



Caracterización de la Ganancia del SiPM MPPC S13360-6025CS

Mariana Suarez Sanabria

Harvey Evelio González López

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia

2022

Caracterización de la Ganancia del SiPM MPPC S13360-6025CS

Mariana Suarez Sanabria

Harvey Evelio González López

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director (a):

Ing. Luis Fernando Castañeda Melo, PhD

Línea de Investigación:

Ciencias naturales exactas y aplicadas

Grupo de Investigación:

LabDet Villavicencio

Centro de investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (CICBA)

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____ ,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____ .

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Contenido

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS	5
OBJETIVO GENERAL.....	5
<i>Objetivos específicos</i>	5
1. MARCO TEÓRICO.....	6
1.1 FOTOMULTIPLICADOR DE SILICIO	6
1.1.1 <i>Ganancia</i>	8
1.2 CELDA DE PELTIER	9
1.3 DISIPADORES	10
1.4 LM335.....	11
1.5 CONTROLADOR HTC 1500	13
1.6 CONVERTIDOR DIGITAL – ANÁLOGO (DAC) MCP4725.....	14
1.7 ARDUINO MEGA 2560.....	16
1.8 PLATAFORMAS DE DESARROLLO.....	17
1.8.1 <i>Matlab</i>	17
1.8.2 <i>Arduino IDE</i>	18
1.9 COMUNICACIÓN.....	18
1.9.1 <i>Comunicación I2C</i>	18
1.9.2 <i>Comunicación serial</i>	20
1.10 TARJETA NI.....	20
1.11 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	21
2. MARCO METODOLÓGICO	23
2.1 CORROBORAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DENTRO DE LOS RANGOS DE TEMPERATURA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA GANANCIA.....	23
2.1.1 <i>Reconfiguración e implementación del HTC 1500</i>	23
2.1.2 <i>Configuración celdas de peltier</i>	28
2.1.3 <i>Diseño y acondicionamiento de la planta de control</i>	30
2.2 ACONDICIONAR A LA PLANTA DE CARACTERIZACIÓN UNA FUENTE DE LUZ Y LOS SiPMs.....	32
2.2.1 <i>Acondicionamiento de la fuente de luz</i>	32
2.2.2 <i>Acondicionamiento de los SiPMs</i>	34
3. RESULTADOS	41
3.1 DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE LA CAJA DE CONTROL	41
3.2 INTERFAZ GRÁFICA, DATOS E HISTOGRAMAS	45

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
5. ANEXOS.....	48
5.1 CÓDIGO MATLAB COMUNICACIÓN SERIAL	48
5.2 CÓDIGO INTERFAZ GRÁFICA.....	49
5.3 CÓDIGO ARDUINO COMUNICACIÓN SERIAL	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

Lista de Figuras

FIGURA 1.	ESTRUCTURA ENCAPSULADA SIPM.....	6
FIGURA 2.	ESTRUCTURA INTERNA SIPM	7
FIGURA 3.	ESTRUCTURA INTERNA CELDA DE PELTIER.....	9
FIGURA 4.	CELDA DE PELTIER	10
FIGURA 5.	DISIPADOR VENTILADOR	11
FIGURA 6.	ESTRUCTURA INTERNA LM335	12
FIGURA 7.	LM 335	12
FIGURA 8.	CONEXIONES PARA EL CONTROLADOR DE TEMPERATURA.....	13
FIGURA 9.	CONTROLADOR HTC 1500.....	14
FIGURA 10.	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MÓDULO MCP4725	15
FIGURA 11.	MÓDULO MCP 4725	15
FIGURA 12.	ARDUINO MEGA 2560	16
FIGURA 13.	LOGO MATLAB	17
FIGURA 14.	LOGO ARDUINO IDE	18
FIGURA 15.	COMUNICACIÓN I2C.....	19
FIGURA 16.	COMUNICACIÓN SERIAL ENTRE MATLAB Y ARDUINO.....	20
FIGURA 17.	TARJETA NI USB-6215	21
FIGURA 18.	FUENTE DE ALIMENTACIÓN	22
FIGURA 19.	CONFIGURACIÓN UNIPOLAR O BIPOLAR	24
FIGURA 20.	DIAGRAMA DE BLOQUES CORRESPONDIENTE A LA PCB	25
FIGURA 21.	CIRCUITO DISEÑADO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA	26
FIGURA 22.	DISEÑO DE PCB PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA.....	26
FIGURA 23.	CIRCUITO IMPRESO	27
FIGURA 24.	DIAGRAMA LÓGICO DE COMUNICACIÓN	28
FIGURA 25.	VISTA FRONTAL UBICACIÓN DE LAS CELDAS.....	29
FIGURA 26.	VISTA LATERAL DE LA UBICACIÓN DE LAS CELDAS	29
FIGURA 27.	DISEÑO PARA LAS CONEXIONES DE LA CAJA.....	30
FIGURA 28.	DISEÑO 3D DE LA CAJA	31
FIGURA 29.	ESPECTRO DEL LED	33
FIGURA 30.	ÁNGULO DE VISTA.....	33
FIGURA 31.	PLACA DE ALUMINIO DISEÑADA.....	34

