de calor, como en la electrónica de alta potencia y en los sistemas de computación los cuales son más susceptibles a los sobrecalentamientos.

A través de este capítulo se ha adquirido una comprensión más detallada de este efecto, con lo cual se puede explorar algunos métodos para controlar este fenómeno electromagnético de una manera más eficiente y económica. Por lo cual se deduce que los parámetros más esenciales para considerar para implementar un control sobre el efecto Joule son: la temperatura, resistencia, y corriente. Al controlar los niveles de estos parámetros se puede mantener control sobre este fenómeno electromagnéticas.



2.3 Equilibrio térmico y transferencia de calor

En esta sección se estudiará sobre la temperatura y como pueden afectar en la contribución del aumento o mitigación del efecto Joule. Se revisa como la transferencia de calor se refiere al proceso mediante el cual la energía térmica se desplaza de un cuerpo con mayor temperatura hacia otro con menor temperatura [18]. En otras palabras, ambas tratan de igualar su temperatura.

A continuación, se revisa a fondo sobre el equilibrio térmico para estudiar la influencia del entorno y como esto puede afectar a las pérdidas de energía por efecto Joule.

2.3.1 Definición de equilibrio térmico.

Cuando se habla de equilibrio térmico se reúnen algunos conceptos que, a simple entendimiento, da la sensación de un intercambio de energía calórica. En la física se define como el estado en la que dos masas que tienen contacto o tienen una separación física por una superficie conductora, llegan a igualar sus temperaturas que al inicio eran diferentes de la una a la otra [19]. Esto quiere decir que el equilibrio térmico se da cuando la energía cinética trata de igualar las temperaturas entre cuerpos.

El fenómeno se puede explicar microscópicamente al comprender que la temperatura de los objetos se encuentra directamente relacionada con la energía cinética promedio de sus partículas, ya sean átomos, moléculas o las que resulte conveniente considerar [20]. Este promedio constituye lo que comúnmente se denomina en física "energía interna", por lo que a mayor energía cinética corresponde mayor energía interna y mayor temperatura del sistema.

2.3.2 Influencia del entorno.

Se conoce que dos cuerpos con diferente temperatura, trataran de igualar sus temperaturas mediante un intercambio de energía cinética, entonces, la transferencia de calor se produce rápidamente o lentamente. Por ende, se puede controlar la velocidad de



transferencia que dependerán de factores como el material, movimiento del aire [21]. Esto implica que es difícil que haya una situación en la que no exista esta transferencia de calor.

A pesar que existan infinidad de escenarios que se produzca una transferencia de calor, esta solo puede existir por tres métodos:

1. **Conducción:** Esta se define como la transferencia de calor a través de materia estacionaria mediante contacto físico. (La materia permanece estacionaria a escala macroscópica; sin embargo, se reconoce que existe movimiento térmico de los átomos y moléculas a cualquier temperatura superior al cero absoluto). Un ejemplo de este efecto es el calor que se transfiere entre el quemador eléctrico de una cocina y el fondo de una sartén.
2. **Convección:** Constituye la transferencia de calor mediante el movimiento macroscópico de un fluido. Este tipo de transferencia se presenta, por ejemplo, en hornos de aire forzado y sistemas atmosféricos.
3. **Radiación:** Se produce cuando se emiten o absorben microondas, radiación infrarroja, luz visible u otra forma de radiación electromagnética. Un ejemplo evidente es el calentamiento de la Tierra por parte del Sol. Un ejemplo menos evidente es la radiación térmica del cuerpo humano.

El entorno en el que se encuentra un objeto es un factor a tomar en cuenta debido a la transferencia de calor que puede tener con el medio en el que se encuentra.

2.3.3 Relación entre energía disipada y temperatura.

La energía disipada en sistemas resistivos se manifiesta principalmente en forma de calor, conforme establece el efecto Joule. Esta energía, genera un incremento progresivo de la temperatura en el cuerpo conductor. La cantidad de calor liberado depende directamente de la magnitud de la corriente, el valor de la resistencia y el tiempo de conducción.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

A medida que la energía disipada se acumula, la temperatura del material se eleva hasta alcanzar un equilibrio térmico con su entorno [22]. Diversos estudios experimentales han demostrado la existencia de una relación proporcional entre la energía eléctrica disipada y el incremento de temperatura, siempre que el sistema no experimente pérdidas significativas de calor. Este principio resulta fundamental para la caracterización térmica de dispositivos eléctricos y para el diseño de sistemas de disipación adecuados.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****CAPÍTULO III****MATERIALES Y MÉTODOS****3.1 Introducción.**

En esta sección se describen los métodos y los materiales usados para el desarrollo de un módulo de carga resistiva con control y monitoreo de pérdidas por efecto Joule que se ubicará en el laboratorio de Electrónica de Potencia de la carrera de Electricidad perteneciente a la Universidad Técnica del Norte. El desarrollo de este tema se clasifica en tres etapas, siendo la primera puramente investigativa sobre las causas y efectos que produce este fenómeno electromagnético, la segunda de construcción y desarrollo del módulo de carga resistiva y por último la recolección de los datos que brinda el módulo.

3.2 Metodología.

En esta sección se presenta la metodología empleada en el presente trabajo. Para lo cual se presenta los métodos y procedimientos que más se alinea a la investigación.

3.2.1 Métodos.

La presente investigación, hace uso de métodos cualitativos y técnicas de campo experimentales, se llegó a definir las actividades a realizar, entre las cuales se obtiene:

- **Revisión bibliográfica de las causas y efectos del efecto Joule.**

Dentro de la investigación bibliográfica se aplicó el método cualitativo aplicando la técnica documental para describir y explicar los factores que intervienen en la creación de este fenómeno electromagnético, además de establecer una relación de causalidad que produce la existencia de este efecto.

En esta etapa se hizo uso de fuentes bibliográficas como libros, manuales, revistas y artículos científicos disponibles en internet. Los cuales ayudaron a definir los parámetros a controlar para obtener el efecto deseado.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

- **Delimitación de parámetros de diseño.**

Para delimitar los parámetros de diseño se aplicó el método analítico mediante una búsqueda de información en la biblioteca universitaria acerca de los trabajos de grado previos que especifique las características de la o las fuentes de energía en DC disponible en los laboratorios del edificio del CIELE. Estos parámetros serán fundamentales para el diseño y elaboración del módulo.

- **Diseño del módulo de carga resistiva.**

En el diseño del módulo se aplicó el método analítico y experimental. Se realizaron cálculos en base a los principios eléctricos estudiados anteriormente y también se realizaron pruebas experimentales que permitan seleccionar la mejor ubicación de los elementos del módulo, dentro de esta etapa también se hizo uso de herramientas virtuales como el software Proteus y AutoCAD para la modelación y desarrollo de simulaciones del circuito. Para el desarrollo de programación se utilizó el software Arduino IDE, el programa es capaz de controlar la resistencia al conectar y desconectar diferentes resistencias, además de regular los niveles de temperatura mediante un sistema de enfriamiento básico.

- **Selección de componentes electrónicos.**

Para la selección de componentes se utilizó métodos comparativos y analíticos basados en las necesidades requeridas por el diseño del módulo conforme a los parámetros delimitados anteriormente, dentro de esta etapa se hizo uso de herramientas virtuales como el acceso al internet para la consulta de disponibilidad de los componentes electrónicos necesarios existentes en el mercado nacional. Se aplicó el método analítico en las datasheets de los componentes disponibles, usando tablas en las que se permita comparar la información conseguida, se seleccionaron los que mejor tolerancia tengan para la potencia a la que se expondrá y los que mejor se adapten al diseño del módulo. También se seleccionaron los sensores que toleren los niveles de corriente que

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

maneja el módulo de acuerdo con su accesibilidad en el mercado y que cumplan con las especificaciones instauradas en su diseño.

- **Elaboración del módulo.**

Para la elaboración del módulo se aplicó técnicas experimentales y se utilizó las instalaciones de los laboratorios de la carrera de Electricidad, además de hacer uso de equipos como multímetros, cables, herramientas de soldadura, componentes electrónicos, y equipo de seguridad como los guantes y mandiles.

- **Ejecución de pruebas del módulo.**

Se aplicó el método experimental y observacional siguiendo los protocolos de seguridad para el uso de equipo electrónico como fuentes de alimentación y equipo de medición como multímetros y pinzas amperimétricas para medir las variables presentes en el módulo y así verificar su correcto funcionamiento. En esta etapa con ayuda de las fuentes de alimentación, se expone al módulo a diferentes niveles de voltaje y se verifica la correcta medición de parámetros con ayuda de los equipos de medición.

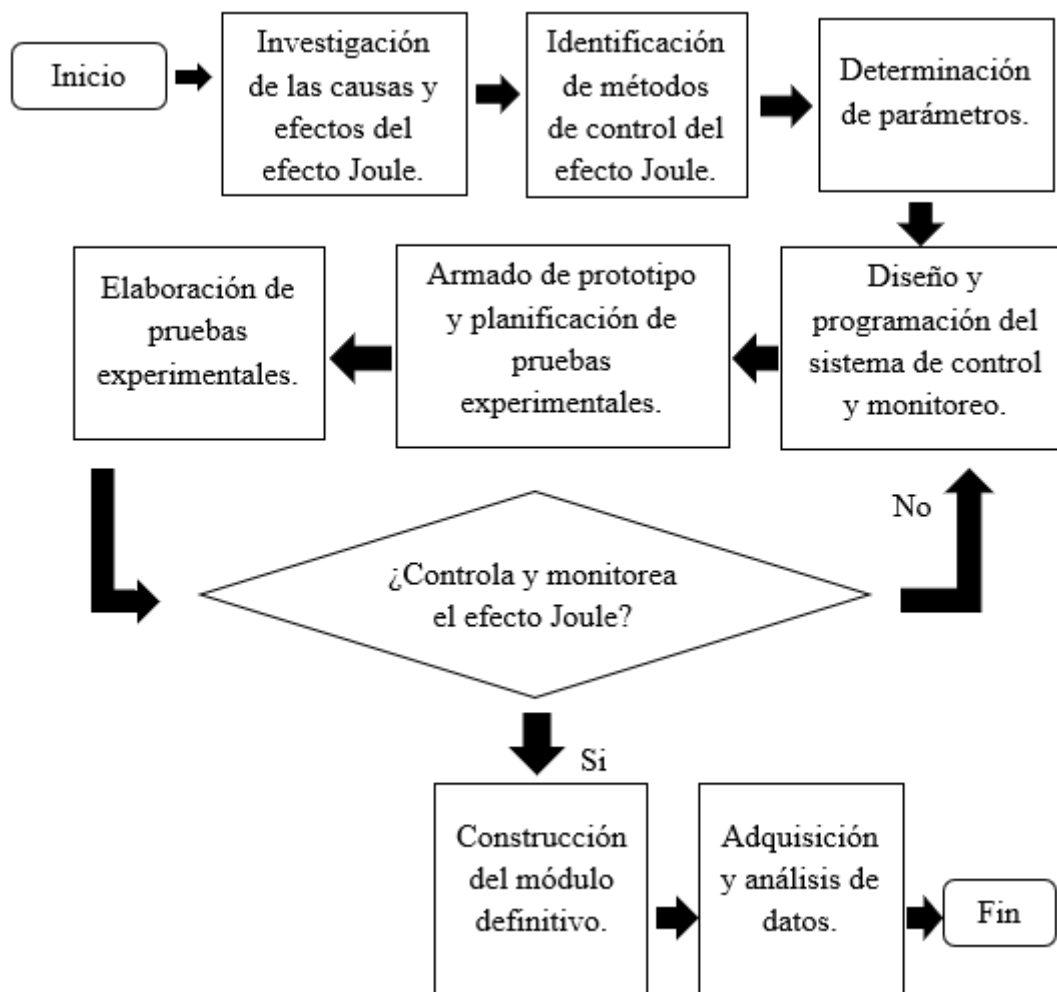
- **Adquisición y análisis de datos.**

Mediante el uso del computador portátil, y herramientas virtuales se aplicaron técnicas estadísticas, analíticas y comparativas para la recopilación de datos obtenidos al realizar las pruebas en el laboratorio para un posterior análisis de los resultados usando herramientas como Excel y Word para organizar y comparar la información obtenida en la anterior etapa.

**3.2.2 Procedimiento.**

A través del flujograma de la Figura 1 se muestran las actividades principales que se siguió para realizar el trabajo.

Figura 1 Flujograma de trabajo

**3.3 Ecuaciones**

Las ecuaciones empleadas para la verificación teórica práctica son las siguientes:

Para estimar la temperatura que tiene la carga resistiva, se necesita emplear varias fórmulas, empezando por la ley de ohm la cual implica que:

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

$$I = \frac{V}{R}$$

(1)

Donde:

- **V** es el valor del voltaje de la fuente (V).
- **I** es el valor de la corriente que pasa por la resistencia (en amperios).
- **R** es el valor de la resistencia (en ohmios).

La potencia disipada en una resistencia se puede calcular usando la ley de Joule, que se expresa de la siguiente manera:

$$P = I^2 R$$

(2)

Donde:

- **P** es el valor de la potencia disipada en vatios (W).
- **I** es el valor de la corriente que pasa por la resistencia (en amperios).
- **R** es el valor de la resistencia (en ohmios).

La potencia disipada también se expresa de la siguiente manera:

$$P = IV$$

(3)

Donde:

- **P** es el valor de la potencia disipada en vatios (W).
- **I** es el valor de la corriente que pasa por la resistencia (en amperios).
- **V** es el valor del voltaje de la fuente (V).

La ecuación para un cálculo completo del calor en julios a partir de la corriente y la resistencia, la fórmula del calentamiento Joule es:

$$E = \frac{V^2}{R} t \quad (4)$$

Donde:

- **E** es la energía en Julios (J).
- **V** es el valor del voltaje que pasa por la resistencia (en voltios).
- **R** es el valor de la resistencia (en ohmios).
- **t** es la duración del paso de la corriente (en segundos).

Para convertir la energía en julios (J) a un aumento de temperatura en grados Celsius (°C), se relaciona la energía térmica con el calor específico del material y la masa del objeto que está siendo calentado. La fórmula básica que relaciona el cambio de temperatura

ΔT con la energía E es:

$$\Delta T = \frac{E}{m \cdot c} \quad (5)$$

Donde:

- **E** es la energía en Julios (J).
- **m** es la masa del objeto en kilogramos (kg).
- **c** es el calor específico del material en J/kg.
- **ΔT** es el cambio de temperatura en grados Celsius (°C).

Para calcular el cambio de temperatura después de un aumento de temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) se emplea la siguiente fórmula del cambio de temperatura ΔT :

$$\Delta T = T_f - T_i \quad (6)$$

Donde:

- T_f es la temperatura final en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- T_i es la temperatura inicial en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- ΔT es el cambio de temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

La fórmula para calcular la capacidad calorífica efectiva de un material en base al aumento de temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) se utiliza la siguiente formula:

$$E = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (7)$$

Donde:

- E es la energía absorbida (J).
- m es la masa de la resistencia (Kg).
- c es la capacidad calorífica efectiva (c).
- ΔT es el cambio de temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Cuando la energía pasa por la resistencia, no todo se queda en la resistencia, si no que en el entorno también, entonces se puede calcular las pérdidas de energía con la siguiente ecuación tipo balance de energía que proviene directamente del balance de energía aplicado a sistemas térmicos [23]. Esta es una forma simplificada del modelo de

enfriamiento de Newton, combinada con una fuente de calor interna constante (en este caso, la energía Joule):

$$mc \frac{dT}{dt} = P_{Joule} - h \cdot A \cdot (T - T_{amb}) \quad (8)$$

Donde:

- $mc \frac{dT}{dt}$ es la acumulación térmica respecto al tiempo.
- P_{Joule} es la potencia disipada.
- h es el coeficiente de disipación térmica $\left(\frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C\right)$.
- A es la superficie efectiva de disipación (m^2).
- T es la temperatura de la resistencia ($^\circ C$)
- T_{amb} es la temperatura ambiente ($25^\circ C$)

3.4 Determinación de parámetros

Con el objetivo de asegurar la versatilidad del banco de carga resistiva para futuras pruebas de laboratorio, los parámetros de diseño se determinaron en función de las características eléctricas del panel solar disponible en el laboratorio del edificio de CIELE. Aunque inicialmente el módulo está destinado a pruebas generales con fuentes de voltaje y otros dispositivos, considerar las características del panel asegura su adaptación a ensayos relacionados con energías renovables, además esta tecnología ya se encuentra instalada y funcional en el laboratorio.

Las especificaciones eléctricas del panel están detalladas en la Tabla 3, cuya información fue extraída del trabajo de grado titulado “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE” [24].

Tabla 3 Especificaciones eléctricas del panel solar

Ítem	Características Eléctricas (STC)
------	----------------------------------

Potencia máxima (Pmax)	260W
Voltaje de circuito abierto (Voc)	38,1V
Voltaje de potencia máxima (Vmp)	30,6V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9,01A
Corriente máxima de potencia (Imp)	8,50A
Eficiencia del módulo (%)	15,80%
Tolerancia de potencia	0 ~+5W
Coeficiente de temperatura de Isc	0,05%/°C
Coeficiente de temperatura de Voc	-0,32%/°C
Coeficiente de temperatura de Pmax	-0,41%/°C

Solo se utilizan los ítems de voltaje, corriente y potencia, ya que son los únicos relevantes para el desarrollo del trabajo.

3.5 Diseño del módulo

En esta sección se presenta el diseño del módulo en donde se incluyen los diagramas de distribución de elementos, selección de componentes y los diagramas de conexión. Conforme al apartado anterior, el módulo debe ser capaz de soportar un voltaje máximo de 30,6V a una potencia máxima de 260W debido a que es más práctico para la eficiencia en un estudio real.

3.4.1 Selección de componentes.

Dentro de esta sección se dimensiona y elige los componentes del módulo de acuerdo a los parametros de diseño.

Sensor de corriente

Para la selección del sensor de corriente es necesario determinar el amperaje que debe soportar, en donde empleando la ecuación 3 se puede calcular la corriente que maneja el módulo para su dimensionamiento.

Para un voltaje de 30,6V y potencia de 260W:

$$P = IV$$

$$260 = I(30,6)$$

$$I = 8,496 \text{ A}$$

Se determina que es necesario que soporte un amperaje máximo de 8,496A. Conforme a los cálculos se realiza una investigación de sensores de corriente que admitan estos niveles de corriente, con lo cual se realiza la Tabla 4:

Tabla 4 Sensores de Corriente de Efecto Hall

Modelo	Voltaje de operación	Rango de Corriente
ACS712-05A	4.5 - 5	5
ACS712-20A	4.5 - 5	20
ACS712-30A	4.5 - 5	30

Se selecciona el sensor ACS712-20A debido a que el módulo maneja altos niveles de corriente, y es el que mejor se adapta a los requerimientos para cumplir con los objetivos planteados, el Datasheet del dispositivo se encuentra en el Anexo A del documento.

Carga Resistiva

Como carga resistiva se utilizan resistencias eléctricas, para su selección se hace uso de la Tabla 5, estas series son las normalizadas y comercializadas según la norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) [25].

Tabla 5 "Series de resistencias"

E6	1.0			1.5			2.2			3.3			4.7			6.8									
E12	1.0	1.2		1.5	1.8		2.2	2.7		3.3	3.9		4.8	5.6		6.8	8.2								
E24	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1	
E48	1.0		1.05		1.10		1.15		1.21		1.27		1.33		1.40		1.47		1.54		1.62		1.69		
	1.78		1.87		1.96		2.05		2.15		2.26		2.37		2.49		2.61		2.74		2.87		3.01		
	3.16		3.32		3.48		3.65		3.83		4.02		4.22		4.42		4.64		4.87		5.11		5.36		
	5.62		5.90		6.19		6.49		6.81		7.15		7.50		7.87		8.25		8.66		9.09		9.53		
Tolerancia de las series										E6	20%	E12	10%	E24	5%	E48	2%								
Valores de las resistencias									Ω	KΩ	MΩ		IEC	Comisión Eléctrica Internacional											

Para calcular el valor adecuado de la resistencia, se utiliza la Ecuación 3, considerando la disponibilidad comercial de componentes. En el mercado se encuentran comúnmente resistencias de las series E24 con capacidades de disipación de 5 W, 10 W, 20 W y 25 W. Con base en estos valores y aplicando la Ley de Ohm, se determina el valor de resistencia que pueda soportar de forma segura el nivel máximo de voltaje al que será expuesta, asegurando así un funcionamiento confiable dentro de los márgenes de potencia permitidos.

Para 5W:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$5 = \frac{(30,6)^2}{R}$$

$$R = \frac{(30,6)^2}{5} = 187,272\Omega$$

$$R+ = 196,6356\Omega$$

$$R- = 177,9084\Omega$$

Para 10W:

$$10 = \frac{(30,6)^2}{R}$$

$$R = \frac{(30,6)^2}{10} = 93,636\Omega$$

$$R_{+} = 98,3178\Omega$$

$$R_{-} = 88,9542\Omega$$

Para 20W:

$$20 = \frac{(30,6)^2}{R}$$

$$R = \frac{(30,6)^2}{20} = 46,818\Omega$$

$$R_{+} = 49,1589\Omega$$

$$R_{-} = 44,4771\Omega$$

Para 25W:

$$25 = \frac{(30,6)^2}{R}$$

$$R = \frac{(30,6)^2}{25} = 37,454\Omega$$

$$R_{+} = 39,3267\Omega$$

$$R_{-} = 35,5813\Omega$$

Entonces, estas son las resistencias capaces de soportar el voltaje a máxima potencia del panel solar en base a cada potencia disponible. Más adelante en resultados se realiza el dimensionamiento de resistencias en paralelo para seleccionar una en concreto, teniendo en cuenta su existencia en el mercado local.

Sensor de temperatura

Al hacer uso de la Tabla 6 se compara varios sensores disponibles en el mercado que tienen buena compatibilidad con el microcontrolador de Arduino, además de poseer buen rango de precisión y precisión.

Tabla 6 Comparativa de Sensores de Temperatura disponibles en el Mercado

Sensor	Rango	Precisión	Características
DS18B20	-55 °C a +125 °C	±0.5	Comunicación digital, lo que permite múltiples sensores en un solo bus.
DHT22 (AM2302)	-40 °C a +80 °C	±0.5 °C	Mide humedad, lo que puede ser útil en ciertas aplicaciones.
LM35	-55 °C a +150 °C	10 mV/°C	Fácil de usar con un pin analógico de Arduino
TMP36	-40 °C a +125 °C	±2 °C	Salida analógica, similar al LM35.
BME280	-40°C a +85°C	±1°C	Mide presión y humedad, usando I2C o SPI para la comunicación.

Con la información comparada se decide por el sensor DS18B20 gracias a que tiene un gran rango y una precisión estándar, pero principalmente porque posee comunicación digital, lo que permite múltiples sensores en un solo bus, esto es útil para conectar varios sensores en un solo pin para poder medir la temperatura en todo el módulo. El datasheet de este sensor está ubicado en el Anexo B de este documento.

Relé de activación

Se selecciona el relé por su capacidad de conmutar cargas resistivas de forma segura, automática y modular, permitiendo estrategias de control y protección sin requerir alta velocidad de conmutación. Su aislamiento eléctrico, facilidad de integración con Arduino y su adecuada capacidad de corriente lo hacen ideal para un control confiable y flexible en este proyecto. En la Tabla 7 se realiza una comparación de características de cada relé disponible en el mercado:

Tabla 7 Comparación de Relés

Característica	Relé de 5 V	Relé de 12 V
Voltaje de activación	5 V DC	12 V DC
Corriente de activación	70–100 mA	30–50 mA

Tiempo respuesta (ON/OFF)	de	~10–15 ms	~10–15 ms
Capacidad carga	de	Hasta 10 A a 250 V AC o 30 V DC (modelo SRD-05VDC-SL-C)	Igual capacidad (modelo SRD-12VDC-SL-C)
Tolerancia ruido eléctrico	al	Menor (más sensible al ruido si no se aísla adecuadamente)	Mayor tolerancia al ruido en ambientes eléctricos ruidosos
Calor generado en la bobina		Ligeramente superior (por mayor corriente)	Inferior en promedio
Costo disponibilidad	y	Muy alta: económicos y ampliamente disponibles	Alta, pero menos comunes

Se selecciona el relé de activación de 5V debido a su compatibilidad directa con el controlador Arduino, esto brindara una mayor facilidad de manejo.