FIGURA 32.	PESTAÑA DE ADAPTACIÓN	35
FIGURA 33.	PLACA DE ALUMINIO CON LAS ADECUACIONES.....	36
FIGURA 34.	CIRCUITO DISEÑADO PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE LOS SIPM	36
FIGURA 35.	PULSO ÓPTICO PARA BAJA INTENSIDAD DE LUZ.....	37
FIGURA 36.	PULSO OPTICO PARA ALTA INTENSIDAD DE LUZ.....	37
FIGURA 37.	PULSOS ENVIADOS	38
FIGURA 38.	DATOS RESPUESTA SIPM	39
FIGURA 39.	HISTOGRAMAS	39
FIGURA 40.	DATOS RESPUESTA SIPM	40
FIGURA 41.	HISTOGRAMA.....	40
FIGURA 42.	PCB PARA CONTROL DE TEMPERATURA	41
FIGURA 43.	MODELO FINAL DE LA CAJA CON ACONDICIONAMIENTO PARA EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	42
FIGURA 44.	CABLE DE CONEXIÓN INTERNO.....	43
FIGURA 45.	CABLE DE CONEXIÓN EXTERNO	43
FIGURA 46.	VISTA INTERNA DE LA CAJA DE CONTROL	44
FIGURA 47.	CONEXIÓN CON LA PLANTA DE CARACTERIZACIÓN Y LA PLANTA DE CONTROL.....	45
FIGURA 48.	INTERFAZ GRÁFICA E HISTOGRAMAS	46

Lista de tablas

TABLA 1. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DEL MPPC S13360-6025CS.....	8
---	----------

A mis padres Oscar y Marina, gracias por todo el amor, paciencia, trabajo y apoyo incondicional que siempre me han brindado, me siento orgullosa y privilegiada de tenerlos y que puedan disfrutar de este logro. A mi prima Angélica, gracias por siempre estar para mí desde el primer momento apoyándome y brindándome tanto amor, gracias porque junto con Edilson me dieron el privilegio de tener a Sofía y Valentina que siempre alegran mis días con sus ocurrencias, gracias a Yeiver por el apoyo y amor que me ha brindado.

-Mariana

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida, A mi madre por ser la persona que me ha acompañado durante mi trayectoria estudiantil y de mi vida, A mi padre por ser mi pilar y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opinión, a Karina Montoya por su paciencia y amor que me ha brindado durante estos años.

-Harvey

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por permitirnos lograr cada uno de nuestros objetivos y metas, también agradecemos a nuestros padres por brindarnos siempre el apoyo incondicional y por ser nuestra principal fuente de motivación.

Agradecerle al Ing. Luis Fernando Castañeda Melo por todo su apoyo en este proyecto donde compartió su conocimiento, sabiduría y años de experiencia. También a nuestros compañeros Camilo Acosta y Julián Hernández por su compañerismo, apoyo y estar ahí para escuchar en esos momentos difíciles. Al señor Oscar Suarez por su colaboración y apoyo para realizar actividades donde no contábamos con las herramientas ni la experiencia necesaria.

Por último, agradecer a la universidad y a los compañeros que han aportado a la línea de investigación del LabDet donde se desarrollaron trabajos como “diseño e implementación de un control de temperatura para una planta de caracterización de fotomultiplicadores de silicio” y “sistema de control automático de temperatura para una plataforma de caracterización de SiPM en el LabDet Villavicencio” que fueron fundamentales para el desarrollo del nuestro.