Microcontrolador

Para la selección del microcontrolador se realiza el dimensionamiento aproximado conforme a las necesidades que tiene el módulo para lo cual se calcula la cantidad de entradas y salidas digitales que necesita, se considera que se conectan alrededor de 10 cargas, sin embargo, no es el valor real, solo una estimación:

Entradas digitales necesarias

$$\begin{aligned}
 &= 10(1 \text{ por cada relé de las cargas resistivas}) \\
 &+ 10(1 \text{ sensores de temperatura} + 1 \text{ Sensor de corriente}) \\
 &= 30 \text{ entradas aprox}
 \end{aligned}$$

Salidas digitales necesarias

$$\begin{aligned}
 &= 10(1 \text{ para cada relé de cada carga resistiva usada}) \\
 &+ 1(\text{Todo el sistema de ventilación}) = 13 \text{ salidas aprox}
 \end{aligned}$$

$$\text{Total de pines} = 43 \text{ pines aprox.}$$

Adicionalmente se considera la comunicación LCD del sistema. Entonces para la selección del Microcontrolador, se hizo uso de la Tabla 8. Es una comparativa con los diferentes modelos con mayor capacidad disponibles en el mercado.

Tabla 8 Comparativa de varios Arduino del mercado

Detalles	Micro	UNO	Mega	Leonardo
Microcontrolador	Atmega32U4	Atmega328P	ATmega2560	ATmega32U4
Voltaje de operación	5	5	5	5
Pines de Operación	20	14	54	20
Pines PWM	7	6	15	7
Pines de entrada analógicas	12	6	16	12
Corrientes DC por cada pin I/O [mA]	20	20	40	40
Corrientes DC por cada pin de 3.3V [mA]	50	50	50	50
Memoria Flash [Kb]	32	32	256	32
Memoria SRAM [Kb]	2.5	2	6	2.5
Memoria EEPROM [Kb]	1	1	4	1

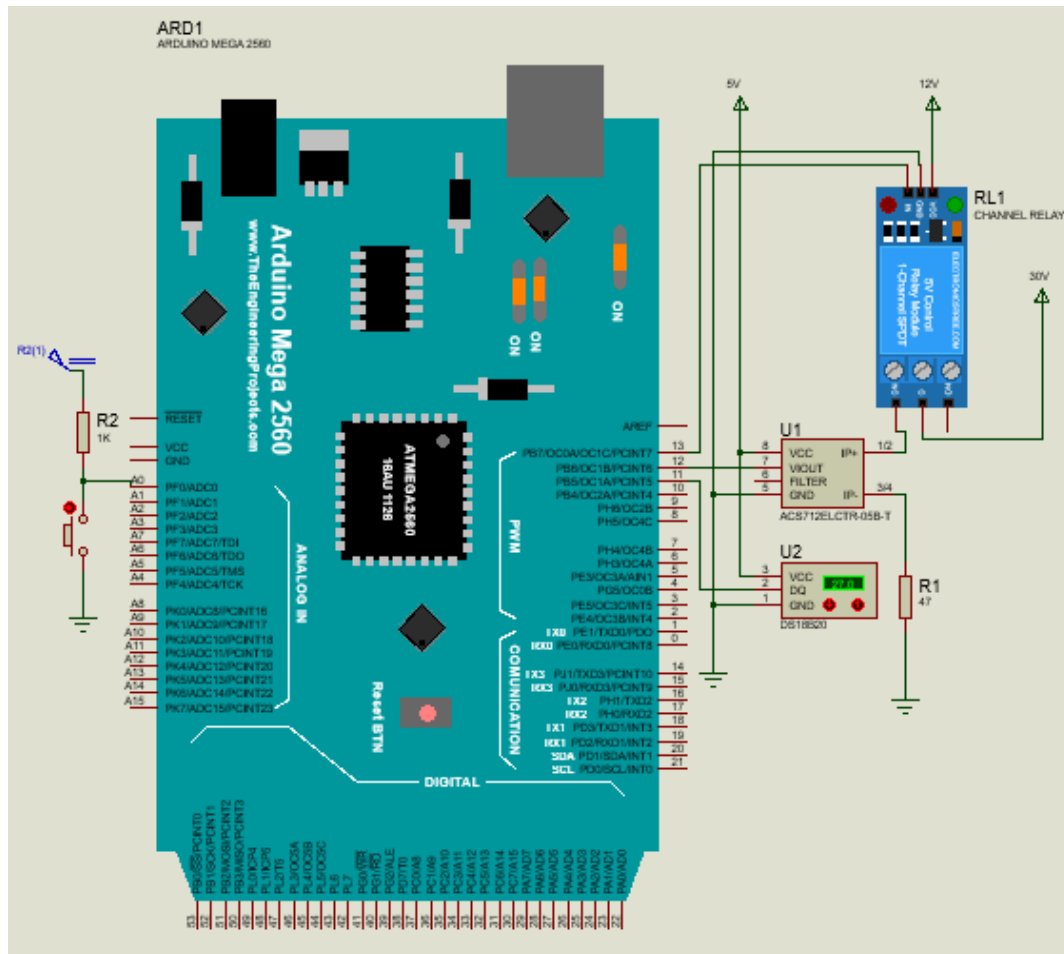
Velocidad de Reloj [MHZ]	16	16	16	16
---------------------------------	----	----	----	----

Con ayuda de la Tabla 8, se selecciona el Arduino Mega, esto debido a su capacidad de operación, cantidad de salidas, entradas y capacidad de manejo de corriente. Lo que resulta ser la mejor opción debido a las necesidades del módulo. El datasheet detallado del controlador se encuentra en el Anexo C.

3.4.2 Diseño del circuito de conmutación.

La conmutación de la carga resistiva se da mediante la activación del módulo relé gracias a la señal enviada por el microcontrolador, el circuito de activación se ubica a la izquierda de la Figura 2, aquí se encuentra un pulsador que es el que el usuario podrá utilizar para activar la carga que se desee conmutar o desconectar dependiendo de la posición del botón pulsador. La carga resistiva se conecta junto a un sensor de corriente, para este caso un ACS712-05A, debido a que la corriente circulante en esta prueba no supera esa cantidad. Junto a la carga resistiva se ubica el sensor de temperatura el cual es uno de los elementos clave para poder monitorear las pérdidas de energía por efecto Joule.

Figura 2 Conmutación de Resistencia



En la Figura 2 se observan hasta 4 tipos de fuentes de energía, entre las cuales 2 son de 5V, una de 12V y por último una fuente de 30V que representa la fuente de energía máxima a la que se estima soportar con el módulo, en la práctica real se puede reducir a 2 fuentes de voltaje propias del módulo, una de 5V que alimente los sensores y pulsadores de activación y una que alimente los módulos relés.

3.6 Materiales

En esta sección se detalla los materiales, equipos y software empleados para la construcción del módulo.

3.6.1 Componentes

Los componentes seleccionados anteriormente y que son usados en la creación del módulo son los siguientes:

Resistencias

En la Figura 3 se muestran los elementos utilizados para regular la corriente de entrada y salida del controlador, con el objetivo de proteger tanto el circuito de control como el de monitoreo. Para los circuitos de activación de los relés se emplean resistencias de 10 k Ω , un valor comúnmente utilizado en configuraciones pull-up, especialmente cuando no se requiere una alta velocidad de conmutación. Esta característica las hace adecuadas para esta aplicación, donde la estabilidad es prioritaria sobre la rapidez. Además, se incorporan resistencias de 4,7 k Ω en el bus de datos del sensor DS18B20, ya que este es el valor recomendado por el fabricante para garantizar una correcta comunicación digital entre el sensor, su fuente de alimentación y el controlador, al estar conectados en paralelo.

Figura 3 Resistencias



Sensor ACS712-20A

El modelo ACS712-20A de la Figura 4 cuenta con una capacidad máxima de 20A, útil para la medición de corriente, para voltajes en DC y AC. Es una solución económica para medir corriente, trabaja con un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético

surgido del paso de la corriente por un alambre de cobre interno y convirtiendo este campo en un voltaje variable.

Figura 4 Sensor de corriente ACS712ELCTR-20A-T



Arduino Mega 2560

Se trata de una placa basada en el microcontrolador ATmega2560. Este controlador se puede observar en la Figura 5, tiene 54 entradas y salidas digitales, 15 pueden ser usadas como PWM (Pulse Wide Modulation), además tiene 4 puertos seriales mediante el hardware (UART), un cristal de 16 MHz, conexión USB, conector de alimentación, conector ICSP para programación y un pulsador reset.

Figura 5 Arduino Mega 2560



Relé 5V

Como dispositivo de conmutación se selecciona los módulos relés de 5V de la Figura 6, soporta hasta 10 A a 250 V AC o 30 V DC.

Figura 6 Módulo Relé 5V



Carga Resistiva

Para las cargas resistivas del módulo se emplean unidades de resistencias similares a las de la Figura 7 de 20W en adelante con una tolerancia del 5%.

Figura 7 Resistencia de potencia



Puertos Jack banana

Para ayudar con las mediciones de la corriente del módulo mediante el multímetro, se hace uso de los puertos de la Figura 8, el cual está instalado para cada resistencia en el exterior del módulo para facilitar la adquisición de datos y para conectar a la fuente externa mediante cables punta de banana.

Figura 8 Puertos Jack Banana



Ventiladores

Para la ventilación del módulo se emplean 2 ventiladores de PC de 12V similares al de la Figura 9, forman parte del sistema de refrigeración del módulo en caso de emergencia.

Figura 9 Ventiladores de PC



Fusible

Para proteger el circuito y la fuente, se emplea un fusible de vidrio similar al de la Figura 10, para su selección se toma en cuenta los valores de corriente y voltaje que podrían llegar a dañar el módulo conforme a las especificaciones eléctricas del panel solar utilizado.

Figura 10 Fusible de vidrio



Sensor DS18B20

El sensor DS18B20 de la Figura 11, es un sensor digital de temperatura, emplea comunicación que utiliza el protocolo 1-Wire, permite conectar varios sensores en un solo pin. Utiliza un encapsulado TO-92 similar al que se utilizan en los transistores pequeños. Su presentación comercial más común es el sensor dentro de un tubo de acero inoxidable resistente al agua.

Figura 11 Sensor de temperatura DS18B20



Todos los elementos mencionados en este capítulo son los principales y fundamentales para el funcionamiento de este módulo.

3.6.2 Equipos de Medición

En esta sección se presenta los equipos de medición necesarios para comprobar el correcto funcionamiento de los sensores del módulo.

El termómetro de cocina mostrado en la Figura 12 se utiliza como instrumento de referencia para verificar el correcto funcionamiento del sensor de temperatura DS18B20. Esto permite realizar una calibración adecuada y asegurar su operatividad. El termómetro posee un rango de medición de -10°C a 100°C .

Figura 12 Termómetro de Cocina



Adicionalmente se hace uso de un Multímetro digital mostrado en la Figura 13, este equipo es empleado para comprobar los valores de las cargas resistivas y los valores captados por los sensores del módulo de corriente y voltaje. Puede medir hasta 1000V-10A, esto según las especificaciones marcadas en el propio equipo.

Figura 13 Multímetro digital

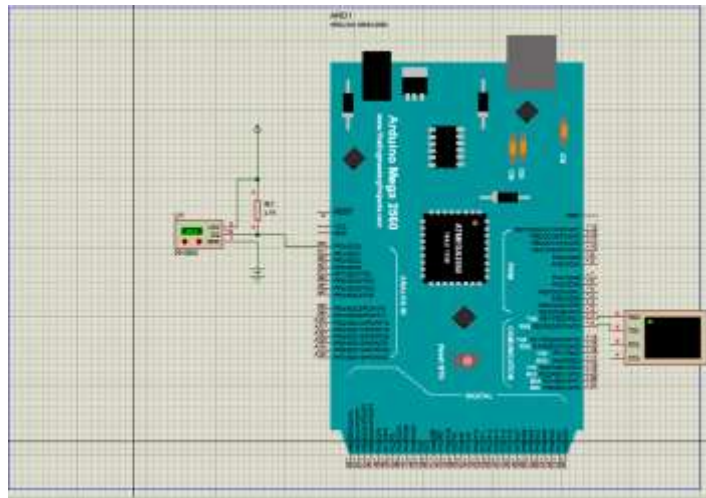


3.6.3 Software

Para ejecutar las simulaciones de los componentes del módulo, se hizo uso del programa Proteus, en el cual se realizó las pruebas para la conmutación de las resistencias con los relés y la asignación de los pines al Arduino.

En la Figura 14 se puede observar el simulador, en este software es donde se desarrolla las simulaciones del prototipo para desarrollar el módulo y finalmente el módulo completo.

Figura 14 Simulador Proteus



Para el diseño del módulo, se hace uso del software AutoCAD de la Figura 15, aquí se realiza los planos de referencia de la ubicación de los diferentes componentes del proyecto.

Figura 15 AUTOCAD



Estos constituyen los equipos, software y materiales principales que se utilizan para la implementación de este módulo de control. Con esta información se establecen las bases para el diseño y dimensionamiento del módulo.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo abarca los resultados obtenidos de la implementación del algoritmo para el control del efecto Joule mediante el control de la resistencia efectiva. El capítulo se encuentra dividido en varias secciones que describen y documentan el procedimiento de implementación del algoritmo y la validación del mismo mediante la comparación de datos teóricos y reales.

4.1 Diseño del módulo de carga resistiva.

Para el diseño del módulo se tiene en cuenta cuatro etapas, el dimensionamiento del banco de resistencias, el diseño de los diagramas de conexión, diseño del módulo del banco de carga resistiva y por último el dimensionamiento del fusible de protección estas etapas se detallan a continuación.

4.1.1 Dimensionamiento del Banco de resistencias.

Para dimensionar el banco de carga resistiva, se toma como referencia que debe soportar el voltaje del panel solar disponible en el laboratorio del edificio CIELE, cuyas características son extraídas de la Tabla 3:

- Potencia máxima (P_{max}): 260W
- Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): 38.1V
- Voltaje máximo de potencia (V_{mp}): 30.6V
- Corriente de Cortocircuito (I_{sc}): 9.01A

En base a estos valores, se calcula el número de resistencias en paralelo necesarias para tolerar 260W, teniendo en cuenta la existencia comercial en el mercado local de las resistencias. Con la información obtenida se organiza la Tabla 9:

Tabla 9 Resistencias Disponibles

Valor de Resistencia	Potencia soportada	Tolerancia
5 Ω	5W,10W	5 $\pm$
10 Ω	5W,10W	5 $\pm$
25 Ω	5W,10W	5 $\pm$

47 Ω	20W	5 $\pm$
50 Ω	10W	5 $\pm$
100 Ω	10W,20W,25W	5 $\pm$
200 Ω	10W,20W,25W	5 $\pm$
4,7 K Ω	5W,25W	5 $\pm$
5,6 K Ω	5W,25W	5 $\pm$

Con esta tabla se busca la combinación de resistencias que a su máxima capacidad pueda soportar 260W. Para dimensionar la cantidad de resistencias que se deben sumar en paralelo se toma en cuenta que la potencia soportada en paralelo se suma, entonces:

$$\text{Potencia de la resistencia} \cdot \text{Número de resistencias} = 260$$

$$\text{Número de resistencias} = \frac{260}{\text{Potencia de la resistencia}}$$

A partir de dicha fórmula se determina la cantidad de resistencias necesarias para alcanzar la potencia deseada. Sin embargo, debido a que los valores calculados no siempre coinciden con los existentes en el mercado local, se opta por calcular la potencia máxima alcanzable utilizando los valores disponibles más cercanos. El objetivo es encontrar la combinación de resistencias que permita aprovechar al máximo la potencia suministrada por el panel solar usando los 30,6V. Además, se considera la tolerancia de las resistencias, ajustando los cálculos de potencia máxima en función de ese margen. Los significados de los acrónimos usados son:

- **R.C:** Valor de resistencia calculado teóricamente para alcanzar la potencia deseada.
- **R.M.C:** Valor comercial más cercano al calculado, disponible en el mercado local.
- **P p.u:** Potencia máxima disipada por una sola unidad de resistencia.
- **R.P:** Cantidad de resistencias en paralelo necesarias para disipar un total de 260 W.
- **P.N:** Potencia total disipada considerando la resistencia efectiva resultante de la combinación de resistencias calculadas.

- **P (-):** Potencia máxima disipada considerando el valor mínimo de la resistencia efectiva, según su tolerancia.
- **P (+):** Potencia máxima disipada considerando el valor máximo de la resistencia efectiva, según su tolerancia.

Con base en estos criterios, se organiza la Tabla 10.

Tabla 10 Potencias conforme a la tolerancia de la resistencia

R.C	R.M.C	P p. u	R. P	P. N	P (-)	P (+)
187,272 Ω	100 Ω	5W	52	486,907W	512,534W	463,721W
	200 Ω		52	243,454W	256,267W	231,861W
93,636 Ω	100 Ω	10W	26	243,454W	256,267W	231,861W
	200 Ω		26	121,727W	128,133W	115,930W
46,818 Ω	47 Ω	20W	13	258,993W	272,624W	246,660W
	100 Ω		13	121,727W	128,133W	115,930W
37,454 Ω	100 Ω	25W	10,4	97,381W	102,507W	92,744W
	200 Ω		10,4	48,691W	51,253W	46,372W

La selección de la resistencia se realiza según los siguientes criterios:

- Menor cantidad de resistencias conectadas en paralelo.
- Valor de potencia más cercano al deseado.

Entonces la combinación de resistencias que más se acerca es la de 47 Ω en donde se estima que 13 resistencia en paralelo en su máxima capacidad tienen un buen aprovechamiento llegando a soportar un valor cercano a 260W.

Con la combinación obtenida se da una estimación de los valores que se pueden conseguir con los voltajes de 12, 24, y 30,6V que son valores nominales para paneles solares de mediana generación. La información se organiza en la Tabla 11, los valores estimados de corriente y potencia con esos valores son:

Tabla 11 Valores estimados a diferentes voltajes

Voltaje	Variación de la Resistencia efectiva por su tolerancia.	Corriente Por unidad	Corriente Total	Potencia Por unidad	Potencia máxima
---------	---	----------------------	-----------------	---------------------	-----------------

12V	3,615 Ω	0,255 A	3,319 A	3,064W	39,830W
	3,435 Ω	0,255 A	3,494 A	3,064W	41,926W
	3,796 Ω	0,255 A	3,161 A	3,064W	37,933W
24V	3,615 Ω	0,511 A	6,638 A	12,255W	159,319W
	3,435 Ω	0,511 A	6,988 A	12,255W	167,704W
	3,796 Ω	0,511 A	6,322 A	12,255W	151,733W
30,6V	3,615 Ω	0,651 A	8,464 A	19,923W	258,993W
	3,435 Ω	0,651 A	8,909 A	19,923W	272,624W
	3,796 Ω	0,651 A	8,061 A	19,923W	246,660W

Como se puede observar, la potencia disipada por cada unidad no excede los 20W máximos, por lo tanto, es seguro su uso para estos voltajes.

4.1.2 Diseño de diagramas de conexión.

En esta etapa se muestra el diagrama de conexión del módulo, y se detallan sobre su funcionamiento.

Diagrama de conexión general

Con base en los cálculos previos, para la implementación del sistema de control y monitoreo del módulo de cargas resistivas, se ha considerado la conexión de 13 resistencias individuales. Según la información de la Tabla 11, a cada resistencia se le asigna su propio sensor de corriente ACS712-5A, ya que las corrientes individuales no superan el rango de 5 A. Además, se incorpora un sensor de corriente general ACS712-20A para monitorear el consumo total del sistema, dado que la suma de todas las corrientes tampoco excede el umbral de este sensor. Esta configuración permite una evaluación tanto individual como global del comportamiento eléctrico del módulo. Cada resistencia también cuenta con un sensor de temperatura DS18B20 que permite el monitoreo térmico en tiempo real.

La activación de las cargas resistivas se realiza mediante pulsadores individuales, los cuales, al ser presionados por el usuario, envían una señal al Arduino, que interpreta la instrucción y activa o desconecta el relé electromecánico de 12V que conmuta las

cargas resistivas correspondientes mediante la lógica programada. De esta forma, se permite el encendido o apagado independiente de cada carga resistiva según se requiera. Esta arquitectura de control permite desconectar automáticamente cualquier resistencia conforme el usuario requiera. Además, se incluye un sistema de ventilación controlado por un relé adicional, cuya activación es automatizada por el microcontrolador en función de las temperaturas medidas, con el objetivo de favorecer la disipación térmica en caso de necesitarse realizar una nueva iteración de prueba o en caso de seguridad si la temperatura de la resistencia excede el límite seguro permitido.

La visualización de datos se lleva a cabo mediante una pantalla LCD de 4 líneas con interfaz I2C, que facilita la supervisión de variables del sistema. Para asegurar un funcionamiento estable, se utilizan fuentes de alimentación externas para los sensores y actuadores, garantizando un suministro eléctrico adecuado y aislado del controlador.

Finalmente, para observar la temperatura de una resistencia específica, se incluyen dos pulsadores que funcionan como cursores para navegar entre las mediciones de cada resistencia, así como un botón adicional denominado "Stop", el cual permite pausar y almacenar temporalmente los datos mostrados, facilitando la lectura de temperaturas en momentos puntuales durante las pruebas.

En la Tabla 12 se presenta la asignación de pines del Arduino Mega 2560, estructurada de manera lógica y optimizada para cumplir con los requerimientos de control, registro de los sensores y visualización del sistema:

Tabla 12 Pines Asignados

Función	Cantidad	Componente	Tipo de pin sugerido	Pines asignados
Activación de cargas resistivas	13	Relés de 12 V	Salidas digitales	41 al 53
Activación de ventilador	1	Relé de 12 V	Salida digital	24
Pulsadores de activación de cargas	13	Pulsadores individuales	Entradas digitales con INPUT_PULLUP	28 al 40
Pulsadores de navegación (↑ / ↓)	2	Cursores para selección en pantalla	Entradas digitales con INPUT_PULLUP	26 y 27
Pulsador de almacenamiento ("Stop")	1	Botón de pausa de medición	Entrada digital con INPUT_PULLUP	25
Sensores de corriente individuales	13	ACS712-5A	Entradas analógicas	A0 al A12
Sensor de corriente general	1	ACS712-20A	Entrada analógica	A13

Sensores de temperatura	13	DS18B20 (1-Wire, bus compartido)	Entrada digital compartida	23
-------------------------	----	----------------------------------	----------------------------	----

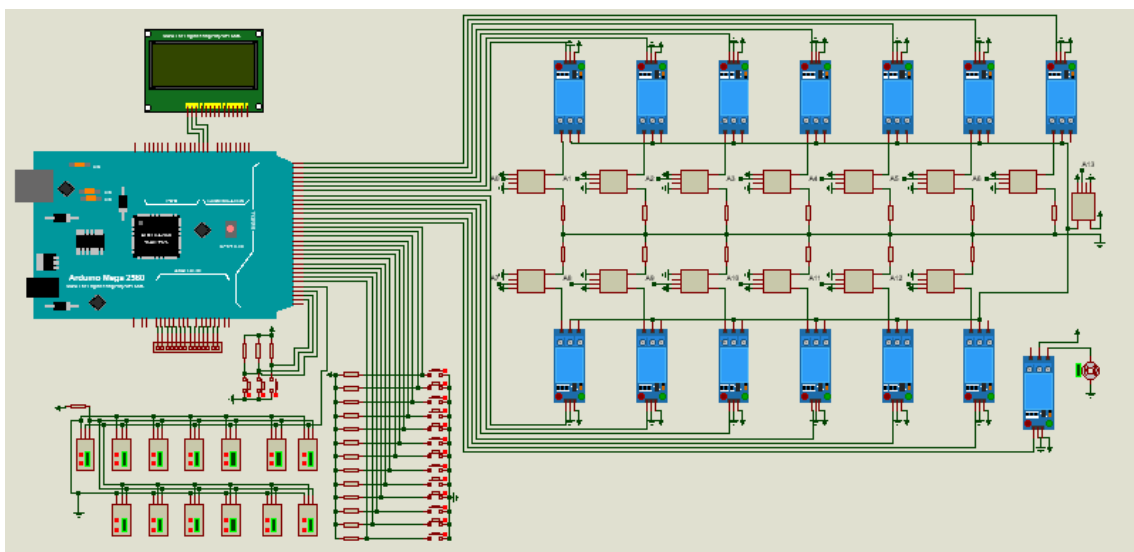
En la Tabla 13 se presentan los pines aun disponibles después de la asignación de tarea para cada pin del Arduino Mega 2560:

Tabla 13 Pines disponibles

Tipo de pin	Número de pines	Pines disponibles
Digitales	1	53
Analógicos (también digitales)	2	A14, A15

En la Figura 16 se tiene el diagrama general de todo el circuito con los pines designados ya conectados, más adelante se profundiza en cada parte del circuito.