Resumen

Los fotomultiplicadores de silicio (SiPM) son unos dispositivos ampliamente utilizados y tienen aplicación directa en varios campos científicos. Por ejemplo, en la detección de fluorescencia con propósitos biomédicos como en la medicina nuclear, expresión génica (clave para la creación de fenotipos), estudio de ciclos bioquímicos (ejemplo ciclo del carbón). [1], [2]

En el presente trabajo los SiPM son usados como detectores de fotones; la detección se ve afectada por las variaciones de temperatura, por lo tanto, en la Universidad Antonio Nariño se creó una línea de investigación enfocada en determinar los cambios de las características en los detectores; para esto se diseñó una caja adicional a la planta de caracterización que está compuesta por una fuente de alimentación, una tarjeta para el control de temperatura, un sistema de refrigeración, una tarjeta Arduino Mega 2560 y 8 puertos de salida que son usados para conexión con unas celdas de peltier y los sensores, cuya función es controlar la temperatura de las celdas de Peltier garantizando un comportamiento estable.

Palabras clave: Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM), temperatura, ganancia, DAC, interfaz.

Abstract

The Silicon photomultipliers (SiPM) are widely used devices and have direct application in various scientific fields. For example, in the detection of fluorescence for biomedical purposes such as nuclear medicine, gene expression (key to phenotyping), study of biochemical cycles (e.g. carbon cycle). [1], [2]

In the present work, the SiPMs are used as photon detectors; the detection can be affected by the temperature variation; therefore, in the Antonio Nariño University a research line was created focused on determining the changes of the characteristics in the detectors, For this, we designed an additional box to the characterization plant that is composed by the power supply, the board for temperature control, cooling system, an Arduino Mega 2560 board and 8 output ports for connecting the cells and sensors, whose its function is to control the temperature of the peltier cells, ensuring a stable behaviour.

Key words: Silicon photomultipliers (SiPM), temperature, gain, DAC, interface.

Introducción

La UAN sede Villavicencio cuenta con el laboratorio de Detectores (LabDet) como parte del Centro de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (CICBA), donde se trabaja con fotodetectores. En la línea de investigación en física de partículas la UAN participa en colaboraciones y proyectos internacionales tales como: RD51-CERN, NEXT Experiment, DUNE, entre otros; los SiPM son utilizados en los proyectos DUNE y NEXT Experiment para su desarrollo y construcción, una participación relevante de la UAN ha sido el aporte al proyecto RD51 del CERN con el desarrollo y aplicaciones de MPGD en los grupos de trabajo 2 (FÍSICA Y RENDIMIENTO DEL DETECTOR) Y 5 (ELECTRÓNICA PARA MPGD).

Los fotomultiplicadores de silicio o Silicon Photomultiplier por sus siglas en inglés (SiPM) son detectores de estado sólido que reaccionan ante fotones [3], [4]. Para realizar procesos de fotodetección efectivos, se requiere conocer en detalle las características del fotodetector utilizado entre los cuales están: la ganancia, la tensión de ruptura, el after pulse, el cross-talk, dark noise y la tensión de Bias [1].

El rendimiento de los SiPMs ha mejorado significativamente en la última década, incluyendo su ganancia y la capacidad de una excelente resolución de un solo fotón. Sin embargo, los SiPM disponibles comercialmente no cumplen con todos los requisitos. La colaboración del experimento del Observatorio de xenón enriquecido de próxima generación (nEXO) ha impulsado el desarrollo dedicado de SiPM sensibles a VUV durante muchos años [5].

El grupo de fotodetectores nEXO ha estudiado el efecto de los SiPMs en campos eléctricos externos de hasta 30 kV/cm a una temperatura de 149°K, no se encuentran cambios observables en los parámetros básicos de operación (ganancia, PDE y ruido correlacionado), asegurando su uso en experimentos como nEXO [5]. Teniendo en cuenta lo anterior se ha determinado que la ganancia del fotomultiplicador tiene cambios constantes respecto a las variaciones de temperatura, donde se requiere un valor de corrección mayor cuando se encuentra en altas temperaturas a cuando se expone a bajas temperaturas [6], [7].

La UAN sede Villavicencio ejecutó un proyecto de grado referente a una planta de caracterización de SiPM con controlador analógico de temperatura [2]. Los resultados obtenidos del proyecto arrojaron que la estructura de la planta presentó limitaciones con el tiempo de estabilización, pues una sola celda de peltier no es suficiente para adquirir el máximo desempeño, por lo tanto se realizaron ajustes agregando otra celda de peltier mejorando así el proceso de control de temperatura [1].

Se planteó mejorar el uso de los controladores HTC1500, diseñando un circuito impreso o printed circuit board por sus siglas en inglés (PCB) y agregando un convertidor digital – análogo o digital to analog converter en inglés (DAC), con el fin de determinar un setpoint adecuado al HTC1500. El DAC se conectó por medio del protocolo de comunicación I2C al Arduino Mega 2560 y de forma paralela se comunicó con Matlab por medio de comunicación serial usando una interfaz de usuario, la cual se encargó de enviar la temperatura deseada a las celdas de peltier.

El presente trabajo reporta los resultados obtenidos al utilizar la planta y el control automático de temperatura previamente diseñado en el LabDet [1], con el fin de garantizar que la unidad de control y la planta de caracterización entregaran una respuesta eficiente se dispuso de una caja de paso usada en instalaciones eléctricas, que se adaptó para contener la unidad de control, facilitando la portabilidad y minimizando el riesgo de exposición de los dispositivos para prevenir el impacto del medio donde se encuentra.

A lo largo de este libro se tratará el procedimiento llevado a cabo para la caracterización de la ganancia del SiPM MPPC S13360-6025CS, de tal forma que en el primer capítulo se darán a conocer los conceptos básicos de cada uno de los componentes usados. En el segundo capítulo se presenta la metodología que se desarrolló por etapas, en cada una de ellas se explica de forma detallada el procedimiento, en el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos y finalmente en el cuarto capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar la ganancia del Fotomultiplicador de silicio MPPC S13360-6025CS.

Objetivos específicos

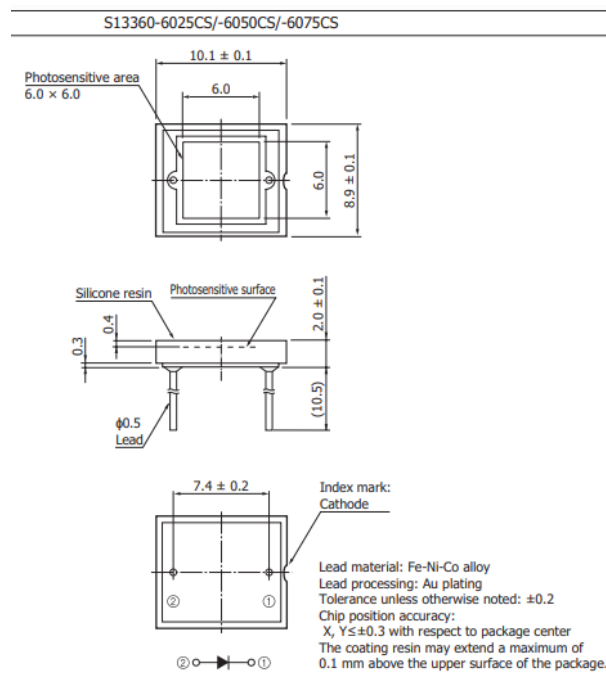
- Documentar el proceso estándar de caracterización de la ganancia del SiPM para diferentes temperaturas.
- Corroborar el funcionamiento de la planta dentro de los rangos de temperatura para la caracterización de la ganancia.
- Acondicionar a la planta de caracterización una fuente de luz y los SiPMs.
- Adquirir datos y construir histogramas para diferentes temperaturas.

1. Marco teórico

1.1 Fotomultiplicador de Silicio

Los fotodetectores con baja luminosidad, son usados en diversos campos de aplicación, como la astronomía, imágenes médicas, física de partículas y la detección de rangos de luz [2], [4], [8]. De acuerdo con algunos artículos de caracterización[4],[8], el detector de fotones ideal debe proveer una respuesta que sea proporcional a un flujo de fotones, el cual debe garantizar una ganancia interna y amplia sensibilidad espectral, facilitando el procesamiento y análisis de los datos entregados [8].