Figura 16 Diagrama general

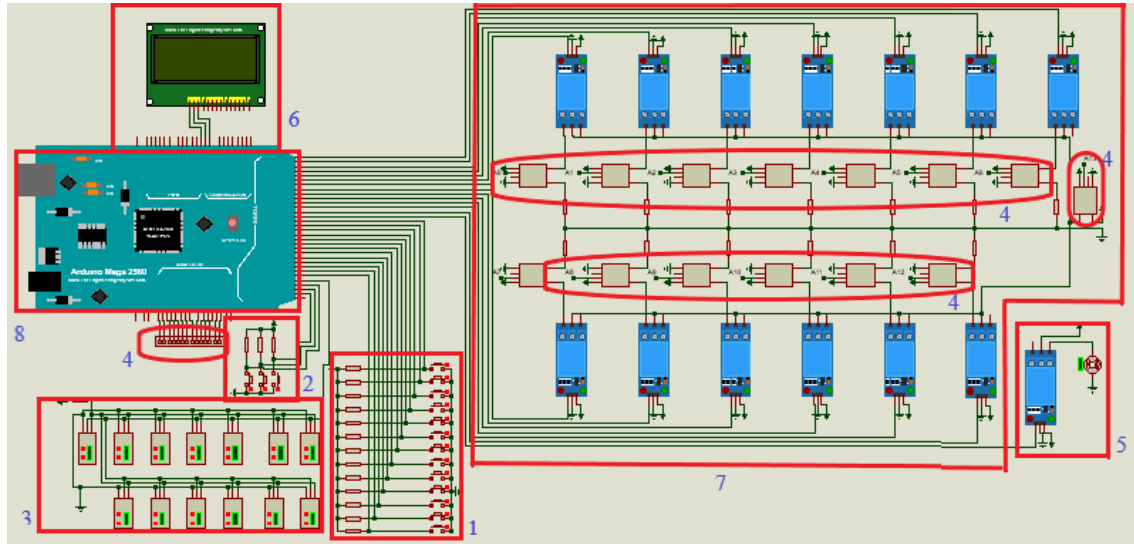


En la Figura 17, se puede observar el diagrama segmentado en partes denominadas como:

1. Circuitos de activación.
2. Circuito de cursor.
3. Circuito de Sensores DS18B20.
4. Sensores de corriente.
5. Ventilación.

6. LCD 20x4.
7. Banco de carga resistiva.
8. Arduino Mega 2560.

Figura 17 Partes del circuito



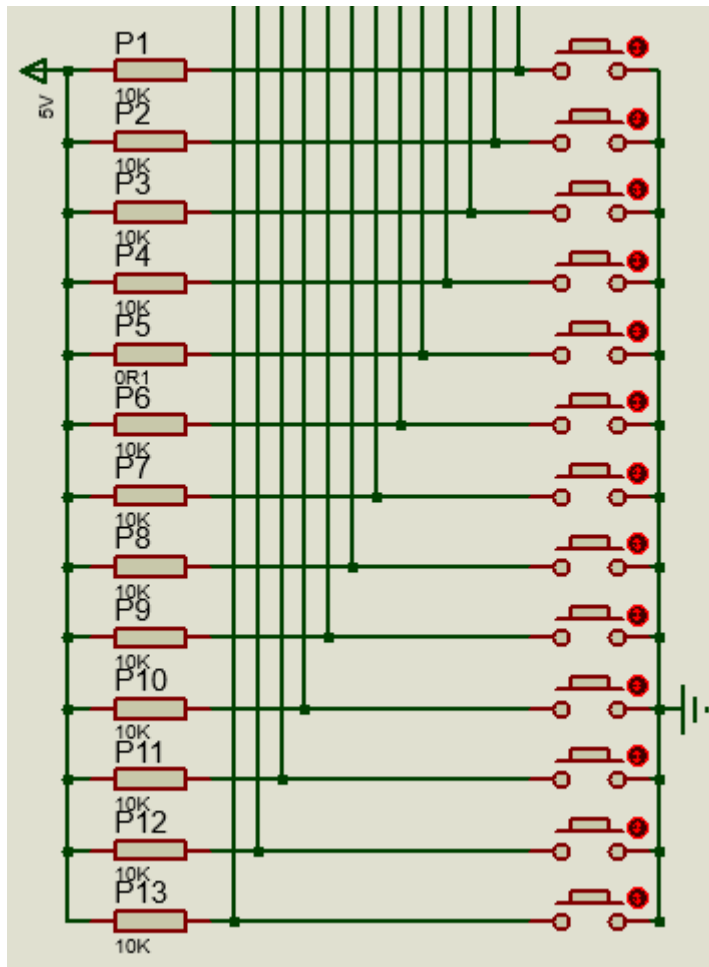
A continuación, se profundizan en estas partes.

1. Circuitos de activación

En el circuito de la Figura 18 se observa el circuito de activación replicado para las 13 cargas resistivas, esta zona emplea resistencias de $10K\Omega$ para reducir la corriente al máximo. Los pines designados van desde el 22 al 34, ósea que el circuito con la resistencia llamada P1, tiene su salida de señal conectada al pin 22 el Arduino, así sucesivamente hasta el circuito con la resistencia P13 conectado al pin 34.

Estos circuitos mantienen un pin de entrada en estado alto (nivel lógico 1) cuando el interruptor está abierto, evitando lecturas erróneas o inestables que activen accidentalmente alguna carga resistiva. Al presionar el botón, el pin se conecta a tierra (estado bajo o 0), permitiendo detectar la activación de la carga resistiva.

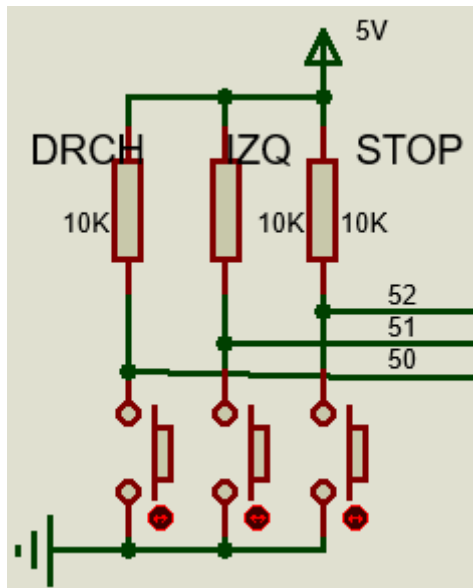
Figura 18 Circuitos de Activación



2. Circuito de cursor

El funcionamiento de este circuito es poder seleccionar el valor de la temperatura de una resistencia en concreto y poder detener las mediciones para tener el suficiente tiempo de recopilar la información. En la Figura 19, se puede observar que emplea el mismo tipo de circuitos de activación que los circuitos anteriormente mencionados, pero a diferencia de esos, cumplen una diferente función y no usarán un interruptor sino que un pulsador que permita al usuario emplearlo como un cursor a través de clics.

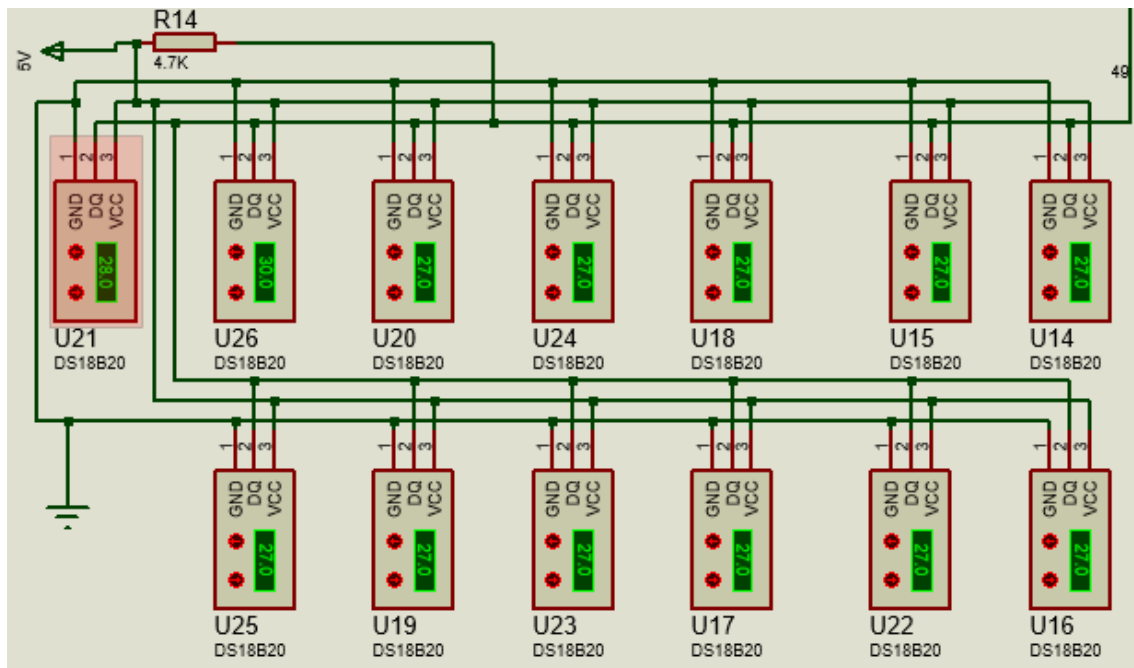
Figura 19 Cursor



3. Circuito de Sensores DS18B20

Los sensores DS18B20 usan el protocolo One Wire, que permite comunicar varios sensores usando un solo pin de datos como se puede observar en la Figura 20, permitiendo ahorrar una gran cantidad de datos para este módulo tan exigente, esto es posible ya que cada sensor tiene una dirección única, y se comunica secuencialmente con el microcontrolador. El número de sensores de temperatura es proporcional al número de cargas resistivas existentes en el módulo, con esto se puede monitorear la temperatura de la resistencia individual.

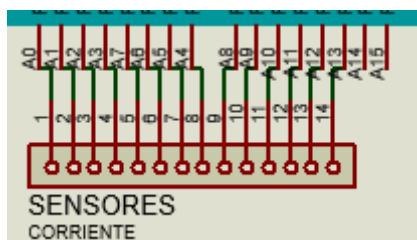
Figura 20 Bus 1 Wire (Sensores DS18B20)



4. Sensores de Corriente

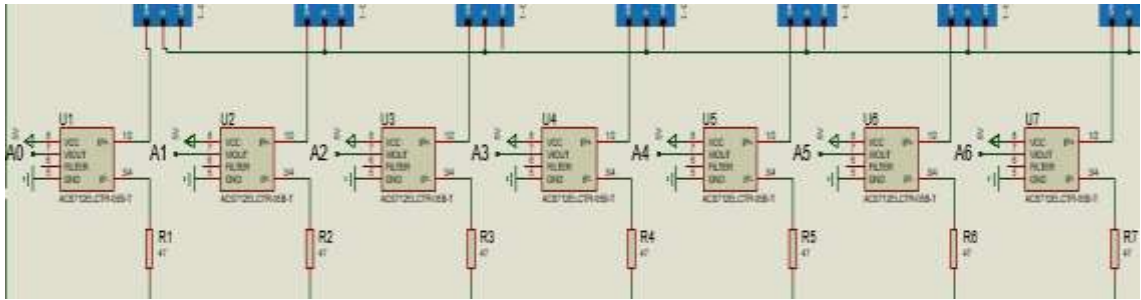
Los sensores de corriente se conectan individualmente para cada uno como se observa en la Figura 21, se tienen los 13 sensores destinados específicamente para cada carga resistiva que van del pin A0 al A12, y el sensor de corriente para el módulo en general conectado al pin A13.

Figura 21 "Pines conectados a los Sensores de Corriente"



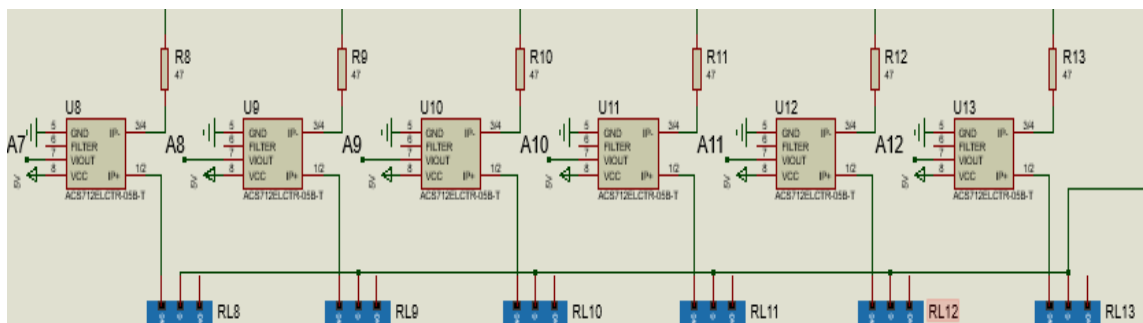
En la Figura 22 se pueden observar los sensores de corriente ACS712-5AT conectados del pin A0 al A6, como se puede ver, se ubican entre el módulo relé y la carga resistiva.

Figura 22 Sensores de corriente A0 al A6



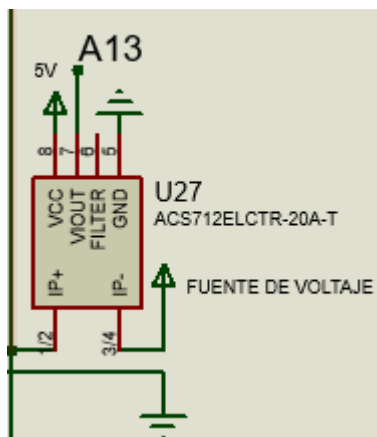
En la Figura 23 se encuentran los sensores correspondientes al pin A7 al A12, están colocados de la misma forma que los sensores de corriente anteriores.

Figura 23 Sensores de corriente A7 al A12



Por último, en la Figura 24 se encuentra el sensor de corriente general ACS712-20AT, este se ubicado justo en la entrada de la fuente exterior de voltaje, la cual varia para hacer las pruebas de funcionamiento, el pin asignado para este sensor es el pin A13.

Figura 24 Sensor de corriente general



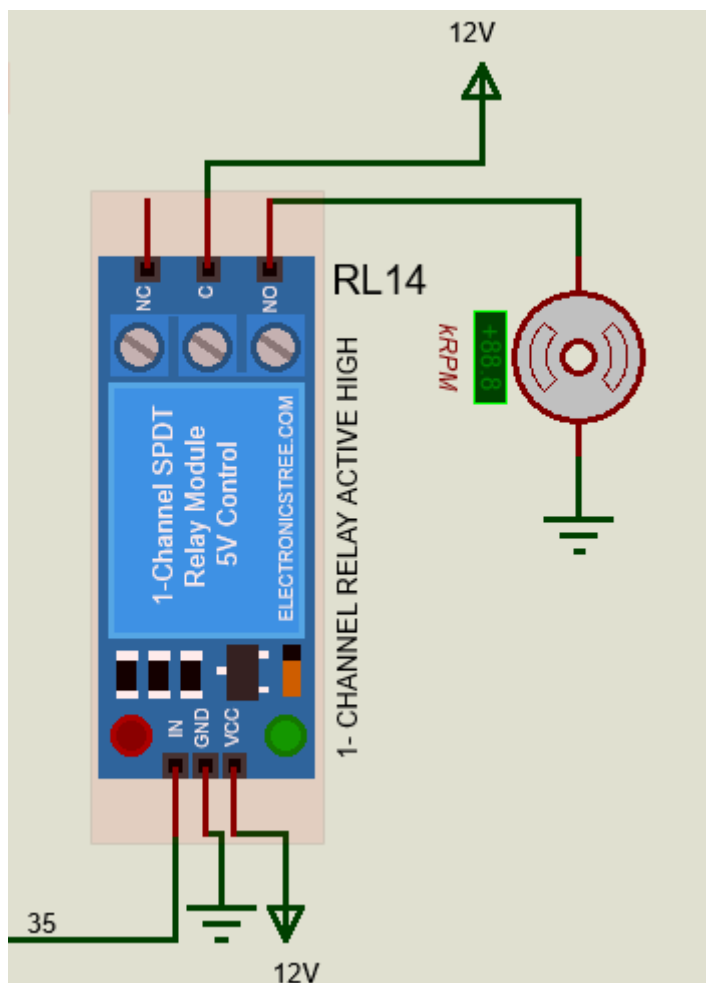
5. Ventilación

La ventilación del módulo se encarga de reducir la temperatura en los siguientes casos:

- Si la temperatura de modúló llega a niveles críticos mayores a los 100°C que es el límite de temperatura para un funcionamiento correcto de los sensores DS18B20.
- Para tratar de llegar a la temperatura inicial después de haberse realizado una prueba.

En la Figura 25 se puede observar la conexión del sistema de ventilación, este sistema esta alimentado por 12V para su correcto funcionamiento, en el módulo se ubican estratégicamente para tener un buen sistema de ventilación.

Figura 25 Ventilación



6. LCD 20x4.

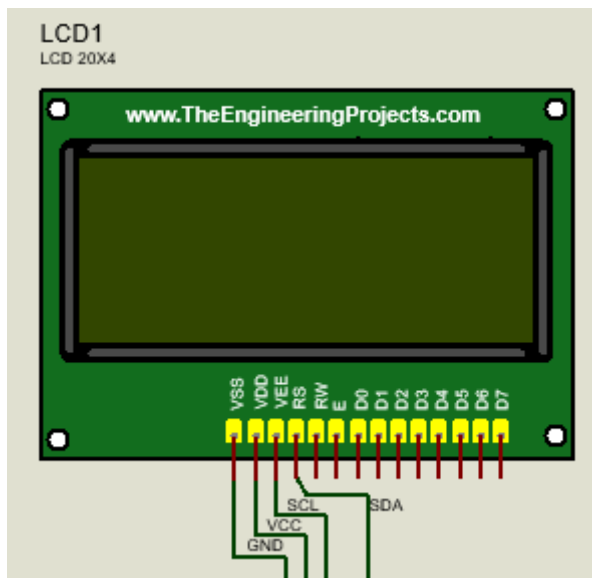
En la Figura 26 se puede observar simplemente una imagen referencial, al tratarse de un LCD 20x4, utiliza un módulo de conexión I2C, en el que posee los pines de

conexión VCC, GND, SCL y SDA, mismos que posee el Arduino Mega 2560 para una conexión directa.

En el LCD real presenta los siguientes datos en sus 4 renglones disponibles:

- PEJG (Pérdidas por efecto Joule del módulo), I (Corriente General).
- Resistencia (Resistencia seleccionada por el cursor). I (Corriente de la resistencia)
- Tmp (Temperatura de la Resistencia), PEJU (Pérdidas por efecto Joule de la resistencia seleccionada).
- Estado (Si la temperatura esta pronto a llegar a los 100°C, sale una advertencia y posteriormente ERROR si se sobrepasa la temperatura, aquí todas las resistencias se desconectan y se enciende automáticamente la ventilación)

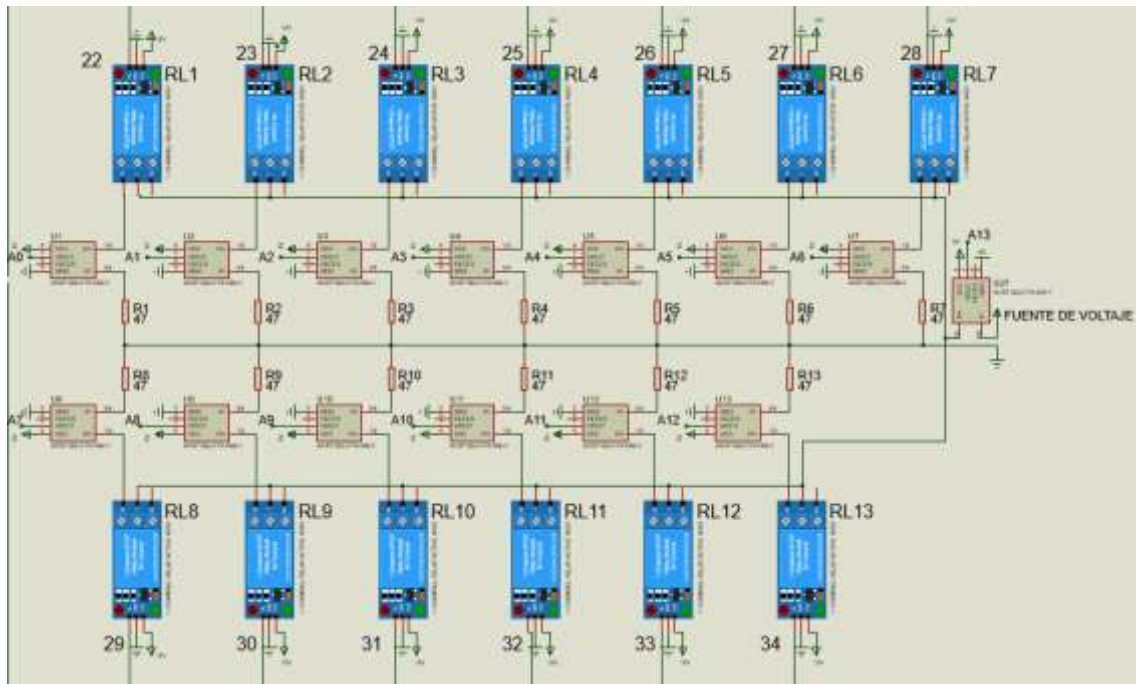
Figura 26 LCD de Referencia



7. Banco de carga resistiva.

En la Figura 27 se representa la conexión del banco de resistencias, como se calculó anteriormente cada unidad de resistencia es de un valor de 47Ω , todas están conectadas en paralelo para poder reducir su resistencia efectiva, los pines con los que se activan los relés van del pin 22 al 34.

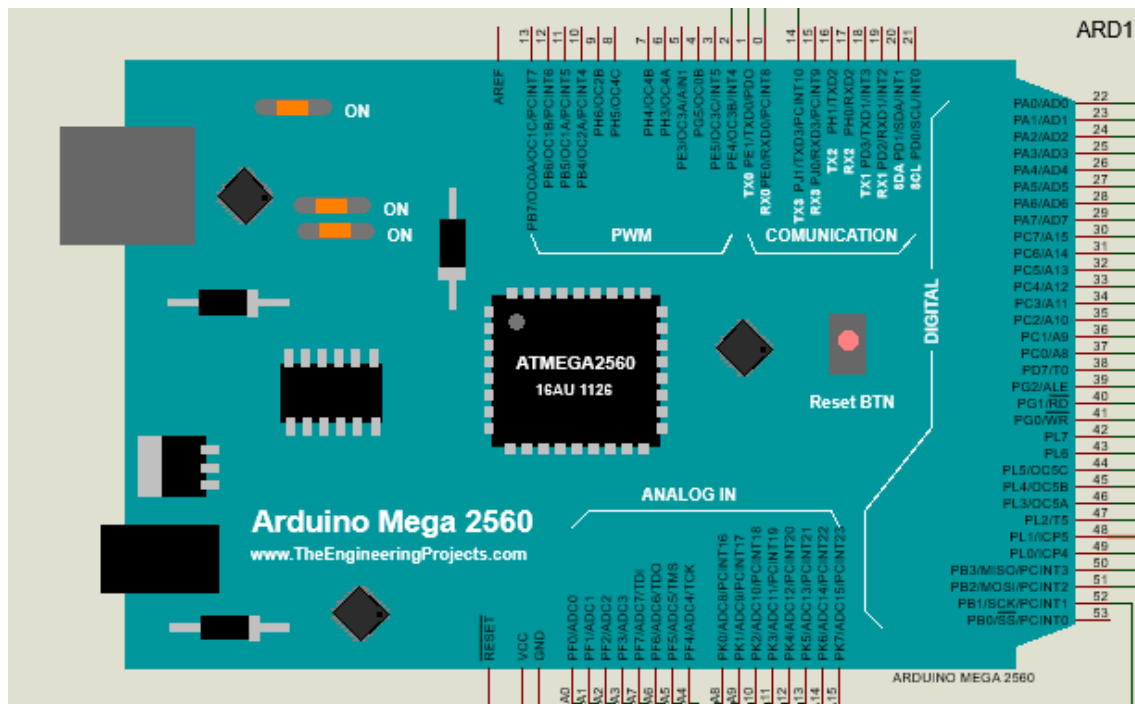
Figura 27 Banco de Carga Resistiva



8. Arduino Mega 2560.

Finalmente, en la Figura 28, se tiene representado el Arduino Mega 2560, encargado de controlar y monitorear el módulo.

Figura 28 Arduino Mega2560 en Proteus



Con esta última figura de este apartado, se tiene todo el circuito de conexión del módulo, con esto se procede a armar un prototipo para diseñar el módulo.

4.1.3 Diseño del módulo del banco de carga resistiva

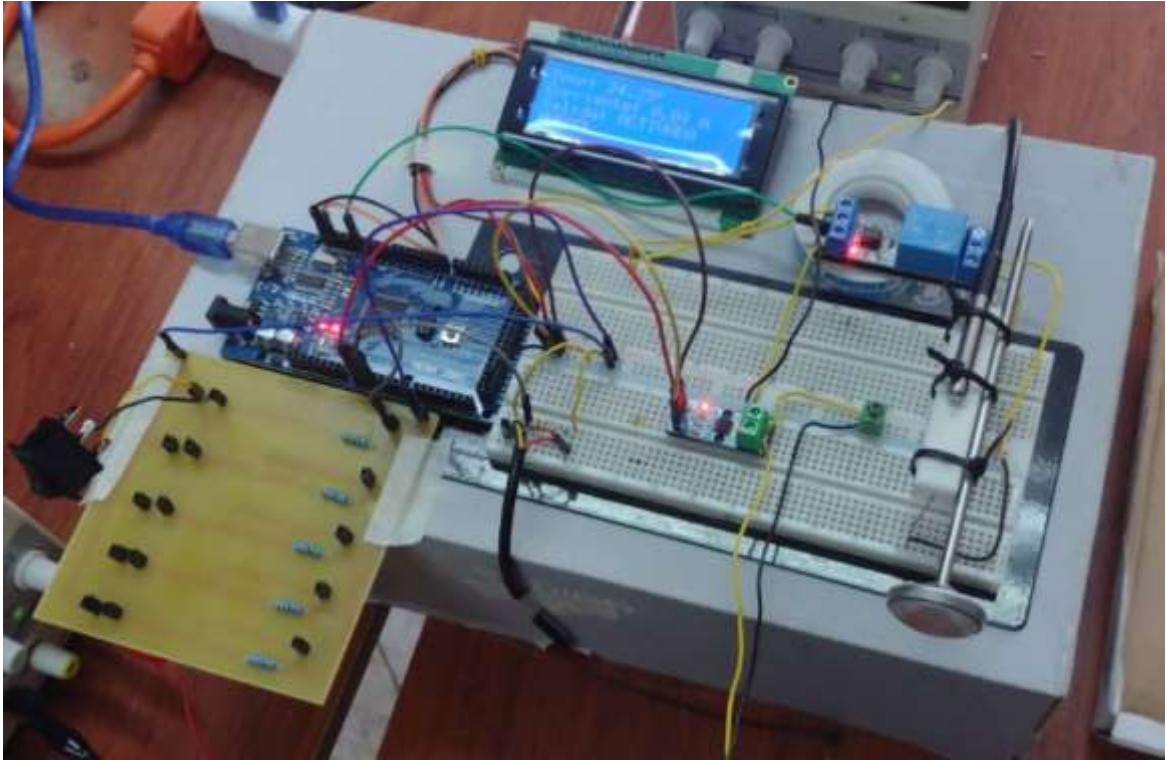
Se profundiza esta etapa con el fin de evidenciar el proceso de diseño en esta parte debido a su importancia, se debe considerar la influencia de un ambiente abierto o cerrado con el fin de comparar la teoría con la práctica, al comparar distintas configuraciones, se elige la que mejor represente el fenómeno.

Para encontrar el mejor ambiente se desarrollan dos ambientes, uno abierto y otro cerrado, posteriormente se hace una comparación y en base a esto se determina el aumento de temperatura teórico ideal para finalizar haciendo una comparación de resultados y tomar una decisión de construcción. A continuación, se presenta los resultados.

Ambiente Abierto

En la Figura 29 se puede observar el prototipo de ambiente abierto, exclusivo para esta prueba, por tanto, es simple.

Figura 29 Ambiente Abierto



Con este prototipo se procede a realizar la ejecución de pruebas con duración de 3 minutos a diferentes voltajes, el valor real de la resistencia usada es de $48,7\Omega$. El acrónimo de las tablas se explica a continuación:

- **Temp.** -Temperatura
- **T0.**- Temperatura inicial
- **Tf.** – Temperatura final (Después de pasado cierto tiempo)
- **ARD.** – Hace referencia al dueño de dicha medición, en este caso los sensores DS18B20.
- **Trm.** - Hace referencia al dueño de dicha medición, en este caso el termómetro de cocina empleado para la calibración.

Con estos puntos aclarados, en la Tabla 14 se presentan los datos obtenidos durante las pruebas realizadas en un ambiente abierto de la Figura 30.

Tabla 14 Datos Ambiente Abierto

Temp °C				Valores Reales				Valores Teóricos		% Error	
T0 ARD	T0 Trm	Tf ARD	Tf Trm	V (V)	I (A)	R (Ω)	P (W)	I (A)	P (W)	I	Tf
23,5	24	85,62	85	30	0,6	48,7	18,3	0,62	18,49	1,02	0,72
23,5	24	82,12	82,5	29	0,6	48,7	17,11	0,60	17,28	0,96	0,46
23,5	24	77,87	78	28	0,6	48,7	15,96	0,58	16,11	0,90	0,17
23,5	24	74,56	75	27	0,6	48,7	15,12	0,55	14,98	0,97	0,59
23,5	24	71,87	72	26	0,5	48,7	13,78	0,53	13,89	0,77	0,18
23,5	24	59,31	59,5	25	0,5	48,7	12,75	0,51	12,84	0,69	0,32
23,5	24	59,06	59	24	0,5	48,7	12	0,49	11,83	1,42	0,10
23,5	24	58,9	59	23	0,5	48,7	10,81	0,47	10,87	0,52	0,17
23,5	24	59,5	59,5	22	0,5	48,7	9,9	0,45	9,94	0,43	0,00
23,5	24	58,63	57	21	0,4	48,7	9,03	0,43	9,06	0,32	2,78
23,5	24	55,75	54,5	20	0,4	48,7	8,2	0,41	8,22	0,21	2,24
23,5	24	51,19	53	19	0,4	48,7	7,41	0,39	7,42	0,08	3,54
23,5	24	47,19	48	18	0,4	48,7	6,66	0,37	6,66	0,06	1,72
23,5	24	44,81	45	17	0,4	48,7	5,95	0,35	5,94	0,22	0,42
23,5	24	42,88	43	16	0,3	48,7	5,28	0,33	5,26	0,40	0,28
23,5	24	42,31	42,5	15	0,3	48,7	4,65	0,31	4,62	0,61	0,45
23,5	24	41	41,5	14	0,3	48,7	4,06	0,29	4,03	0,84	1,22
23,5	24	37,5	37,5	13	0,3	48,7	3,51	0,27	3,47	1,10	0,00
23,5	24	34,44	31	12	0,3	48,7	3	0,25	2,96	1,42	9,99

Ambiente Cerrado

De la misma forma se procede a realizar las pruebas en el prototipo, pero con la diferencia que esta vez se añade una caja que sirva de protección a la resistencia ante las brisas de frío o calores presentes en un ambiente abierto, con este elemento extra se le denomina como ambiente cerrado.

En la Figura 30 se puede ver el prototipo con este nuevo elemento añadido, algo a notar es que se agregaron 3 rejillas de ventilación a los costados con el fin de permitir circular un poco el aire.

Figura 30 Ambiente Cerrado



Las rejillas del prototipo también son las que se contemplan para ubicar el sistema de ventilación, de forma que exista entrada y salida de aire dentro del módulo para su enfriamiento.

Después de realizar las pruebas bajo estas condiciones se ordenan en la Tabla 15 todos los datos obtenidos. Los acrónimos usados tienen el mismo significado que se explicó anteriormente.

Tabla 15 Datos Ambiente Cerrado

Temp °C				Valores Reales				Valores Teóricos		% Error	
T0 ARD	T0 Trm	Tf ARD	Tf Trm	V (V)	I (A)	R (Ω)	P (W)	I(A)	P(W)	I	Tf
23,5	24	86,37	86,5	30	0,61	48,7	29,69	0,62	18,49	1,02	0,15
23,5	24	77	77	29	0,59	48,7	28,72	0,60	17,28	0,96	0,00

23,5	24	74,25	74,5	28	0,57	48,7	27,75	0,58	16,11	0,90	0,34
23,5	24	70,19	70	27	0,55	48,7	26,77	0,55	14,98	0,84	0,27
23,5	24	69,87	70	26	0,53	48,7	25,80	0,53	13,89	0,77	0,19
23,5	24	67,23	67,5	25	0,51	48,7	24,83	0,51	12,84	0,69	0,40
23,5	24	64,5	65	24	0,49	48,7	23,85	0,49	11,83	0,61	0,78
23,5	24	62,44	62,5	23	0,47	48,7	22,88	0,47	10,87	0,52	0,10
23,5	24	61,55	61,5	22	0,45	48,7	21,91	0,45	9,94	0,43	0,08
23,5	24	58,94	59	21	0,43	48,7	20,93	0,43	9,06	0,32	0,10
23,5	24	54,81	55	20	0,41	48,7	19,96	0,41	8,22	0,21	0,35
23,5	24	51,81	52	19	0,39	48,7	18,99	0,39	7,42	0,08	0,37
23,5	24	49,74	50	18	0,37	48,7	18,01	0,37	6,66	0,06	0,52
23,5	24	47,63	47,5	17	0,35	48,7	17,04	0,35	5,94	0,22	0,27
23,5	24	44,5	44,5	16	0,33	48,7	16,06	0,33	5,26	0,40	0,00
23,5	24	42,13	42	15	0,31	48,7	15,09	0,31	4,62	0,61	0,31
23,5	24	39,5	40	14	0,28	48,7	13,63	0,29	4,03	2,64	1,27
23,5	24	37,88	38	13	0,27	48,7	13,14	0,27	3,47	1,10	0,32
23,5	24	35,75	37	12	0,24	48,7	11,68	0,25	2,96	2,64	3,50

Cálculo de la temperatura teórica ideal

Ahora se realiza una estimación de las pérdidas de energía en forma de calor para los mismos voltajes y tiempos que las pruebas realizadas.

Primero se calcula la masa de la resistencia utilizada que tiene dimensiones aproximadas de $6\text{ cm} \times 1,2\text{ cm} \times 1,2\text{ cm}$ y una densidad de cerámica de aproximadamente $2,5\text{ g/cm}^3$.

$$m = 6,2\text{cm} \times 1,2\text{cm} \times 1,2\text{cm} \times 2,5\text{g/cm}^3$$

$$m = 22,32\text{g} \approx 0,022\text{kg}$$

También se calcula el Área aproximada de la resistencia que se trata de una forma rectangular que tiene dimensiones aproximadas de $6\text{ cm} \times 1,2\text{ cm} \times 1,2\text{ cm}$.

$$A = 2(lw + lw + lw)$$

$$A = 2(lw + lw + lw)$$

$$A = 0,003264\text{m}^2$$

Ahora se resuelve la Ecuación 9, que se trata de una ecuación diferencial de balance energético, esto para poder modelar el valor teórico ideal del aumento de temperatura que debería tener por las pérdidas por el efecto Joule.

$$mc \frac{dT}{dt} = P_{Joule} - h \cdot A \cdot (T - T_{amb})$$

Se resuelve analíticamente, para esto primero se aísla la derivada:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc} [P_{Joule} - h \cdot A \cdot (T - T_{amb})]$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{hA}{mc} T = \frac{P_{Joule}}{mc} + \frac{hA}{mc} T_{amb}$$

Con esta última ecuación se obtiene una ecuación diferencial de la forma:

$$\frac{dy}{dt} + ay = b$$

Cuya solución es:

$$y(t) = Ce^{-at} + \frac{b}{a}$$

Aplicada a la ecuación anterior se obtiene:

$$T(t) = Ce^{-\frac{hA}{mc}t} + \left(\frac{P_{Joule} + hAT_{amb}}{hA} \right)$$

Para $t(0) = 0$, se conoce que $T(0) = T_{amb}$, entonces:

$$T_{amb} = C + \left(\frac{P_{Joule} + hAT_{amb}}{hA} \right)$$

$$C = -\frac{P_{Joule}}{hA}$$

Sustituyendo “C” en la ecuación:

$$T(t) = \left(-\frac{P_{Joule}}{hA} \right) e^{-\frac{hA}{mc}t} + \left(\frac{P_{Joule} + hAT_{amb}}{hA} \right)$$

Finalmente, como resultado se obtiene la ecuación de la temperatura teórica ideal por pérdidas por efecto Joule:

$$T(t) = T_{amb} + \frac{P_{Joule}}{hA} \left(1 - e^{-\frac{hA}{mc}t} \right) \quad (9)$$

Antes de sacar los datos teóricos ideales de las pruebas, se realiza la estimación el coeficiente de convección “h”. Para ello utilizamos esta ecuación analítica y tomamos una muestra promedio del ambiente cerrado y abierto a 30V debido a que se trata de mediciones similares gracias a que se llega a un equilibrio térmico.

Entonces $(85,62 + 86,37) / 2 = 85.995^{\circ}\text{C}$. Con esto se busca que a 30V con un tiempo final de 180s (3 minutos) se tiene una temperatura de 85.995°C , esto con el fin de ser imparcial ante las pruebas. Usando Ecuación 6 y 4 se reemplaza en la Ecuación 7 y se calcula la capacidad calorífica específica del material.

$$c = \frac{E}{m \cdot \Delta T}$$

$$c = \frac{\frac{V^2}{R} \cdot t}{m \cdot (T_F - T_i)}$$

$$c = \frac{\frac{30^2}{48,7} \cdot 180}{0,022 \cdot (85,995 - 23,5)} = 2419,458 \frac{J}{kg}$$

Ahora, se estima iterativamente “h” siguiendo el siguiente proceso:

1. Se elige un valor inicial de “h” por ejemplo, 13.
2. Se calcula la temperatura resultante con la fórmula
3. Se compara con 85.995°C
4. Si está muy lejos, se ajusta el valor de “h” hacia arriba o abajo
5. Se repite hasta que la diferencia sea menor a un margen de 0.001°C

En la Tabla 16 se puede observar una pequeña parte del ajuste realizado.

Tabla 16 Ajuste de h

h	V	I	P	Tmp F
---	---	---	---	-------

1	30	0,62	18,48	85,965
0,1	30	0,62	18,48	85,961
0,01	30	0,62	18,48	85,992
0,001	30	0,62	18,48	85,995

El valor de “h” es de 0,001. Pero este valor es muy bajo para un valor típico como el aire, sin embargo, funciona para modelar y predecir la temperatura.

Con todos estos resultados se procede a calcular la temperatura final en 3 minutos con una temperatura inicial de 23,5°C para todos los voltajes del 12 al 30 y se organiza la Tabla 17.

Tabla 17 Temperatura Final Teórica

V(V)	R	I(A)	P(W)	Temp F Teórica (°C)
12	48,7	0,616	18,5	33,44
13	48,7	0,267	3,47	35,17
14	48,7	0,287	4,02	37,04
15	48,7	0,308	4,62	39,04
16	48,7	0,329	5,26	41,18
17	48,7	0,349	5,93	43,46
18	48,7	0,37	6,65	45,87
19	48,7	0,39	7,41	48,43
20	48,7	0,411	8,21	51,12
21	48,7	0,431	9,06	53,95
22	48,7	0,452	9,94	56,92
23	48,7	0,472	10,9	60,03
24	48,7	0,493	11,8	63,28
25	48,7	0,513	12,8	66,66
26	48,7	0,534	13,9	70,18

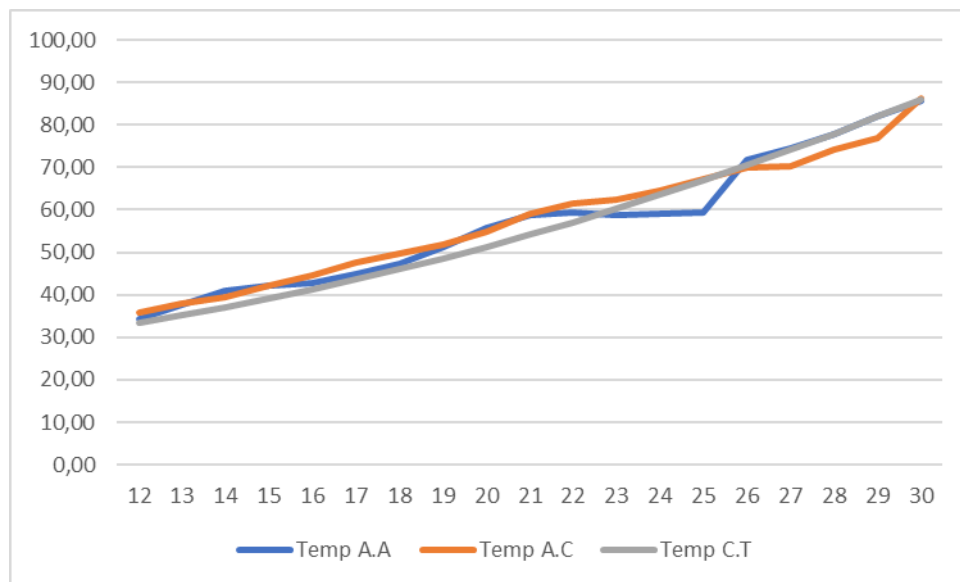
27	48,7	0,554	15	73,84
28	48,7	0,575	16,1	77,64
29	48,7	0,595	17,3	81,58
30	48,7	0,616	18,5	85,65

Comparación de resultados de pruebas

Ahora se realiza una comparación de la temperatura obtenida con el sensor de calor DS18B20 en un ambiente abierto, cerrado y el teórico calculado. En la Figura 31, se puede observar el comportamiento de estos tres resultados en donde:

- Temp A.A: Temperatura en el ambiente abierto.
- Temp A.C: Temperatura en el ambiente cerrado.
- Temp C.T: Temperatura teórica calculada.

Figura 31 Comparación de Resultados

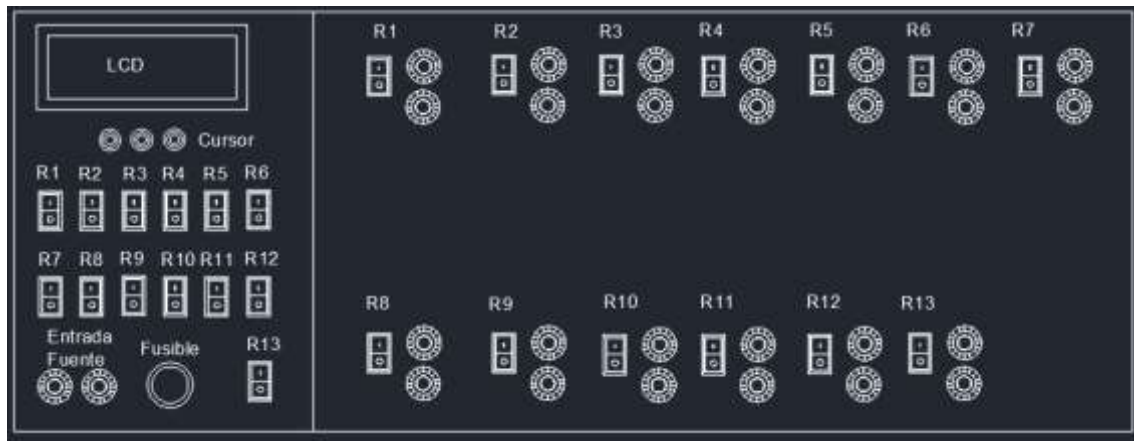


Al comparar la curva de crecimiento de los tres casos, se observa que, en un ambiente abierto, los valores de temperatura son inestables, por otro lado, en un ambiente cerrado los resultados obtenidos son más estables, motivo por el cual se toma la decisión de construir el módulo en un ambiente cerrado, aislado del ambiente externo, de forma que se pueda ejercer un cierto control.

Diseño en AutoCAD

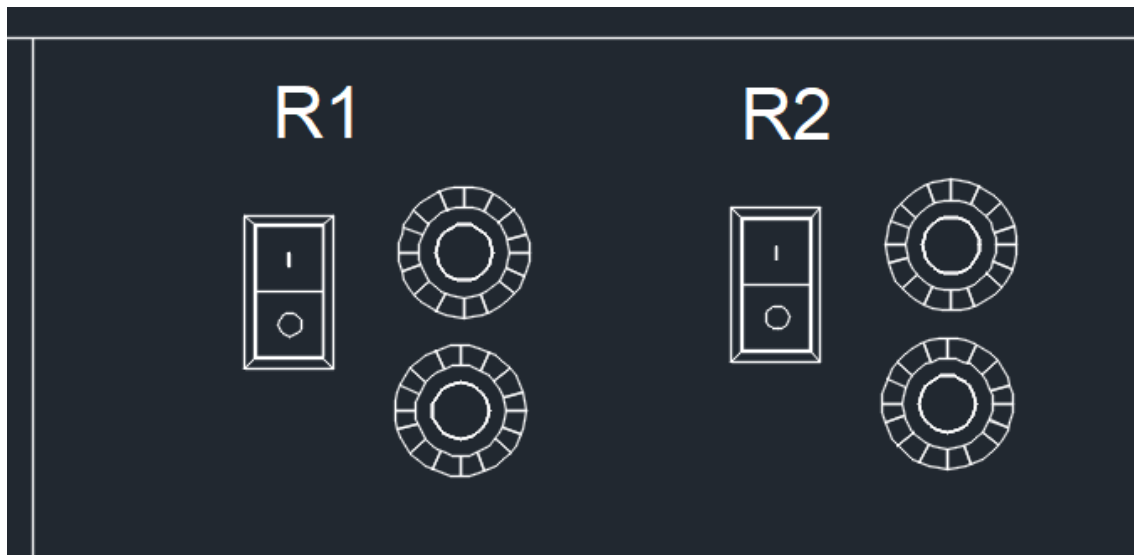
Con el ambiente escogido, se procede a crear el diseño en AutoCAD. En la Figura 32 se puede observar cómo se ve el módulo por fuera.

Figura 32 Exterior del módulo



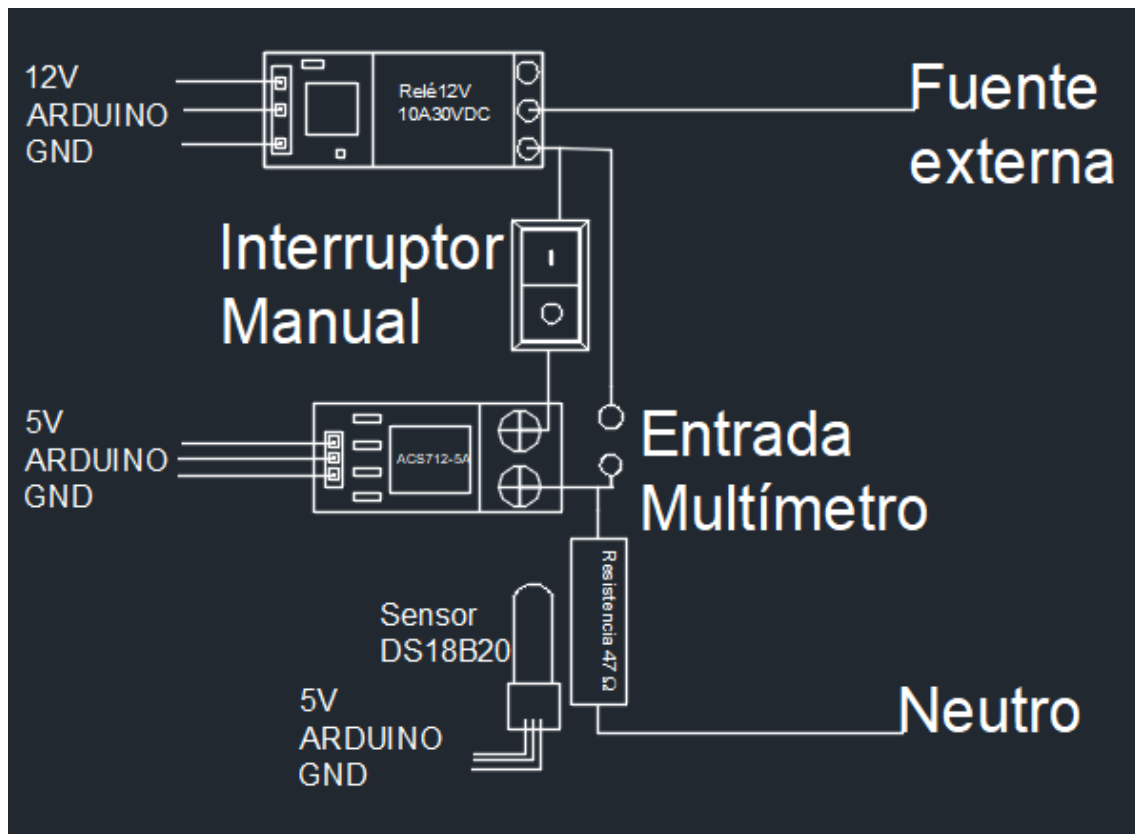
En la Figura 33, se tiene un acercamiento a la zona de las resistencias, en donde se agrega un interruptor manual para desconectar la resistencia y poder utilizar las entradas de punta de banana para usar el multímetro y verificar los niveles de corriente. En caso de no conectar el multímetro se vuelve a conectar el interruptor. De esta forma no se tiene que estar desarmando y desconectando partes del módulo para verificar la corriente.