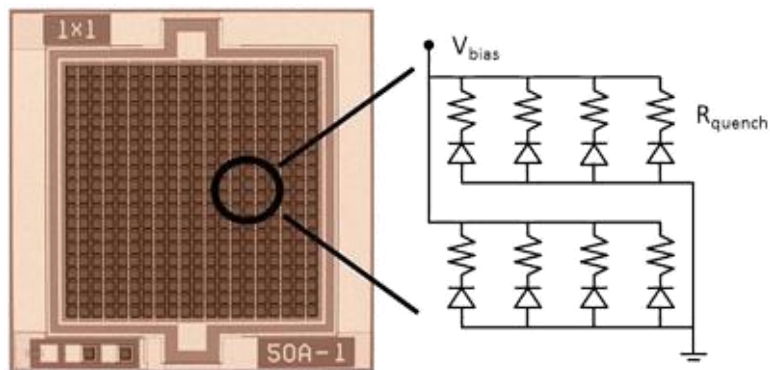
Figura 1. Estructura encapsulada SiPM



Fuente: Hoja de datos del fabricante [9]

Los Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM), son dispositivos semiconductores que poseen dos terminales, ánodo y cátodo [8], están constituidos por una matriz de alta densidad de fotodiodos de avalancha operados en modo Geiger conocidos por sus siglas en inglés como SPAD (single – photon avalanche photodiode), poseen alta ganancia interna que permite la detección de un solo fotón [10]. El SiPM presenta características tales como un bajo conteo de oscuridad, alta eficiencia en la detección de fotones, excelente tiempo de resolución, baja operación en el voltaje de bias, robustez, resistencia al exceso de luz e inmunidad a los campos magnéticos.[10]

Figura 2. Estructura interna SiPM



Fuente: Base de datos de la investigación [11]

El fotomultiplicador MPPC (Multi Pixel Photon Counter) está conformado por un fotodetector de estado sólido de cientos o miles de SPAD de fotón único integrado, llamados microceldas, todas estas son independientes y están conectadas a un ánodo común, la longitud de borde de una celda cuadrada está comprendida entre 10 y 100 μm para alcanzar áreas relativamente más sensibles [12], permitiendo que sea eficiente y que cada fotón que pase sea detectado, siendo esta la característica más relevante del SiPM.

El fotomultiplicador MPPC S13360-6025CS, pertenece a la serie S13360 usados para la medición de precisión, posee característica de after-pulse, crosstalk y dark count más bajas en comparación con otras series, a continuación, se presenta una tabla con características específicas del SiPM [13],[9]

Tabla 1. Algunas características específicas del MPPC S13360-6025CS

Característica	MPPC
Tamaño de pixel (μm)	25
Área fotosensible efectiva (mm)	6x6
Número de pixeles	57600
Empaquetado	Cerámico
Factor de llenado	47%
Material de la ventana	Resina de Silicio
Índice refractivo del material	1.14
Temperatura de funcionamiento ($^{\circ}\text{C}$)	-20 a 60
Temperatura de almacenamiento ($^{\circ}\text{C}$)	-20 a 80

Fuente: Hoja de datos del fabricante [9]