Figura 33 Entrada de Multímetro



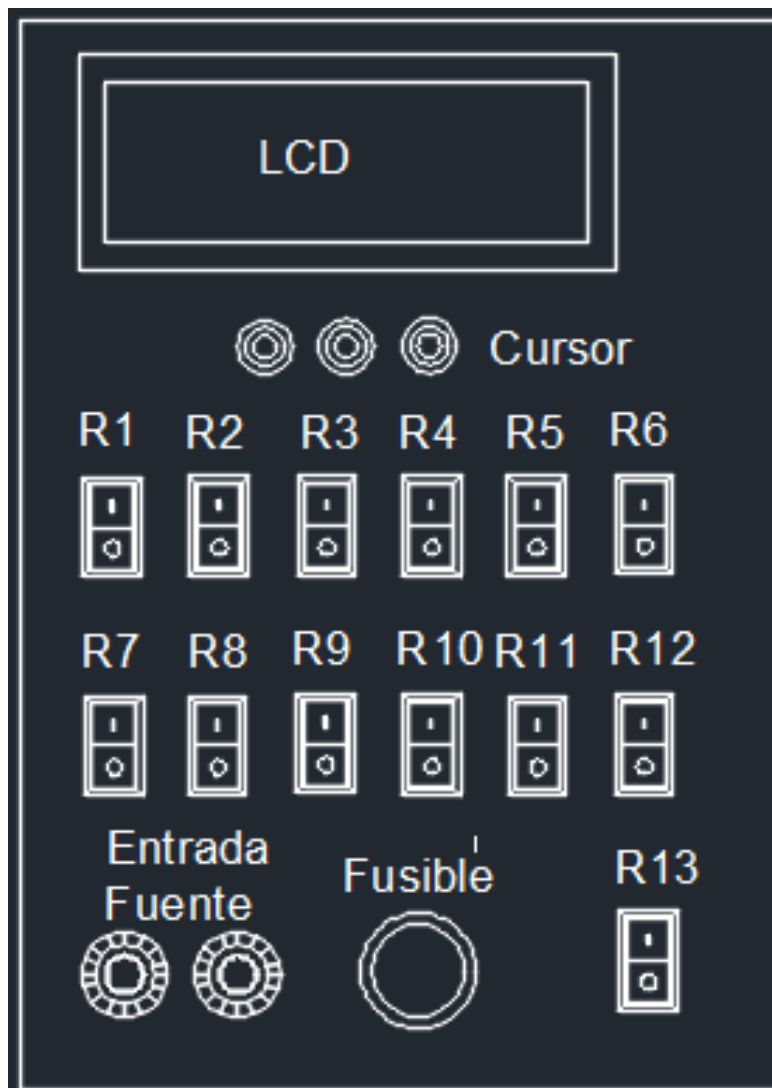
Internamente la conexión de dispositivos en esta zona es similar a la Figura 34. Aquí se puede ver la conexión que tiene cada elemento y la ubicación del mismo.

Figura 34 Vista interna de la Resistencia



En la Figura 35, se tiene la parte de control del módulo, en donde se puede activar las resistencias de forma remota en caso de no necesitar verificar la corriente con el multímetro, también se ubica la entrada para la fuente de voltaje exterior y junto a ella el fusible de protección que se dimensiona más adelante.

Figura 35 Control del módulo



4.1.4 Dimensionamiento del fusible de protección

Para dimensionar el valor del fusible, primero se calcula la potencia total de la carga del módulo.

$$P_{Total} = 13 \times 20W = 260W$$

Ahora la corriente total consumida a máxima potencia.

$$I_{Carga} = \frac{P_{Total}}{V_{mp}} = \frac{260}{30,6} = 8,5A$$

Según normas de protección de sistemas solares (NEC 690), los fusibles se dimensionan al 125% de la corriente máxima esperada:

$$I_{Fusible} = 1,25 \times I_{Carga} = 10,63$$

Los fusibles comerciales vienen en valores estándar. El valor comercial superior más cercano a 10,63 A sería 15A. Pero este valor se considera algo sobredimensionado, entonces se selecciona un fusible de 10A.

4.2 Pruebas experimentales y recopilación de datos.

Con el módulo ya construido como se observa en la Figura 36 cuyo código se encuentra ubicado en el Anexo D, se procedió a la realización de las pruebas experimentales correspondientes. En este proceso, se planificó exponer las resistencias a diferentes niveles de voltaje; sin embargo, debido a la similitud eléctrica entre las resistencias utilizadas (todas de $47\ \Omega$ y 20 W) y al comportamiento predecible que presentan ante variaciones de voltaje en configuraciones equivalentes, se optó por llevar a cabo un conjunto representativo de pruebas en lugar de evaluar individualmente cada resistencia bajo todos los niveles de voltaje disponibles. Esta estrategia permite validar el funcionamiento del módulo de forma eficiente, sin comprometer la validez de los resultados.

Figura 36 Módulo de carga resistiva con control y monitoreo



Por tal motivo, se decidió realizar únicamente diez mediciones por resistencia, utilizando niveles de voltaje comprendidos entre 12 V y 21 V, con incrementos de 0,1 V. Esta decisión, alineada con las pruebas realizadas durante la etapa de diseño del módulo,

responde al objetivo de mantener condiciones controladas que no afecten la estabilidad térmica ni las características eléctricas de los elementos resistivos. El rango seleccionado permite observar el comportamiento progresivo del efecto Joule sin inducir sobrecargas térmicas que podrían alterar el valor nominal de las resistencias debido a exposiciones prolongadas a niveles elevados de potencia. Asimismo, este intervalo garantiza la repetibilidad de las mediciones, evita degradaciones prematuras del material resistivo y representa adecuadamente el comportamiento del módulo bajo condiciones operativas reales y seguras. El manual de uso del módulo se encuentra detallado en el Anexo E.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a diferentes voltajes de los diferentes parámetros medidos. Cada prueba dura un tiempo estimado de 3 minutos y una temperatura inicial de 23,5°C. Durante las siguientes secciones se realiza la comparación de los valores obtenidos de corriente, temperatura y energía real contra los teóricos. Con estos datos se estima el porcentaje de error.

4.2.1 Corrientes obtenidas

En esta sección se adjuntan y comparan los valores de las corrientes obtenidas durante las pruebas. Se realizaron dos pruebas por voltaje, encendiendo solo la mitad de las resistencias, las cuales se dividieron en dos grupos que van de R1 a R7 y de R8 a R13.

Ahora en la Tabla 18 se presentan los datos individuales obtenidos por los sensores de corriente del módulo, estos fueron tomados de la pantalla LCD al momento de pausar las medidas mediante el botón de STOP.

Tabla 18 Corrientes Medidas

Corriente Medida (A)											
Resistencias		Voltajes									
R#	Valor	12V	13V	14V	15V	16V	17V	18V	19V	20V	21V
R1	48,6	0,26	0,28	0,30	0,32	0,35	0,37	0,40	0,40	0,42	0,45
R2	47,1	0,24	0,27	0,28	0,30	0,34	0,36	0,37	0,41	0,44	0,42
R3	48,1	0,26	0,27	0,29	0,30	0,34	0,36	0,39	0,41	0,40	0,44
R4	47,2	0,26	0,29	0,31	0,30	0,33	0,37	0,38	0,39	0,43	0,46
R5	47,4	0,25	0,29	0,30	0,32	0,33	0,34	0,39	0,37	0,40	0,42
R6	47,8	0,27	0,28	0,30	0,30	0,32	0,35	0,40	0,40	0,45	0,47
R7	47,9	0,25	0,28	0,29	0,31	0,35	0,36	0,37	0,38	0,42	0,45
R8	47,4	0,24	0,27	0,31	0,33	0,32	0,36	0,40	0,38	0,41	0,45
R9	47,4	0,26	0,28	0,29	0,32	0,34	0,38	0,40	0,42	0,41	0,43

R10	47,3	0,27	0,26	0,31	0,31	0,32	0,36	0,39	0,39	0,41	0,42
R11	48,9	0,25	0,27	0,29	0,31	0,35	0,36	0,39	0,42	0,43	0,46
R12	47,1	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	0,37	0,36	0,40	0,40	0,44
R13	46,7	0,26	0,28	0,28	0,32	0,32	0,34	0,38	0,42	0,44	0,44

La corriente general del sistema durante las pruebas realizadas se refleja en la Tabla 19, estas medidas fueron obtenidas gracias al sensor general de ACS712-20A.

Tabla 19 Corriente General

Voltaje (V)	Grupo 1 (1-7)	Grupo 2 (8-13)
12 V	1,79	1,53
13 V	1,94	1,64
14 V	2,05	1,76
15 V	2,15	1,90
16 V	2,35	1,97
17 V	2,50	2,15
18 V	2,68	2,31
19 V	2,75	2,43
20 V	2,94	2,50
21 V	3,10	2,64

4.2.2 Temperaturas Obtenidas

En esta sección se presenta las temperaturas registradas por los sensores del módulo. La información se redacta en la Tabla 20.

Tabla 20 Temperaturas Unitarias

Temperatura Medida (°C)											
Resistencias		Voltajes									
R#	Valor	12V	13V	14V	15V	16V	17V	18V	19V	20V	21V
R1	48,6	36,47	37,14	40	42,16	44,53	47,19	50,11	50,58	55,07	60,68
R2	47,1	35,85	36,96	40,01	41,73	45,34	46,7	51,12	51,25	54,15	57,93
R3	48,1	35,29	38,93	39,07	42,08	45,03	48,19	48	51,76	56,65	58,81
R4	47,2	36,11	36,72	38,96	41,86	45,46	48,96	50,16	51,54	53,59	58,04

R5	47,4	34,6	37,96	40,32	41,76	45,95	45,96	50,32	50,92	54,89	60,43
R6	47,8	35,9	37,06	39,92	42,79	43,88	46,96	49,94	50,78	55,62	59,49
R7	47,9	36,32	37,25	39,04	42,25	43,47	47,95	48,65	52,95	53,98	59,69
R8	47,4	35,93	36,91	40,41	43,48	44,33	46,46	48,39	52,17	53,47	59,44
R9	47,4	36,57	39,19	39,82	41,99	44,33	48,62	51,32	51,87	53,96	57,61
R10	47,3	36,17	37,87	38,84	40,94	43,71	46,27	50,07	50,07	54,94	60,27
R11	48,9	36,99	38,44	38,86	43,54	43,56	46,58	49,57	51,94	55,79	60,97
R12	47,1	36,31	38,61	39,3	43,42	43,56	47,31	49,05	53,21	55,43	57,1
R13	46,7	36,01	37,32	40,34	42,32	43,9	49	51,44	50,94	53,74	60,42

4.2.3 Energía disipada

La energía disipada por unidad se presenta en la Tabla 21. Esta medida fue tomada con el voltaje seteado en el inicio junto con las lecturas del sensor de corriente individual de cada resistencia.

Tabla 21 Energía disipada

Energía Disipada Medida (J)										
R#	Voltajes									
	12V	13V	14V	15V	16V	17V	18V	19V	20V	21V
R1	570,2	648,2	748,4	864,0	999,4	1141,4	1296,0	1354,3	1515,6	1697,2
R2	524,9	631,8	703,1	810,0	985,0	1089,4	1192,3	1415,9	1569,6	1591,4
R3	557,3	622,4	718,2	807,3	964,8	1098,5	1250,6	1395,4	1429,2	1663,2
R4	563,8	676,3	776,2	818,1	956,2	1126,1	1218,2	1323,5	1540,8	1719,9
R5	542,2	666,9	753,5	858,6	941,8	1028,2	1250,6	1275,7	1425,6	1595,2
R6	576,7	643,5	751,0	812,7	921,6	1080,2	1283,0	1364,6	1602,0	1765,3
R7	529,2	652,9	725,8	837,0	1008,0	1095,5	1205,3	1285,9	1497,6	1689,7
R8	509,8	624,8	768,6	901,8	927,4	1098,5	1292,8	1292,8	1458,0	1685,9
R9	553,0	643,5	723,2	853,2	967,7	1150,6	1292,8	1429,6	1490,4	1614,1
R10	576,7	617,8	771,1	845,1	910,1	1086,3	1247,4	1323,5	1472,4	1595,2
R11	542,2	636,5	728,3	823,5	999,4	1107,7	1260,4	1443,2	1544,4	1746,4
R12	572,4	650,5	748,4	837,0	953,3	1120,0	1179,4	1381,7	1447,2	1648,1
R13	553,0	662,2	703,1	864,0	921,6	1028,2	1215,0	1443,2	1591,2	1678,3

La energía disipada en cada grupo se presenta en la Tabla 22, estas medidas son sacadas gracias a las lecturas proporcionadas por el sensor de corriente general y el voltaje seteado al inicio.

Tabla 22 Energía Disipada por grupo

Energía Disipada (J)		
Voltajes	Grupo 1 (1-7)	Grupo 2 (8-13)
12	3812,40	3306,96
13	4525,56	3835,26
14	5133,24	4442,76
15	5780,70	5124,60
16	6727,68	5679,36
17	7588,80	6591,24
18	8598,96	7487,64
19	9394,74	8314,02
20	10540,80	9003,60
21	11649,96	9967,86

Con esta Tabla se obtiene una muestra grande para analizar y poder verificar el correcto funcionamiento a nivel general.

4.3 Análisis de datos

En este apartado se analiza los datos teóricos o calculados contra los valores obtenidos en la recopilación de datos de las pruebas experimentales. Para ello se estima y compara el error entre las diversas pruebas realizadas, dividiéndose entre los principales parámetros estudiados que son: Corriente, Temperatura y Energía Disipada. Con esto se estima un error general de todo el sistema y se estima la precisión del mismo.

4.3.1 Comparación de corrientes

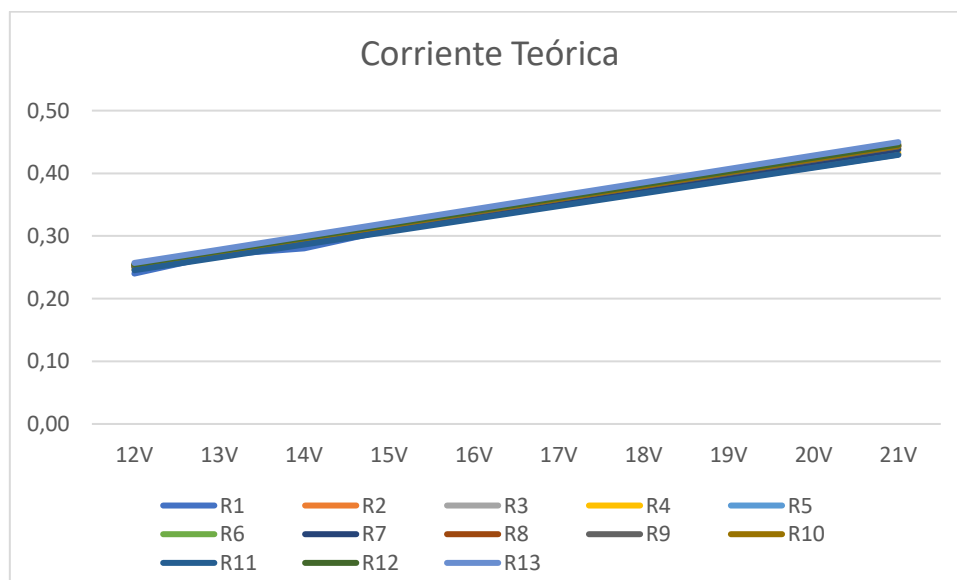
Primero se compara la corriente del sistema, para ello se estima la corriente teórica o ideal con el voltaje seteado y el valor real de la resistencia correspondiente, estos valores están redondeados hasta dos decimales, la información se recopila en la Tabla 23.

Tabla 23 Corriente teórica o ideal

Corriente Teórica (A)											
Resistencias		Voltajes									
R#	Valor	12V	13V	14V	15V	16V	17V	18V	19V	20V	21V
R1	48,6	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43
R2	47,1	0,25	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,45
R3	48,1	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,40	0,42	0,44
R4	47,2	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43
R5	47,4	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44
R6	47,8	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44
R7	47,9	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,38	0,40	0,42	0,44
R8	47,4	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44
R9	47,4	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44
R10	47,3	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44
R11	48,9	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43
R12	47,1	0,25	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,45
R13	46,7	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,39	0,41	0,43	0,45

Para un mejor análisis se grafican estos resultados en la Figura 37, aquí se compran los diferentes aumentos de corriente conforme al aumento de voltaje estimados para cada resistencia. Estos valores fueron calculados mediante el uso de la Ecuación 1, que es un despeje de la Ley de Ohm.

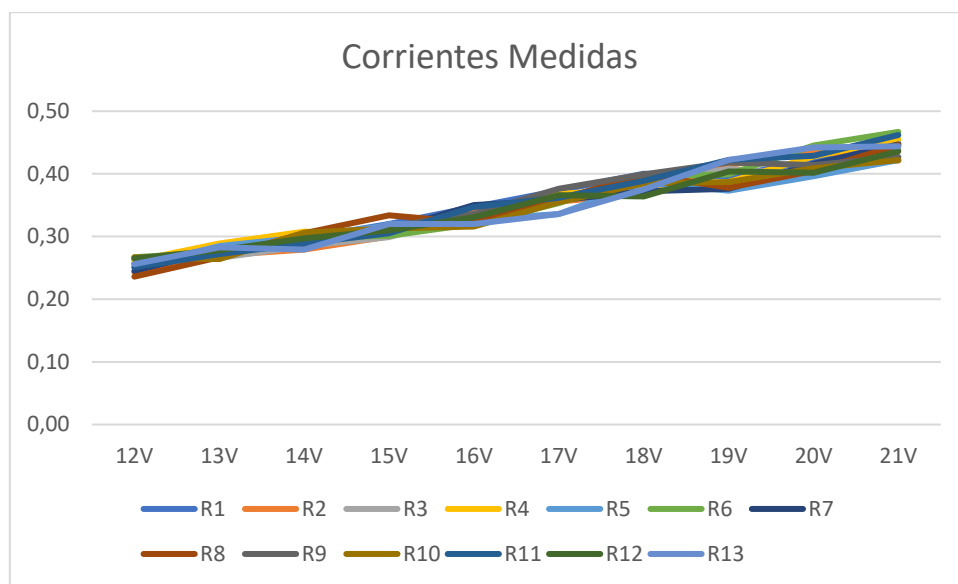
Figura 37 Comparación de corrientes Teóricas



Como se puede esperar, la curva de crecimiento de la corriente entre las resistencias del modulo es similar y crecen constantemente, las diferencias de este crecimiento son debido al valor real de cada resistencia, el cual varia en cada unidad, esto produce esta ligera variación entre cada curva.

Ahora en la Figura 38, se puede observar los datos de la Tabla 18, estos valores caben recalcar que son los que registra el modulo elaborado, mismo que emplea los sensores ASC712-5A para cada unidad de resistencia.

Figura 38 Comparación de corrientes medidas



A diferencia de la Figura 37, la Figura 38 presenta una mayor variación que se estima es provocada por múltiples factores externos e inherentes al sistema, principalmente por el margen de error que posee el sensor ASC712-5A, que tiene una precisión de $\pm 5\%$.

En la Tabla 24, se presenta el margen de error entre la corriente real y calculada de las Tablas 18 y 23.

Tabla 24 Porcentaje de error entre las corrientes medidas y calculadas

% Error													
R#	Voltaje										Min.	Máx.	Prom.
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21			
R1	9,09	2,59	6,07	3,23	5,15	6,57	8,11	1,54	2,68	4,42	1,54	9,09	4,95
R2	4,62	2,18	6,14	5,80	0,68	1,37	3,71	2,63	2,68	5,58	0,68	6,14	3,54
R3	3,42	1,58	2,08	4,12	0,71	1,58	3,15	3,29	4,52	0,78	0,71	4,52	2,52
R4	5,71	8,04	6,92	1,83	0,85	5,20	1,52	1,01	4,00	5,30	0,85	8,04	4,04
R5	0,86	3,92	1,23	0,49	3,13	6,32	1,65	6,95	6,15	4,75	0,49	6,95	3,54
R6	6,36	1,12	1,75	4,08	4,40	0,74	5,16	0,38	6,35	6,30	0,38	6,36	3,66
R7	2,20	2,80	1,46	1,01	4,78	0,87	1,01	5,21	0,37	1,96	0,37	5,21	2,17
R8	6,78	2,65	3,26	5,54	4,61	0,10	5,07	5,70	4,02	0,67	0,10	6,78	3,84
R9	1,12	0,27	2,83	0,14	0,46	4,84	5,07	4,28	1,88	3,62	0,14	5,07	2,45
R10	5,24	3,94	3,38	1,30	6,58	1,23	1,17	3,66	3,27	4,95	1,17	6,58	3,47
R11	2,28	2,31	0,94	0,57	6,05	4,13	5,68	8,61	4,89	7,58	0,57	8,61	4,30
R12	4,01	0,72	0,08	2,66	2,56	1,40	4,75	0,15	5,33	2,21	0,08	5,33	2,39
R13	0,37	1,66	6,93	0,37	6,60	7,70	2,71	3,72	3,21	1,26	0,37	7,70	3,45
											0,08	9,09	3,41

Como se puede observar el error mínimo es del 0,08% y puede llegar hasta el 9,09% en el peor de los casos, pero a nivel general se comete un error promedio del 3,41%, lo cual es bastante positivo ya que se puede considerar como un bajo nivel de error considerando la precisión que tienen los sensores usados.

4.3.2 Comparación de temperaturas.

Ahora se estiman las temperaturas teóricas y se organizan en la Tabla 25. Estos valores reflejan el valor ideal que deberían tener si siempre se tuvieran condiciones exactamente controladas.

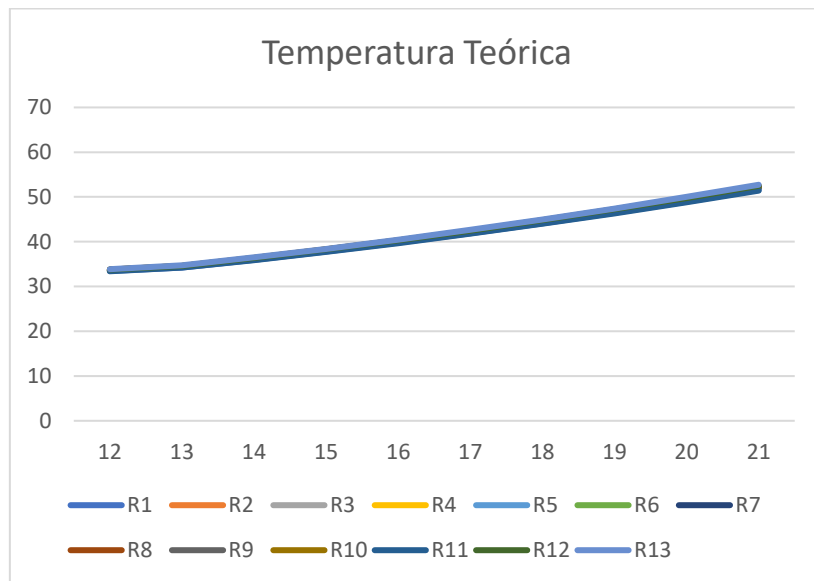
Tabla 25 Temperaturas teóricas o ideales

Temperatura Teórica (°C)											
Resistencias		Voltajes									
R#	Valor	12V	13V	14V	15V	16V	17V	18V	19V	20V	21V
R1	48,6	33,46	34,26	35,98	37,83	39,8	41,9	44,13	46,49	48,97	51,58
R2	47,1	33,78	34,60	36,38	38,28	40,32	42,49	44,79	47,22	49,78	52,48
R3	48,1	33,57	34,37	36,11	37,98	39,97	42,09	44,35	46,73	49,24	51,87
R4	47,2	33,76	34,58	36,35	38,25	40,29	42,45	44,74	47,17	49,73	52,41
R5	47,4	33,72	34,53	36,3	38,19	40,21	42,37	44,65	47,07	49,62	52,29
R6	47,8	33,63	34,44	36,19	38,07	40,07	42,21	44,48	46,87	49,4	52,05
R7	47,9	33,61	34,42	36,16	38,04	40,04	42,17	44,43	46,82	49,34	51,99
R8	47,4	33,72	34,53	36,3	38,19	40,21	42,37	44,65	47,07	49,62	52,29
R9	47,4	33,72	34,53	36,3	38,19	40,21	42,37	44,65	47,07	49,62	52,29
R10	47,3	33,74	34,56	36,32	38,22	40,25	42,41	44,7	47,12	49,67	52,35
R11	48,9	33,4	34,2	35,9	37,74	39,7	41,79	44,01	46,35	48,81	51,41
R12	47,1	33,78	34,60	36,38	38,28	40,32	42,49	44,79	47,22	49,78	52,48
R13	46,7	33,87	34,7	36,49	38,41	40,46	42,65	44,97	47,42	50,01	52,72

Estos valores fueron calculados mediante el uso de la Ecuación 9, que en el apartado anterior es utilizada para estimar la temperatura ideal en el diseño del módulo.

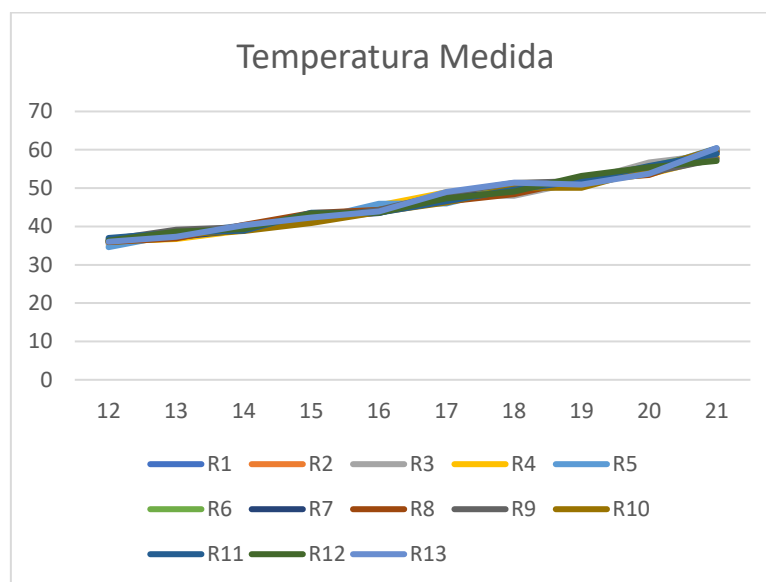
En la Figura 39, los datos de la Tabla 25 se logran apreciar de mejor forma, en donde al igual que la corriente, las temperaturas mantienen un crecimiento constante, teniendo solo pequeñas variaciones debido al valor real de cada resistencia.

Figura 39 Comparación de Temperaturas teóricas o ideales



Ahora en la Figura 40, se reflejan los datos de la Tabla 20, se puede observar el aumento de temperatura para cada resistencia expuesta a diferentes voltajes obtenidos durante las pruebas experimentales.

Figura 40 Comparación de Temperaturas medidas



Como se observa en la Figura 40, se tienen variaciones de temperatura, estas se producen por varios factores que influyen en la temperatura medida, tales como la temperatura ambiente, las pérdidas por conducción en el cableado, la disipación no

uniforme del calor, los errores instrumentales y la calidad del acoplamiento entre los sensores y las resistencias. Estos elementos introducen un margen de error inevitable que puede afectar la precisión de los resultados térmicos. Para tener una mejor comprensión de este efecto se realiza la Tabla 26 de errores entre las temperaturas.

Tabla 26 Porcentaje de error entre medidas calculadas y medidas

R#	%Error												
	Voltaje										Min	Máx.	Prom
	12V	13V	14V	15V	16V	17V	18V	19V	20V	21V			
R1	6,39	9,55	8,91	10,21	10,56	12,02	11,28	10,27	10,65	12,48	6,39	12,48	10,23
R2	5,77	6,37	9,08	8,26	11,07	9,02	12,39	7,86	8,07	9,41	5,77	12,39	8,73
R3	4,88	11,70	7,57	9,75	11,23	12,65	7,61	9,72	13,09	11,79	4,88	13,09	10,00
R4	6,51	5,83	6,70	8,62	11,38	13,30	10,80	8,48	7,21	9,69	5,83	13,30	8,85
R5	2,55	9,03	9,98	8,55	12,48	7,81	11,26	7,56	9,61	13,47	2,55	13,47	9,23
R6	6,32	7,07	9,34	11,04	8,67	10,11	10,94	7,69	11,19	12,50	6,32	12,50	9,49
R7	7,46	7,60	7,37	9,97	7,89	12,05	8,67	11,57	8,59	12,90	7,37	12,90	9,41
R8	6,16	6,44	10,18	12,17	9,28	8,81	7,72	9,78	7,21	12,02	6,16	12,17	8,98
R9	7,80	11,88	8,85	9,05	9,28	12,86	12,99	9,25	8,05	9,23	7,80	12,99	9,92
R10	6,72	8,75	6,48	6,64	7,92	8,35	10,73	5,89	9,59	13,13	5,89	13,13	8,42
R11	9,70	11,04	7,61	13,32	8,86	10,28	11,23	10,77	12,50	12,82	7,61	13,32	10,81
R12	6,96	10,37	7,43	11,83	7,44	10,19	8,69	11,26	10,19	8,10	6,96	11,83	9,25
R13	5,94	7,02	9,55	9,24	7,83	12,96	12,58	6,90	6,95	12,74	5,94	12,96	9,17
											2,55	13,47	9,42

En este apartado es donde se encuentra el mayor margen de error registrado, el cual tiene un 2,55% y un 13,47% en el peor de los casos. Como error promedio se estima que posee un 9,42% lo que indica que se tiene mayor nivel de variación, esto es un indicativo que la resistencia podría estar siendo afectada por el calor emitido por resistencias vecinas, el cual a la distancia en la que están situadas entre resistencias, la influencia de las mismas es mínima, para conocer el impacto se compara la temperatura alcanzada por la resistencia encendida de forma individual cuya información fue obtenida en la Tabla 17 durante las pruebas de diseño en un ambiente cerrado frente a su comportamiento térmico cuando fue activada junto a otras de valor similar dentro del módulo. Esta comparación permite identificar si existe una influencia térmica significativa entre resistencias adyacentes, lo cual podría afectar la precisión de las mediciones. La comparación se da en la Tabla 27.

Tabla 27 Comparación de temperaturas

Parámetros		Voltajes									
Tipo	Valor (Ω)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
E.U	48,6	35,75	37,88	39,5	42,13	44,5	47,63	49,74	51,81	54,81	58,94
E.M	48,6	35,8	37,9	39,5	42,13	44,5	47,63	49,74	51,81	54,81	58,94
%E	0	0,14	0,053	0	0	0	0	0	0	0	0

La información de la Tabla 17, se encuentra representada en la fila denominada como “E.U” (Encendido Unitario), y la fila denominada como “E.M” (Encendido Múltiple) son los datos correspondientes a la fila R1 correspondiente al Grupo 1 (donde se encendieron simultáneamente las resistencias de R1 a R7) se obtuvieron de la Tabla 20.

El error cometido entre ambas mediciones es muy pequeño, lo que indica que el calor generado en una resistencia tiene un efecto mínimo sobre resistencias vecinas. Por lo que la variación se asume a otros factores externos como la temperatura ambiente del laboratorio en el que se efectuó las pruebas, entre otras.

4.3.2 Comparación de energía disipada.

Finalmente se realiza la comparación de la energía disipada en la resistencia o también llamada como las pérdidas por efecto Joule.

Al igual que en los anteriores análisis, primero se estima la energía disipada por efecto Joule, gracias a la Ecuación 4 se elabora la Tabla 28.

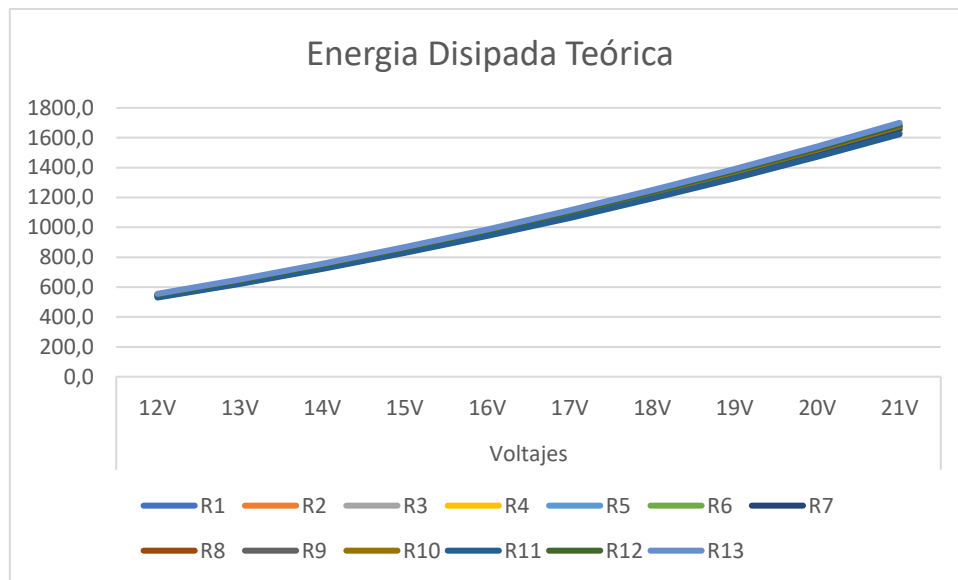
Tabla 28 Energía Disipada Estimada o Teórica

Energía Disipada Teórica (J)										
Resistencia	Voltajes									
	12V	13V	14V	15V	16V	17V	18V	19V	20V	21V
R1	533,3	625,9	725,9	833,3	948,1	1070,4	1200,0	1337,0	1481,5	1633,3
R2	550,3	645,9	749,0	859,9	978,3	1104,5	1238,2	1379,6	1528,7	1685,4
R3	538,9	632,4	733,5	842,0	958,0	1081,5	1212,5	1350,9	1496,9	1650,3
R4	533,3	625,9	725,9	833,3	948,1	1070,4	1200,0	1337,0	1481,5	1633,3
R5	546,8	641,8	744,3	854,4	972,2	1097,5	1230,4	1370,9	1519,0	1674,7
R6	542,3	636,4	738,1	847,3	964,0	1088,3	1220,1	1359,4	1506,3	1660,7

R7	541,1	635,1	736,5	845,5	962,0	1086,0	1217,5	1356,6	1503,1	1657,2
R8	546,8	641,8	744,3	854,4	972,2	1097,5	1230,4	1370,9	1519,0	1674,7
R9	546,8	641,8	744,3	854,4	972,2	1097,5	1230,4	1370,9	1519,0	1674,7
R10	548,0	643,1	745,9	856,2	974,2	1099,8	1233,0	1373,8	1522,2	1678,2
R11	530,1	622,1	721,5	828,2	942,3	1063,8	1192,6	1328,8	1472,4	1623,3
R12	550,3	645,9	749,0	859,9	978,3	1104,5	1238,2	1379,6	1528,7	1685,4
R13	555,0	651,4	755,5	867,2	986,7	1113,9	1248,8	1391,4	1541,8	1699,8

En la Figura 41, se puede observar de mejor manera los datos de la Tabla 28. Estos datos emplean la Ecuación 4 para su modelamiento ideal.

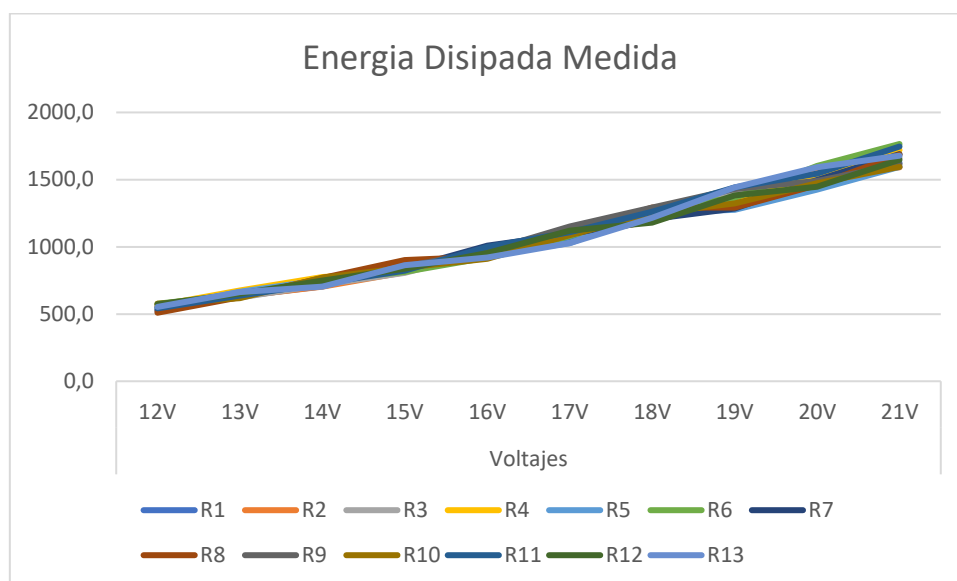
Figura 41 Comparación de la Energía Disipada en las resistencias



Como se espera, el crecimiento es constante, teniendo únicamente variación debido a la diferencia del valor resistivo de cada carga.

Al comparar los datos medidos graficados en la Figura 42 con la información de la Tabla 21, se logra visualizar las diferencias que se tienen entre mediciones registradas por los sensores.

Figura 42 Energía Disipada Medida



Se observa una diferencia mayor entre la temperatura. Con el propósito de obtener un valor numérico de la variación que se tiene, se estima el porcentaje de error para estos datos que se reflejan en la Tabla 29.

Tabla 29 % Error de Disipación de Energía

% Error													
R#	Voltajes										Min.	Max.	Prom.
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21			
R1	2,80	0,94	2,80	0,44	0,24	0,06	0,10	0,24	0,37	0,49	0,06	2,80	0,85
R2	4,62	2,18	6,14	5,80	0,68	1,37	3,71	2,63	2,68	5,58	0,68	6,14	3,54
R3	3,42	1,58	2,08	4,12	0,71	1,58	3,15	3,29	4,52	0,78	0,71	4,52	2,52
R4	5,71	8,04	6,92	1,83	0,85	5,20	1,52	1,01	4,00	5,30	0,85	8,04	4,04
R5	0,86	3,92	1,23	0,49	3,13	6,32	1,65	6,95	6,15	4,75	0,49	6,95	3,54
R6	6,36	1,12	1,75	4,08	4,40	0,74	5,16	0,38	6,35	6,30	0,38	6,36	3,66
R7	2,20	2,80	1,46	1,01	4,78	0,87	1,01	5,21	0,37	1,96	0,37	5,21	2,17
R8	6,78	2,65	3,26	5,54	4,61	0,10	5,07	5,70	4,01	0,67	0,10	6,78	3,84

R9	1,12	0,27	2,83	0,14	0,46	4,84	5,07	4,28	1,88	3,62	0,14	5,07	2,45
R10	5,24	3,94	3,38	1,30	6,58	1,23	1,17	3,66	3,27	4,95	1,17	6,58	3,47
R11	2,28	2,31	0,94	0,57	6,05	4,13	5,68	8,61	4,89	7,58	0,57	8,61	4,30
R12	4,01	0,72	0,08	2,66	2,56	1,40	4,75	0,15	5,33	2,21	0,08	5,33	2,39
R13	0,37	1,66	6,93	0,37	6,60	7,70	2,71	3,72	3,21	1,26	0,37	7,70	3,45
											0,06	8,61	4,30

Para un mejor análisis, se compara el porcentaje de error de los diferentes parámetros evaluados. Con esto se sintetiza la Tabla 30.

Tabla 30 Resultados Individuales

Parámetros	%ERROR		
	Min.	Max.	Prom.
Corriente	0,08	9,09	3,41
Temperatura	2,55	13,47	9,42
Energía disipada	0,06	8,61	4,3

El porcentaje de error en las mediciones de corriente y energía disipada se mantuvo dentro de un margen inferior al 10 %, lo que valida en buena medida la precisión del sistema en estos parámetros. En contraste, la temperatura registrada presentó una mayor variabilidad respecto a los otros dos, debido principalmente a que el módulo no opera en un ambiente completamente controlado. Factores como la influencia de la temperatura ambiente, las corrientes de aire y el calentamiento de los propios dispositivos de conmutación afectan directamente las lecturas térmicas.

Por otro lado, el error observado en las mediciones de corriente también se atribuye principalmente al margen de tolerancia propio de los sensores empleados, así como a factores secundarios como el ruido eléctrico, la resistencia del cableado y las pérdidas por contacto, los cuales introducen pequeñas desviaciones en los valores registrados.

4.3.3 Comparación de Corriente y Energía disipada de los Grupos 1 y 2.

Por último, se analizan la corriente y energía disipada a nivel general registrados en los grupos 1 y 2, que cabe resaltar fueron pruebas con encendido simultaneo de varias resistencias a la vez.

El primer parámetro analizado es la corriente del sistema general, el cual fue calculado sumando las corrientes generales teóricas de la Tabla 23 se elabora la Tabla 31.

Tabla 31 Corriente General ideal o Teórica

Corriente Teórica General		
Voltajes	Grupos	
	Grupo 1 (1-7)	Grupo 2 (8-13)
12	1,746	1,517
13	1,901	1,644
14	2,037	1,770
15	2,192	1,896
16	2,338	2,023
17	2,483	2,149
18	2,629	2,276
19	2,774	2,402
20	2,920	2,529
21	3,065	2,655

Con ayuda de esta tabla se establece el error entre la medición general de corriente del sistema y el ideal o teórico, con esto se elabora la Tabla de error.

Tabla 32 %Error de la Corriente General de los Grupos 1 y 2

%Error		
Parámetros	Grupos	
	Grupo 1 (1-7)	Grupo 2 (8-13)
Voltajes		
12	2,47	0,91
13	2,08	0,28
14	0,84	0,40
15	1,89	0,08
16	0,65	2,52
17	0,79	0,22
18	2,10	1,55
19	0,77	1,20
20	0,66	1,09

21	1,16	0,68
Min.	0,65	0,08
Máx.	2,47	2,52
Prom.	1,34	0,89

Con esta tabla se conoce que entre ambas pruebas realizadas se estima un margen de error máximo del 2,52% en el peor de los casos manteniendo un error promedio mucho menor al 9,09% que se obtuvo en el análisis individual de las pruebas.

Ahora con uso de la Tabla 33, se conocen los valores teóricos o ideales a nivel general de la pérdida de energía del sistema.

Tabla 33 Energía Disipada Teórica o ideal general

Energía Disipada Teórica General		
Voltajes	Grupos	
	Grupo 1 (1-7)	Grupo 2 (8-13)
12	3812,4	3306,96
13	4525,56	3835,26
14	5133,24	4442,76
15	5780,7	5124,6
16	6727,68	5679,36
17	7588,8	6591,24
18	8598,96	7487,64
19	9394,74	8314,02
20	10540,8	9003,6
21	11649,96	9967,86

Con esta Tabla 33, se procede a estimar el error entre la pérdida de energía del sistema de los grupos 1 y 2 frente a las obtenidas en los registros del sensor, Con estos errores se elabora la Tabla 34.

Tabla 34 %Error de la Energía Disipada de los Grupos 1 y 2

%Error		
Parámetros	Grupos	
Voltajes	Grupo 1 (1-7)	Grupo 2 (8-13)
12	0,70	0,91
13	1,85	0,28
14	0,39	0,40
15	2,28	0,08
16	0,05	2,52
17	0,13	0,22
18	0,94	1,55
19	1,02	1,20
20	0,23	1,09
21	0,47	0,68
Min.	0,05	0,08
Máx.	2,28	2,52
Prom.	0,81	0,89

Con la Tabla 34, se conoce que el porcentaje de error de las pérdidas de energía entre lo real y lo calculado es menor al 1%, mucho menor al encontrado en el análisis individual del porcentaje de error de la corriente.

El porcentaje de error es mayor en el análisis individual debido a que al evaluar una sola resistencia, cualquier pequeña variación en la medición ya sea por el ruido eléctrico, la tolerancia de los sensores o las condiciones térmicas del entorno tiene un impacto más significativo en el cálculo total, generando un margen de error porcentual más elevado. En contraste, al activar múltiples resistencias de forma simultánea, los errores individuales tienden a compensarse entre sí, reduciendo el impacto de las desviaciones puntuales y produciendo resultados más estables. Además, en pruebas generales, los valores medidos tienden a ser mayores, por lo que los mismos errores absolutos representan una menor proporción del total, disminuyendo así el porcentaje de error relativo. Esta diferencia evidencia la ventaja de los análisis agrupados para obtener mediciones más representativas del comportamiento global del módulo resistivo.

CONCLUSIONES

El estudio realizado sobre las causas y consecuencias del efecto Joule permitió identificar de manera clara los principales parámetros asociados a este fenómeno, tales como la corriente eléctrica, la resistencia del material y la energía disipada en forma de calor. A través del análisis teórico y experimental, se logró no solo comprender la relación entre estos factores, sino también evidenciar la manifestación del efecto Joule en condiciones reales de operación del módulo.

El método empleado en este trabajo para controlar y monitorear el efecto Joule demostró ser funcional, ya que permitió modificar parámetros directamente relacionados con este fenómeno, en particular la resistencia efectiva del sistema. Al contar con la posibilidad de conmutar múltiples cargas resistivas en paralelo, se logró aumentar o disminuir las pérdidas por efecto Joule, manteniendo un margen de error promedio menor al 10% a nivel individual y menor al 1% a nivel general, esto en función de los requerimientos del usuario evidenciando mantener un control sobre el comportamiento térmico del módulo.

El algoritmo implementado permitió monitorear la temperatura individual de cada carga, partiendo desde la temperatura ambiente (23,5 °C) hasta un máximo de 60,97 °C alcanzado con una tensión de 21 V, sin exceder el límite operativo del sensor utilizado, que es de 100 °C. Para preservar la integridad de las resistencias y evitar un desgaste

premature por sobreexposición térmica, se optó por trabajar con voltajes intermedios y un número limitado de ciclos de prueba. Esta estrategia permitió evidenciar la funcionalidad general del módulo sin someterlo a condiciones extremas. Adicionalmente se diseñó para moderar la resistencia efectiva mediante un protocolo de seguridad capaz de desconectar cargas y activar el sistema de enfriamiento en caso de emergencia por sobrecalentamiento.

RECOMENDACIONES

Se recomienda considerar el uso del módulo desarrollado en futuras aplicaciones orientadas a la caracterización de paneles solares, mediante la simulación de diferentes condiciones de carga resistiva para identificar el punto de máxima potencia (MPP). Esta funcionalidad permitiría evaluar el desempeño real de sistemas fotovoltaicos y optimizar su eficiencia energética. Asimismo, se sugiere emplear el módulo como herramienta experimental para analizar el comportamiento térmico de distintos materiales disipadores de calor. Al controlar la energía disipada y registrar la temperatura generada, se facilitaría la comparación del rendimiento de diversas superficies o aleaciones, lo cual puede aportar significativamente al desarrollo de soluciones de enfriamiento más eficientes en dispositivos electrónicos.

Bibliografía

- [1] Travis, «Métodos y estándares de prueba de componentes electrónicos,» Venture Electronics, 2023.
- [2] E. Rúa Ramirez, I. Mendoza Jiménez, E. Torres Suarez, E. G. Flóres Serrano y J. C. Serrano Rico, «Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos,» Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2021.
- [3] M. Herrejón Escutia, S. A. Arreola Villa, G. Solorio Diaz y H. J. Vergara Hernández, «Simulación de la Evolución Termo-Estructural del Calentamiento de una Probeta Dilatómetrica por Efecto Joule,» 13° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos, Mexico City, 2017.
- [4] CENACE, «¿Quiénes somos?».
- [5] W. López Garzón y J. Cárdenas López, «MAREINGENII INGENIERIAS,» de *Tecnología internet of things (IoT) y el big data*, Bogotá Colombia, Fundación Universitaria San Mateo, 2019, pp. 73-79.
- [6] R. Quinteros Torres, *Electrónica física: principios físicos, materiales y dispositivos*, Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana, 1996.
- [7] J. A. Ibañes Mengual, R. P. Valerdi Pérez y J. A. García Gamuz, *Determination of heat capacities of metallic materials from the calorific balance in a friction process*, Europa, 2017.
- [8] P. A. Tipler Gene Mosca, *Física*, Barcelona, Bogotá, Buenos Aires, Méxo: EDITORIAL REVERTÉ, 2021.
- [9] Elecreonic Components, «La ley de Joule o ¿por qué se calienta el cable?,» *TEM*, 03 11 2023.
- [10] S. Gruber, L. Stepien, E. Lopez y F. Brueckener, *Physical and Geometrical Properties of Additively Manufactured Pure Copper Samples Using a Green Laser Source*, Academic Editors: Bailal Cokoe, 2021.
- [11] repsol, *Semiconductores: qué son, que materiales utilizan y para qué sirven*, 2023.
- [12] A. Conde Gallardo, *El largo camino de la Superconductividad a temperatura ambiente*, Mexico: Ciencias Exactas, 2021.
- [13] A. Muñoz Barrios, «Así funcionan las pérdidas de la red eléctrica,» *el periódico de la energía*, 12 9 2022.

- [14] nventHOFFMAN, Riesgos de sobrecalentamiento de tus componentes eléctricos, 2019.
- [15] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, Fundamentos de transferencia de calor, Pearson, 2019.
- [16] J. A. Navarro Márquez, ELECTROTECNIA, Murcia: Ediciones Ceysa, 2007.
- [17] Distron, «¿Cómo funciona un controlador de corriente?,» *Tecnología*, 05 07 2024.
- [18] J. Barrera, S. A. Ramíres León, J. A. Pérez Trujillo y E. Sánchez Angeles, «Mecanismos de transferencia de calor,» *TEPEXI*, pp. 38-42, 2021.
- [19] D. J. Punina Guerrero, E. Á. Jácome Domínguez, D. R. Zapata Hidalgo y F. U. Caicedo Benavides, Procesos de convección e intercambio de calor, Chimborazo: CIDE EDITORIAL, 2024.
- [20] OpenStax, «ransferencia de calor, calor específico y calorimetría.,» *Física universitaria*, vol. Volumen 2, 2021.
- [21] «Métodos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación Introducción,» de *Física 1207 del Douglas College*, Pressbooks, 2016.
- [22] E. Hernández, J. Cajamarca , C. Redrobán y J. Guilcapi, «Estudio de las pérdidas de energía en conductores eléctricos,» Riobamba , 2017.
- [23] Y. J. Cengel y A. J. Ghajar, Heat and Mass Transfer, New York: Fifth Edition, 2015.
- [24] E. P. Crucerira Fultan, «IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE,» *Trabajo de gardo presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la obtención del título de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico*, 2019.
- [25] IEC, Series Normalizadas de Resistencias Eléctricas, 2015.

ANEXOS

ANEXO A

Datasheet ACS712 Sensor de corriente de Efecto Hall

ACS712-5A

x05B PERFORMANCE CHARACTERISTICS¹ $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-5	-	5	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	180	185	190	mV/A
Noise	$V_{\text{NOISE(FP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	21	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta I_{OUT(Q)}$	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	-0.26	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.08	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	0.054	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.008	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
Total Output Error ²	E_{TOT}	$I_P = \pm 5\text{ A}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	± 1.5	-	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{J(\text{max})}$, is not exceeded.

²Percentage of I_P , with $I_P = 5\text{ A}$. Output filtered.

ACS712-20A

x20A PERFORMANCE CHARACTERISTICS¹ $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-20	-	20	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	96	100	104	mV/A
Noise	$V_{\text{NOISE(FP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, 100 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	11	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta I_{OUT(Q)}$	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	-0.34	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.07	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	0.017	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.004	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
Total Output Error ²	E_{TOT}	$I_P = \pm 20\text{ A}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	± 1.5	-	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{J(\text{max})}$, is not exceeded.

²Percentage of I_P , with $I_P = 20\text{ A}$. Output filtered.

ANEXO B

Datasheet DS18B20 Sensor de temperatura

DETAILED PIN DESCRIPTION Table 1

PIN 8PIN SOIC	PIN TO92	SYMBOL	DESCRIPTION
5	1	GND	Ground.
42		DQ	Data Input/Output pin. For 1-Wire operation: Open drain. (See “Parasite Power” section.)
33		V _{DD}	Optional V _{DD} pin. See “Parasite Power” section for details of connection. V _{DD} must be grounded for operation in parasite power mode.

DS18B20Z (8-pin SOIC): All pins not specified in this table are not to be connected.

RECOMMENDED DC OPERATING CONDITIONS

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Supply Voltage	V _{DD}	Local Power	3.0		5.5	V	1
Data Pin	DQ		-0.3		+5.5	V	1
Logic 1	V _{IH}		2.2		V _{CC} +0.3	V	1,2
Logic 0	V _{IL}		-0.3		+0.8	V	1,3,7

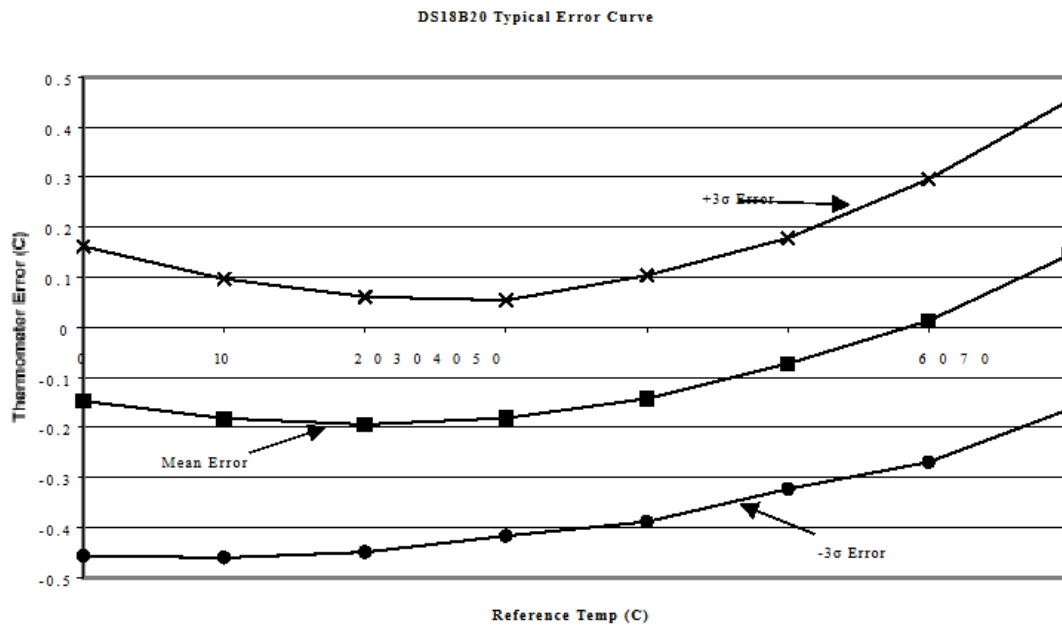
DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Thermometer Error	t _{ERR}	-10°C to +85°C			±½	°C	
		-55°C to +125°C			±2		
Input Logic High	V _{IH}	Local Power	2.2		5.5	V	1,2
		Parasite Power	3.0			V	1,2
Input Logic Low	V _{IL}		-0.3		+0.8	V	1,3,7
Sink Current	I _L	V _{IO} =0.4V	-4.0			mA	1
Standby Current	I _{DDs}			750	1000	nA	6,8
Active Current	I _{DD}			1	1.5	mA	4
DQ-Input Load Current	I _{DQ}			5 μA			5

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS: (-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

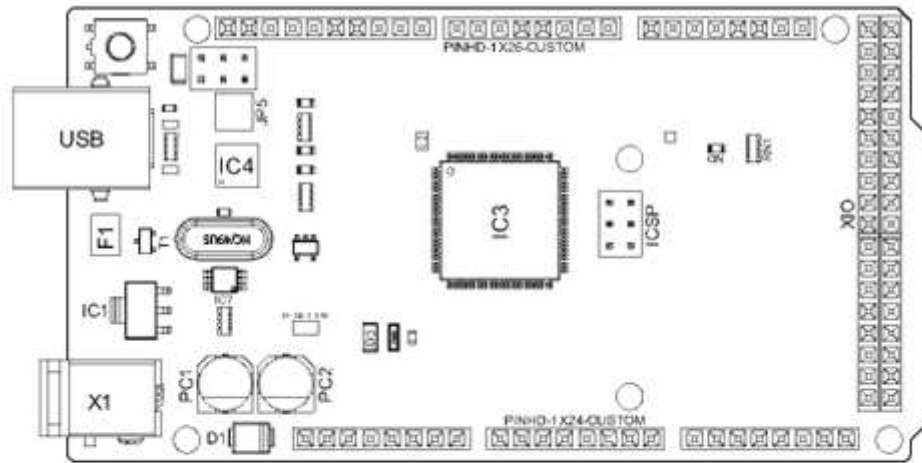
PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Temperature Conversion Time	t _{CONV}	9 bit			93.75	ms	
		10 bit			187.5		
		11 bit			375		
		12 bit			750		
Time Slot	t _{SLOT}		60		120	μs	
Recovery Time	t _{REC}		1 μs				
Write 0 Low Time	t _{LOW0}		60		120	μs	
Write 1 Low Time	t _{LOW1}		1 1 5			μs	
Read Data Valid	t _{RDV}				15	μs	
Reset Time High	t _{RSTH}		480			μs	
Reset Time Low	t _{RSTL}		480			μs	9
Presence Detect High	t _{PDHIGH}		15		60	μs	
Presence Detect Low	t _{PDLOW}		60		240	μs	
Capacitance	C _{IN/OUT}				25	pF	

TYPICAL PERFORMANCE CURVE



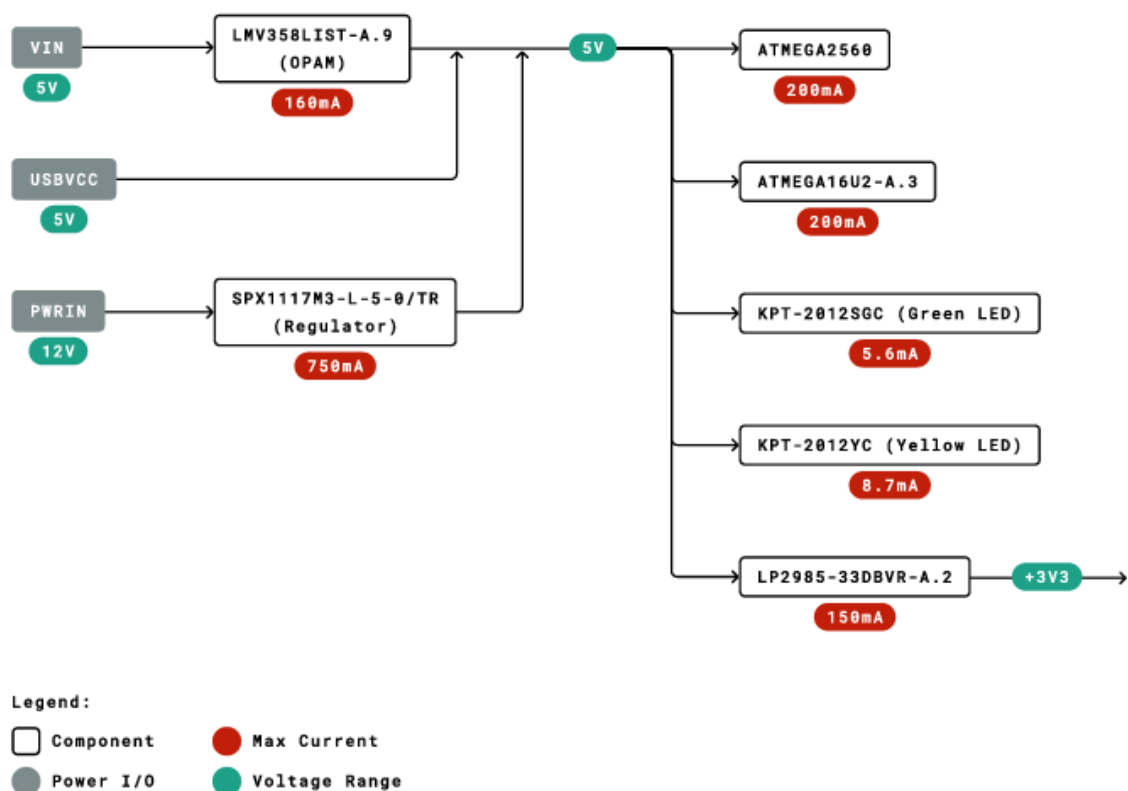
ANEXO C

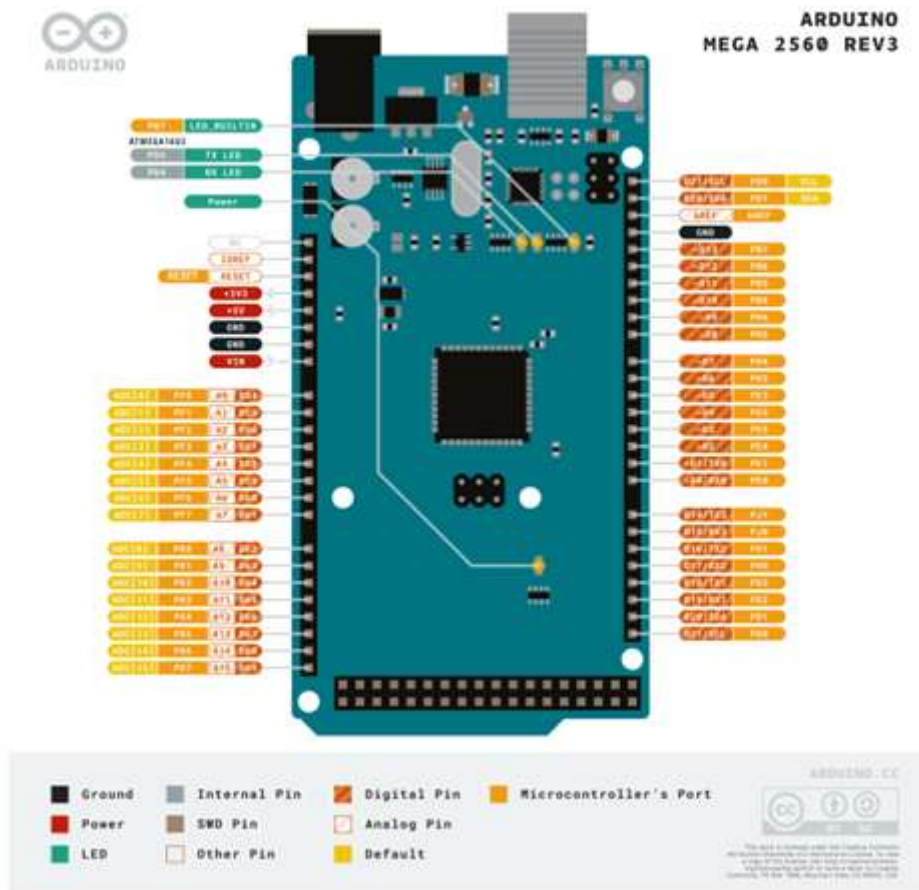
Arduino Mega2560 Datasheet



Arduino Mega 2560 Rev3 Top View

Ref.	Description	Ref.	Description
USB	USB B Connector	F1	Chip Capacitor
IC1	5V Linear Regulator	X1	Power Jack Connector
JP5	Plated Holes	IC4	ATmega16U2 chip
PC1	Electrolytic Aluminum Capacitor	PC2	Electrolytic Aluminum Capacitor
D1	General Purpose Rectifier	D3	General Purpose Diode
L2	Fixed Inductor	IC3	ATmega2560 chip
ICSP	Connector Header	ON	Green LED
RN1	Resistor Array	XIO	Connector





5.1 Analog

Pin	Function	Type	Description
1	NC	NC	Not Connected
2	IOREF	IOREF	Reference for digital logic V - connected to 5V
3	Reset	Reset	Reset
4	+3V3	Power	+3V3 Power Rail
5	+5V	Power	+5V Power Rail
6	GND	Power	Ground
7	GND	Power	Ground
8	VIN	Power	Voltage Input
9	A0	Analog	Analog input 0 /GPIO
10	A1	Analog	Analog input 1 /GPIO
11	A2	Analog	Analog input 2 /GPIO
12	A3	Analog	Analog input 3 /GPIO
13	A4	Analog	Analog input 4 /GPIO
14	A5	Analog	Analog input 5 /GPIO
15	A6	Analog	Analog input 6 /GPIO
16	A7	Analog	Analog input 7 /GPIO
17	A8	Analog	Analog input 8 /GPIO
18	A9	Analog	Analog input 9 /GPIO
19	A10	Analog	Analog input 10 /GPIO
20	A11	Analog	Analog input 11 /GPIO
21	A12	Analog	Analog input 12 /GPIO
22	A13	Analog	Analog input 13 /GPIO
23	A14	Analog	Analog input 14 /GPIO
24	A15	Analog	Analog input 15 /GPIO

5.2 Digital

Pin	Function	Type	Description
1	D21/SCL	Digital Input/I2C	Digital input 21/I2C Dataline
2	D20/SDA	Digital Input/I2C	Digital input 20/I2C Dataline
3	AREF	Digital	Analog Reference Voltage
4	GND	Power	Ground
5	D13	Digital/GPIO	Digital input 13/GPIO
6	D12	Digital/GPIO	Digital input 12/GPIO
7	D11	Digital/GPIO	Digital input 11/GPIO
8	D10	Digital/GPIO	Digital input 10/GPIO
9	D9	Digital/GPIO	Digital input 9/GPIO
10	D8	Digital/GPIO	Digital input 8/GPIO
11	D7	Digital/GPIO	Digital input 7/GPIO
12	D6	Digital/GPIO	Digital input 6/GPIO
13	D5	Digital/GPIO	Digital input 5/GPIO
14	D4	Digital/GPIO	Digital input 4/GPIO

Pin	Function	Type	Description
15	D3	Digital/GPIO	Digital input 3/GPIO
16	D2	Digital/GPIO	Digital input 2/GPIO
17	D1/TX0	Digital/GPIO	Digital input 1 /GPIO
18	D0/Tx1	Digital/GPIO	Digital input 0 /GPIO
19	D14	Digital/GPIO	Digital input 14 /GPIO
20	D15	Digital/GPIO	Digital input 15 /GPIO
21	D16	Digital/GPIO	Digital input 16 /GPIO
22	D17	Digital/GPIO	Digital input 17 /GPIO
23	D18	Digital/GPIO	Digital input 18 /GPIO
24	D19	Digital/GPIO	Digital input 19 /GPIO
25	D20	Digital/GPIO	Digital input 20 /GPIO
26	D21	Digital/GPIO	Digital input 21 /GPIO

ANEXO D

Código del Arduino

```
//UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE
//Trabajo de Grado
//Implementación de un modulo de carga resistiva con control y monitoreo
de efecto Joule
// Adrian Picuasi

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// --- Configuración de pines ---
const uint8_t releCargas[13] = {42, 43, 45, 44, 41, 47, 48, 46, 52, 50,
53, 49, 51};
const uint8_t botonCargas[13] = {28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,
38, 39, 40};
const uint8_t pinVentilador = 24;
const uint8_t pinCursorArriba = 27;
```

```

const uint8_t pinCursorAbajo = 26;
const uint8_t pinStop = 25;
const uint8_t pinCorrientes[13] = {A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8,
A9, A10, A11, A12};
const uint8_t pinCorrienteGeneral = A13;
const uint8_t pinTemperaturas = 23;

// --- LCD y sensores ---
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
OneWire oneWire(pinTemperaturas);
DallasTemperature sensoresTemp(&oneWire);
DeviceAddress direccionTemp[13];

// Mapeo de sensores de temperatura
const uint8_t mapaResistenciaSensor[13] = {3, 4, 8, 10, 2, 7, 6, 9, 5, 1,
0, 11, 11};

// --- Variables globales ---
float voltajeEntrada = 0.0;
uint8_t resistenciaSeleccionada = 0;
bool estadoPrevioCursorArriba = false;
bool estadoPrevioCursorAbajo = false;
bool estadoPrevioStop = true;
bool mostrarResumen = false;
float energiaInd[13] = {0};
float energiaTotal = 0;
bool modoConfiguracion = true;
unsigned long tiempoAnterior = 0;
unsigned long ultimaLecturaCursor = 0;
bool sobrecalentado = false;

// --- Repetición automática para navegación ---
unsigned long tiempoPresionadoArriba = 0;
unsigned long tiempoPresionadoAbajo = 0;
bool repitiendoArriba = false;
bool repitiendoAbajo = false;
unsigned long ultimoCambio = 0;
const unsigned long umbralRepeticion = 500;
const unsigned long intervaloRepeticion = 150;

void setup() {
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    Serial.begin(9600);

    for (int i = 0; i < 13; i++) {

```

```

    pinMode(releCargas[i], OUTPUT);
    pinMode(botonCargas[i], INPUT_PULLUP);
    digitalWrite(releCargas[i], HIGH);
}

pinMode(pinVentilador, OUTPUT);
digitalWrite(pinVentilador, HIGH);
pinMode(pinCursorArriba, INPUT_PULLUP);
pinMode(pinCursorAbajo, INPUT_PULLUP);
pinMode(pinStop, INPUT_PULLUP);

sensoresTemp.begin();
for (int i = 0; i < 13; i++) {
    if (!sensoresTemp.getAddress(direccionTemp[i], i)) {
        Serial.print("Sensor "); Serial.print(i); Serial.println(" no
encontrado");
    }
}

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Iniciando...");
delay(1000);
}

void loop() {
    unsigned long tiempoActual = millis();

    if (modoConfiguracion) {
        configurarVoltaje();
        return;
    }

    if (tiempoActual - tiempoAnterior >= 200) {
        tiempoAnterior = tiempoActual;

        sensoresTemp.requestTemperatures();
        float corrienteGeneral = (analogRead(pinCorrienteGeneral) * (5.0 /
1023.0) - 2.50) / 0.1;
        float temperaturaMaxima = 0;
        uint8_t resistenciasActivas = 0;
        energiaTotal = voltajeEntrada * corrienteGeneral;

        Serial.println("Lectura de sensores de corriente:");
        for (int i = 0; i < 13; i++) {
            bool activo = digitalRead(botonCargas[i]) == LOW;

```

```

    if (!sobrecalentado) digitalWrite(releCargas[i], activo ? LOW :
HIGH);

    float voltSensor = analogRead(pinCorrientes[i]) * 5.0 / 1023.0;
    float corriente = ((voltSensor - 2.5) / 0.185)*-1;
    if (corriente < 0) corriente = 0;

    Serial.print("Pin A");
    Serial.print(pinCorrientes[i] - A0);
    Serial.print(" Pin cARGAS");
    Serial.print(i);
    Serial.print(" -> ");
    Serial.print(voltSensor);
    Serial.print(" -> ");
    Serial.print(corriente);
    Serial.println(" A");

    float temp =
sensoresTemp.getTempC(direccionTemp[mapaResistenciaSensor[i]]);
    if (temp > temperaturaMaxima) temperaturaMaxima = temp;

    float potencia = corriente * corriente * 47.0;
    energiaInd[i] += potencia * 0.2;

    if (activo) resistenciasActivas++;
}

if (temperaturaMaxima >= 100.0) {
    sobrecalentado = true;
} else if (temperaturaMaxima < 95.0) {
    sobrecalentado = false;
}

digitalWrite(pinVentilador, sobrecalentado ? LOW : HIGH);

bool cursorArriba = !digitalRead(pinCursorArriba);
bool cursorAbajo = !digitalRead(pinCursorAbajo);
bool stop = !digitalRead(pinStop);

if (cursorArriba) {
    if (!estadoPrevioCursorArriba) {
        tiempoPresionadoArriba = tiempoActual;
        repitiendoArriba = false;
    } else if (!repitiendoArriba && tiempoActual -
tiempoPresionadoArriba >= umbralRepeticion) {
        repitiendoArriba = true;

```

```

        ultimoCambio = tiempoActual;
    }

    if ((repitiendoArriba && tiempoActual - ultimoCambio >=
intervaloRepeticion) ||
        (!repitiendoArriba && !estadoPrevioCursorArriba)) {
        resistenciaSeleccionada = (resistenciaSeleccionada + 1) % 13;
        ultimaLecturaCursor = tiempoActual;
        ultimoCambio = tiempoActual;
    }
}

if (cursorAbajo) {
    if (!estadoPrevioCursorAbajo) {
        tiempoPresionadoAbajo = tiempoActual;
        repitiendoAbajo = false;
    } else if (!repitiendoAbajo && tiempoActual - tiempoPresionadoAbajo
>= umbralRepeticion) {
        repitiendoAbajo = true;
        ultimoCambio = tiempoActual;
    }
}

    if ((repitiendoAbajo && tiempoActual - ultimoCambio >=
intervaloRepeticion) ||
        (!repitiendoAbajo && !estadoPrevioCursorAbajo)) {
        resistenciaSeleccionada = (resistenciaSeleccionada + 12) % 13;
        ultimaLecturaCursor = tiempoActual;
        ultimoCambio = tiempoActual;
    }
}

if (!cursorArriba) repitiendoArriba = false;
if (!cursorAbajo) repitiendoAbajo = false;

if (stop && !estadoPrevioStop) mostrarResumen = true;

estadoPrevioCursorArriba = cursorArriba;
estadoPrevioCursorAbajo = cursorAbajo;
estadoPrevioStop = stop;
float lecturaADC =
analogRead(pinCorrientes[resistenciaSeleccionada]);
float voltSensorSel = lecturaADC * 5.0 / 1023.0;
float corrienteSel =
((analogRead(pinCorrientes[resistenciaSeleccionada]) * 5.0 / 1023.0 -
2.5) / 0.185)*-1;
    if (corrienteSel < 0) corrienteSel = 0;

```

```

    float tempSel =
sensoresTemp.getTempC(direccionTemp[mapaResistenciaSensor[resistenciaSele
ccionada]]);
    float rv = (corrienteSel > 0) ? voltajeEntrada / corrienteSel : 0;

    Serial.println("-----[ Resistencia Seleccionada ]-----");
    Serial.print("Resistencia #: ");
    Serial.println(resistenciaSeleccionada + 1);
    Serial.print("Pin Analógico: A");
    Serial.println(pinCorrientes[resistenciaSeleccionada] - A0);
    Serial.print("Lectura ADC: ");
    Serial.println(lecturaADC);
    Serial.print("Voltaje Sensor: ");
    Serial.print(voltSensorSel, 3);
    Serial.println(" V");

    lcd.clear();
    if (mostrarResumen) {
        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Resumen Final");
        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("N:");
        lcd.print(resistenciasActivas); lcd.print(" IG:");
        lcd.print(corrienteGeneral, 1);
        lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("E: "); lcd.print(energiaTotal, 2);
        lcd.print("J");
        lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("V: "); lcd.print(voltajeEntrada,
1); lcd.print("V");
        delay(3000);
        mostrarResumen = false;
    } else if (sobrecalentado) {
        for (int i = 0; i < 13; i++) digitalWrite(releCargas[i], HIGH);
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("PELIGRO! Reinicio...");
    } else {
        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("N:");
        lcd.print(resistenciasActivas); lcd.print(" IG:");
        lcd.print(corrienteGeneral, 1); lcd.print(" E:"); lcd.print(energiaTotal,
2);
        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("R");
        lcd.print(resistenciaSeleccionada + 1); lcd.print(" I:");
        lcd.print(corrienteSel, 2); lcd.print(" E:");
        lcd.print(energiaInd[resistenciaSeleccionada], 1);
        lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("RV:"); lcd.print(rv, 1);
        lcd.print(" V: "); lcd.print(voltajeEntrada, 1);
        lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Tmp:"); lcd.print(tempSel, 1);
        lcd.print("C OK");
    }
}

```

```

    }
}

```

// Las funciones configurarVoltaje() y actualizarVoltajeLCD() permanecen sin cambios

```

void configurarVoltaje() {
    static bool stopPresionado = false;
    static unsigned long tiempoConfirmacion = 0;
    static bool anteriorArriba = false;
    static bool anteriorAbajo = false;
    static unsigned long tiempoPresionadoArriba = 0;
    static unsigned long tiempoPresionadoAbajo = 0;
    static bool repitiendoArriba = false;
    static bool repitiendoAbajo = false;
    static unsigned long ultimoCambio = 0;

    const unsigned long umbralRepeticion = 700;
    const unsigned long intervaloRepeticion = 200;

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Voltaje de entrada?");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("V: "); lcd.print(voltajeEntrada, 1); lcd.print("V   ");

    bool confirmar = false;

    while (modoConfiguracion) {
        bool arriba = !digitalRead(pinCursorArriba);
        bool abajo = !digitalRead(pinCursorAbajo);
        bool stop = !digitalRead(pinStop);
        unsigned long ahora = millis();

        if (arriba) {
            if (!anteriorArriba) {
                tiempoPresionadoArriba = ahora;
                repitiendoArriba = false;
            } else if (!repitiendoArriba && ahora - tiempoPresionadoArriba >=
umbralRepeticion) {
                repitiendoArriba = true;
                ultimoCambio = ahora;
            }

            if ((repitiendoArriba && ahora - ultimoCambio >=
intervaloRepeticion) || (!repitiendoArriba && !anteriorArriba)) {

```

```

        float incremento = (ahora - tiempoPresionadoArriba >= 3000) ? 1.0
: 0.05;
        voltajeEntrada += incremento;
        if (voltajeEntrada > 40.0) voltajeEntrada = 40.0;
        actualizarVoltajeLCD();
        ultimoCambio = ahora;
    }
}

if (abajo) {
    if (!anteriorAbajo) {
        tiempoPresionadoAbajo = ahora;
        repitiendoAbajo = false;
    } else if (!repitiendoAbajo && ahora - tiempoPresionadoAbajo >=
umbralRepeticion) {
        repitiendoAbajo = true;
        ultimoCambio = ahora;
    }

    if ((repitiendoAbajo && ahora - ultimoCambio >=
intervaloRepeticion) || (!repitiendoAbajo && !anteriorAbajo)) {
        float decremento = (ahora - tiempoPresionadoAbajo >= 3000) ? 1.0
: 0.05;
        voltajeEntrada -= decremento;
        if (voltajeEntrada < 0) voltajeEntrada = 0;
        actualizarVoltajeLCD();
        ultimoCambio = ahora;
    }
}

if (stop && !estadoPrevioStop) {
    if (!stopPresionado) {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Confirmar V: ");
        lcd.print(voltajeEntrada, 1);
        lcd.print("V?");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Presione STOP");
        stopPresionado = true;
        tiempoConfirmacion = ahora;
    } else if (ahora - tiempoConfirmacion > 300) {
        confirmar = true;
    }
} else if (stopPresionado && (arriba || abajo)) {
    stopPresionado = false;
}

```

```
        actualizarVoltajeLCD();
    }

    anteriorArriba = arriba;
    anteriorAbajo = abajo;
    estadoPrevioStop = stop;

    if (confirmar) {
        modoConfiguracion = false;
        stopPresionado = false;
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Voltaje listo");
        delay(800);
        break;
    }
}

}

void actualizarVoltajeLCD() {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Voltaje de entrada?");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("V: ");
    lcd.print(voltajeEntrada, 1);
    lcd.print("V");
}
```

ANEXO E

Manual de Usuario

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

Módulo de carga de resistiva con control y monitoreo de perdidas por efecto Joule.

Manual de Uso y Mantenimiento

AUTOR (A):

Ibarra, 2024

Contenido

1. Introducción.....	131
2. Objetivos	131
3. Descripción General del Módulo	131
4. Componentes del Sistema	132
5. Instalación del Módulo.....	132
5.1. Instalación física	132
5.2. Instalación de software	133
6. Operación Paso a Paso	133
7. Mantenimiento y Cuidados	138
Cuidados.....	138
Mantenimiento.....	138
8. Resolución de Problemas	140
9. Seguridad	142
10. Glosario	143

1. Introducción

Este módulo permite el análisis, simulación y cálculo de resistencias eléctricas en un circuito, facilitando el aprendizaje práctico de leyes como Ohm y Joule, permite realizar un análisis de este efecto que se da en este banco de resistencias al medir las pérdidas de energía y con ello comparar los valores obtenidos frente a los valores teóricos.

2. Objetivos

- Comprender el funcionamiento de resistencias eléctricas y aplicar leyes básicas de circuitos.
- Comparar valores de pérdidas de energía por efecto Joule tanto medidos como calculados.
- Medir e interpretar valores de voltaje, corriente, resistencia y temperatura.

3. Descripción General del Módulo

El módulo de cargas resistivas está realizado sobre una estructura de acrílico la cual permite ordenar y conectar de manera adecuada todos los componentes de dicho módulo, de modo que facilite la visualización de las mediciones y consecuentemente realizar un correcto análisis del mismo.

Este módulo consiste en un conjunto de 13 resistencias del mismo valor con la capacidad de conmutar con ayuda de módulos de relé que permiten variar la cantidad de resistencias conectadas en paralelo. En cada resistencia se ubica un sensor de corriente y un sensor de temperatura, los cuales envían la información para visualizarse en una pantalla LCD.

El funcionamiento de este módulo está controlado por un Arduino Mega el cual recibe señales de los sensores y así mismo es el encargado de activar los relés de conmutación una vez que se da instrucciones por parte del usuario.

Adicionalmente como sistema de enfriamiento se tiene un ventilador el cual se activa en caso de superar el valor máximo de temperatura predeterminado o en caso de volver a condiciones iniciales para realizar una nueva iteración.

4. Componentes del Sistema

Incluye:

- Estructura de acrílico de dimensiones: 43cm x 30cm x 37cm.
- 13 resistencias cerámicas de 47ohms.
- 13 módulos relé de 5V.
- 13 sensores de temperatura: DS18B20.
- 13 sensores de corriente: ACS712-5A.
- 1 sensor principal de corriente: ACS712-20A.
- 1 Arduino Mega 2560.
- 1 ventilador de PC de 12V.
- 1 fuente de voltaje DC de 12V/5A.
- 1 fuente de voltaje DC de 5V/2A.
- 2 fuentes de voltaje DC de 5V/1A.
- 1 pantalla LCD de 4 líneas.
- Cables utp para las conexiones.
- Pulsadores, interruptores y borneras.

5. Instalación del Módulo

5.1. Instalación física

Instrucciones paso a paso para conectar el módulo:

- Para energizar el módulo es necesario conectar el enchufe a una toma de 110V de la red común.

- Se conecta la fuente externa DC de 6-30.6V para realizar las pruebas, se debe tener en cuenta que se conecta en a parte posterior en la entrada a lado del Fusible, se puede usar cables con punta tipo banana o lagartos.



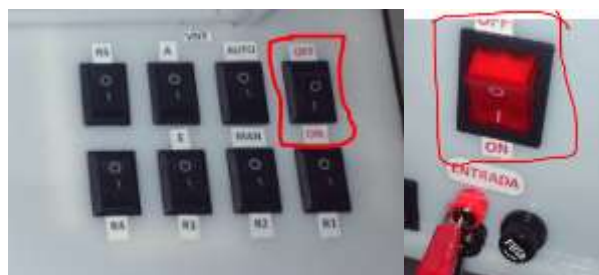
5.2. Instalación de software

A continuación, se detalla el programa y configuraciones iniciales.

6. Operación Paso a Paso

Ejemplo de uso:

1. Se verifica que esté conectado el módulo a la red eléctrica y también conectada la fuente DC externa para la prueba y se presiona el botón de inicio ubicado en la parte derecha superior y el botón de entrada ubicada en la parte posterior del módulo.



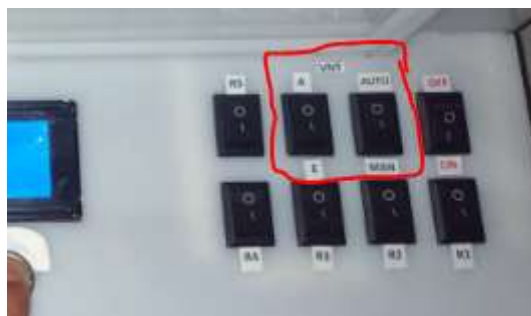
2. Medir el voltaje de la fuente externa y con ese valor se setea el voltaje de inicio mediante el uso del cursor y la pantalla LCD. Con el botón derecho se aumenta el valor del voltaje y el izquierdo se disminuye este valor. Para seleccionar el valor, se presiona el botón central denominado como STOP.



3. Se confirma el valor de voltaje de inicio con el pulsador STOP y con ello queda listo para dar inicio.



4. El modo automático del ventilador sirve para que el mismo se active en caso de que la temperatura sobrepase los 100°C. Con los botones ubicados cerca del interruptor de inicio, se configura el modo manual o automático, en modo manual se debe presionar el botón izquierdo para encender el ventilador principal.



5. Con ayuda de los interruptores etiquetados desde R1 a R13 se activan cada de una de las resistencias a emplearse. Estas solo se activarán una vez seteado el voltaje.



6. El banco de resistencias empieza a energizarse y se deja conectado durante el tiempo requerido por el usuario para realizar la prueba.



7. Una vez terminado el tiempo se presiona el pulsador de stop y con ello se muestran los valores medidos de corriente y temperatura de cada resistencia conectada.



8. Para revisar más datos obtenidos como energía disipada, corriente, etc., de una determinada resistencia se hace uso de los Pulsadores y con ello navegar y encontrar el valor que se requiera.



9. Para seguir obteniendo datos se vuelve a pulsar stop y con ellos se muestran las mediciones de ese instante y así sucesivamente hasta que el usuario lo requiera.



10. Para finalizar se pulsa stop y se desactiva la fuente externa y se presiona el botón de inicio.



11. En caso de realizar una nueva iteración se debe activar el modo manual del ventilador para enfriar las resistencias hasta la temperatura inicial y luego volver a empezar. En este proceso se debe mantener encendido el modulo sin setear el voltaje principal.
12. Para apagar el módulo se debe desactivar las cargas una a una, luego desconectar la fuente externa de voltaje DC y por último el botón de OFF del módulo.

7. Mantenimiento y Cuidados

Cuidados

- No exponer el módulo a humedad.
- Al momento de activar las cargas, se debe activar de una en una con cuidado.
- Verificar conexiones antes de energizar.
- Guardar en lugar seco y limpio.
- No exceder el voltaje recomendado, ni conectar un voltaje menor al indicado.
- Al tratarse de una estructura delicada, no se debe golpear o mover bruscamente la estructura.
- No desconectar ningún componente una vez que esté en funcionamiento.
- Una vez activa la fuente de voltaje externa, mantener cuidado de las borneras de entrada de banana, ya que estarán energizadas y si se hace un contacto en ambos puntos puede suceder un accidente.

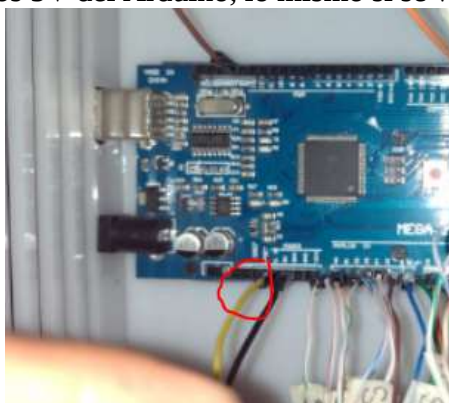
Mantenimiento

Para realizar un mantenimiento adecuado del módulo, se deben realizar los siguientes pasos:

- Asegurarse que no este conectada a ninguna fuente de voltaje.
- Mantener cuidado y distancia de los chips individuales de los sensores de corriente, o usar una manilla antiestática.



- Si se desea cargar el código o cargar uno nuevo, se debe desconectar el cable amarillo conectado a los 5V del Arduino, lo mismo si se va a usar el puerto serial.



- Verificar conexiones y continuidad de los siguientes pines.

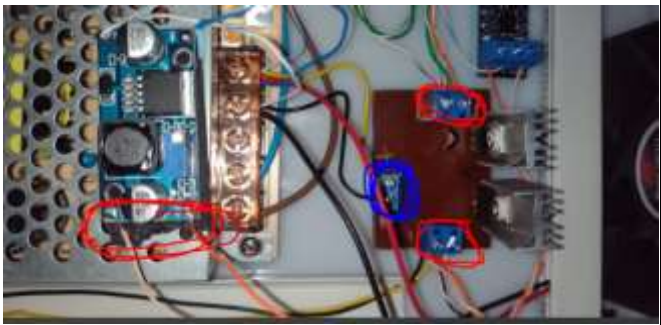
Función	Cantidad	Componente	Tipo de pin sugerido	Pines asignados
Activación de cargas resistivas	13	Relés de 12 V	Salidas digitales	41 al 53
Activación de ventilador	1	Relé de 12 V	Salida digital	24
Pulsadores de activación de cargas	13	Pulsadores individuales	Entradas digitales con INPUT_PULLUP	28 al 40
Pulsadores de navegación (↑ / ↓)	2	Cursores para selección en pantalla	Entradas digitales con INPUT_PULLUP	26 y 27
Pulsador de almacenamiento o ("Stop")	1	Botón de pausa de medición	Entrada digital con INPUT_PULLUP	25

Sensores de corriente individuales	13	ACS712-5A	Entradas analógicas	A0 al A12
Sensor de corriente general	1	ACS712-20A	Entrada analógica	A13
Sensores de temperatura	13	DS18B20 (1-Wire, bus compartido)	Entrada digital compartida	23

- Al momento de manejar el cableado se debe tener cuidado debido a la fragilidad del mismo, en caso de no existir continuidad, se recomienda recablear todos los cables correspondientes a esa canaleta.
- Si existe continuidad en los pines 28 al 40, pero no se activa la carga, revisar el PCB, al tratarse de un circuito PULL-UP, es fácil replicar el circuito o verificar continuidad. Revisar las pequeñas marcas de positivo y negativo marcadas para reconectar.
- En el caso de necesitar reemplazar una carga resistiva del módulo, ya sea por cualquier motivo, se debe tener precaución al desconectar el sensor de temperatura, y desconectar la carga resistiva en las bornera en las que se encuentre ubicada.
- Algunos cables pueden no corresponder a su etiqueta y en caso de no tener se recomienda volver a etiquetar siguiendo la misma lógica de conexión.

8. Resolución de Problemas

Problema	Causa posible	Solución recomendada
No enciende el módulo	Cable dañado, sin energía	Revisar conexiones
No enciende pantalla	Arduino desconectado o daño del LCD	Revisar conexiones y estado de pantalla

Problema	Causa posible	Solución recomendada
Dificultad al sacar componentes del módulo.	Atoramiento o adhesivo muy fuerte.	La mayoría de componentes se pueden desprender del módulo, pero se debe de tener cuidado debido a que están adheridos a una base de acrílico.
Parpadeo de pantalla.	Daño del LCD, Fallo de conexión o falta de voltaje	Revisas estado del cableado y verificar conexión. Si el problema persiste, requiere cambio de LCD. También se debe revisar las fuentes de voltaje todas las de la imagen deben tener valores muy cercanos a 5V en las salidas marcadas de rojo y en la bornera marcada de azul debe haber voltajes muy cercanos a 12V. 
Medidas irreales	Fallo de conexión de los sensores	Verificar continuidad y funcionamiento. En caso de necesitar un reemplazo, conectar desconectar los Jack y conectar con la misma lógica y misma polaridad.
Valores mayores a 0.3A sin cargas conectadas	Fallo de lectura del sensor o demasiada interferencia y ruido.	Reiniciar el módulo y esperar unos 5 minutos con el voltaje seteado y confirmado hasta que bajen a valores de 0 A en un lapso de 3 minutos, si persiste el problema verificar que no exista un mal estado de cables. Si, a pesar de los cambios sugeridos el problema persiste, realizar un cambio de cableado en los sensores de corriente.

Problema	Causa posible	Solución recomendada
Valores de Temperatura de -125°C	Fallo del sensor DS18B20	Verificar las borneras donde se conectan todos y reempalmar, si el problema persiste conseguir un replazo.

9. Seguridad

- Nunca manipular el módulo conectado a una fuente inestable.
- Supervisión docente en prácticas educativas.
- Utilizar solo componentes en buen estado.
- Por precaución no se debe tocar las borneras de medición de corriente mientras el módulo está en funcionamiento.
- Mantener cerrada la tapa del módulo mientras está funcionando.
- Apagar y desconectar el modulo si se planifica una revisión del circuito.
- En caso de cargar un nuevo código, desconectar la fuente de alimentación del Arduino, cable amarillo 5V.
- En caso de realizar la medición de corriente de las resistencias a través de las borneras, desconectar el sensor de corriente mediante el interruptor ubicado cerca de las borneras de medición de corriente ubicadas en la parte superior del módulo, y desactivar la carga con los interruptores correspondiente de la parte inferior.



10. Glosario

Ohm (Ω): Unidad de resistencia eléctrica.

Voltaje: Diferencia de potencial eléctrico.

Amperio (A): Unidad de corriente eléctrica.

Serie/Paralelo: Configuraciones comunes de resistencias.

Recursos y presupuesto

Tabla 35 Resumen de recursos y presupuesto por rubro

Nº	RUBROS	GASTOS (\$)	PORCENTAJE
1	ACS712-5A	58,5	5%
2	ACS712-20A	5,8	5%
3	DS18B20	45,5	6%
4	SWITCH	12,8	4%
5	Fuente 12V 5A	5,75	3%
6	Fuente 5V 1A	3,5	3%
7	Fuente 5V 2A	6	3%
8	Resistencia 20W	9,75	7%
9	Puertos ban	6,5	4%
10	Base Acrílico	84	15%
11	Portafusibles	1,75	1%
12	Fusible 10A	0,1	1%
13	Ventilador 12V	8,75	0,5%

14	Ventilador 12V	5,25	0,5%
15	Arduino Mega	26	10%
16	Cableado	15,5	2%
17	Construcción PBC	22,15	3%
18	M. relés 5V	42,25	5%
19	Pasajes	20	2%
20	Uso de software	30	10%
21	Imprevistos	30,00	10%
TOTAL		439,85	100%

Tipo de financiamiento: Propio

PicuasAdrian_TRABAJO DE GRADO

[Firma manuscrita]

3%
Textos
sospechosos

- 3% Similitudes
 - < 1% similitudes entre comillas
 - 0% entre las fuentes mencionadas
- 9% Idiomas no reconocidos (Ignorado)
- 11% Textos potencialmente generados por la IA (Ignorado)

Nombre del documento: PicuasAdrian_TRABAJO DE GRADO.docx
ID del documento: 52d49313637d704c04e19015912e6d23fe6c8dc1
Tamaño del documento original: 4,91 MB

Depositante: Alexandra Maldonado
Fecha de depósito: 10/7/2025
Tipo de carga: Interface
fecha de fin de análisis: 10/7/2025

Número de palabras: 25.442
Número de caracteres: 161.687

Ubicación de las similitudes en el documento:

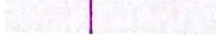


Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 repositorio.utn.edu.ec Implementación de un sistema de generación solar foto... http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10103/6/04 MEL 076 TRABAJO GRADO.pdf... 20 fuentes similares	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (222 palabras)
2	 es.wikipedia.org Efecto Joule - Wikipedia, la enciclopedia libre https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Joule 4 fuentes similares	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (189 palabras)
3	 repositorio.utn.edu.ec Sistema de monitoreo en tiempo real de variables de fu... http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/9545/6/04 MEC 272 TRABAJO GRADO.pdf... 15 fuentes similares	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (132 palabras)
4	 es.wikipedia.org Conductor eléctrico - Wikipedia, la enciclopedia libre https://es.wikipedia.org/wiki/conductor_eléctrico 1 fuente similar	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (108 palabras)
5	 TRABAJO DE GRADO ALEXANDRA HIDROBO Reviewed (3).docx TRABA... #05b7ef Viene de de mi biblioteca 15 fuentes similares	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (122 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 repositorio.utn.edu.ec https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10103/2/04 MEL 076 TRABAJO GRADO.pdf	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)
2	 www.studysmarter.es Calentamiento por efecto Joule: Física, Termodinámica ... https://www.studysmarter.es/resumenes/fisica/electricidad/calentamiento-por-efecto-joule/	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (31 palabras)
3	 www.electricity-magnetism.org Ley de Joule Definición, cálculo y aplicación. ... https://www.electricity-magnetism.org/es/ley-de-joule-definicion-calculo-y-aplicacion/	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (24 palabras)
4	 Documento de otro usuario #42Lb80 Viene de de otro grupo	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)
5	 www.sc.ehu.es Experimento de Joule. Equivalente mecánico del calor http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/calor/joule/joule.html	< 1%		 Palabras idénticas: < 1% (14 palabras)