1.1.1 Ganancia

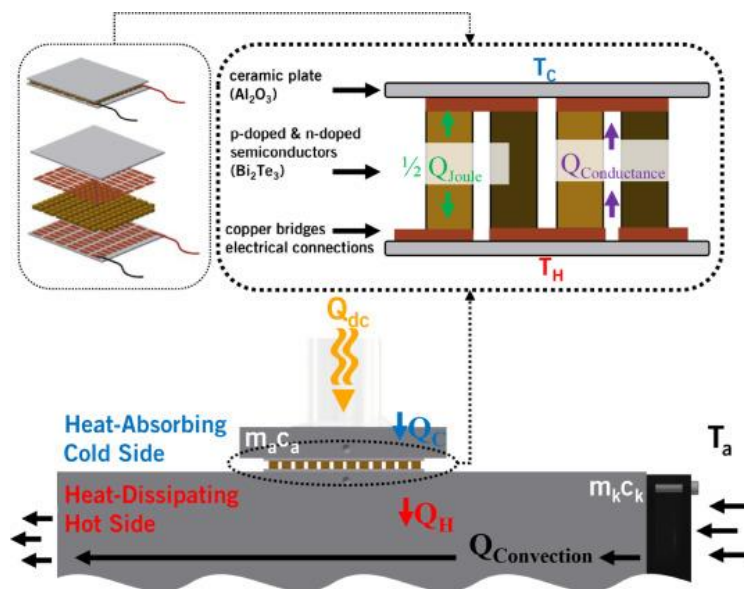
La ganancia del fotomultiplicador está definida por la carga producida por un SPAD, esta inicia en el efecto fotoeléctrico o por avalanchas creadas por un portador térmico, que multiplica los electrones que inician la carga del SiPM por avalancha. Teniendo en cuenta lo anterior, matemáticamente la ganancia está relacionada con la diferencia entre el voltaje de bias (V_{bias}) que corresponde al voltaje de polarización del diodo y el voltaje de ruptura (V_{br}) que es el voltaje máximo que puede soportar un diodo cuando se polariza de forma inversa. [2],[12] donde K es un factor de proporcionalidad entre la ganancia y la diferencia de tensión, dando como resultado la ecuación 1:

$$G = K * (V_{bias} - V_{br}) \quad \text{Ecuación 1.}$$

1.2 Celda de peltier

La celda de peltier es un dispositivo compacto termoeléctrico que puede generar calor o frío, debido al efecto peltier el cual indica que al cambiar la corriente de polarización aplicada a la celda puede actuar como enfriador termoeléctrico o como calentador, esto se logra a partir de los termopares semiconductores de tipo N y tipo P que componen a la celda [14], [15], los cuales están acoplados de forma intercalada en la mitad de dos placas cerámicas cuadradas.

Figura 3. Estructura interna celda de peltier



Fuente: Base de datos de la investigación [15]

Adicionalmente una celda de peltier cuenta con dos caras que son directamente inversas, es decir, si se nombran las caras como A y B, mientras que la cara A está generando calor la cara B se estará enfriando, si se realiza el cambio de polarización

ahora la cara A se comenzará a enfriar y la cara B comenzará a calentar; para ayudar al proceso de disipación de frío o calor generado por la celda, se debe contar un dispositivo que permita disipar la energía termoeléctrica presente en la celda.

Actualmente las celdas que se comercializan están compuestas por los elementos semiconductores telurio de bismuto y seleniuro de antimonio. [2]

Figura 4. Celda de peltier



Fuente: Imagen propia

1.3 Disipadores

Los disipadores son instrumentos que permiten realizar intercambio térmico de componentes eléctricos que tienden a calentarse, ayudando a que la temperatura se regule sin afectar la integridad del dispositivo, basándose en la ley cero de la termodinámica, la cual establece que una superficie que posee un calor excedente al entrar en contacto con un elemento con características de mejor disipación de energía, este se encargará de intercambiar la energía hasta producir un equilibrio térmico, permitiendo que el dispositivo siga funcionando de forma correcta. [2], [16]

Figura 5. Disipador ventilador

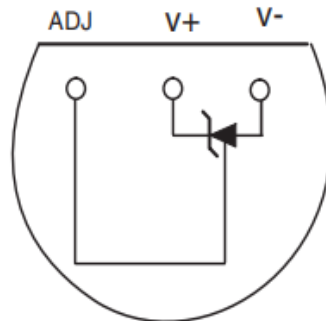


Fuente: Imagen propia

1.4 LM335

Es un sensor de temperatura de precisión, que opera como un Zener de dos terminales, de acuerdo con las especificaciones del fabricante puede presentarse en dos tipos de encapsulado, que puede ser el empaquetado plástico (TO-92), el cual tiene 3 pines (ADJ, V+, V-) y será el empleado, o el plástico microempaquetado (SO-8) que contiene 8 pines. [17]

Figura 6. Estructura interna LM335



Fuente: Hoja de datos del fabricante [17]

El rango de detección de temperatura de este sensor está comprendido entre los -40°C a 100°C , tiene una salida lineal, se puede calibrar fácilmente y tiene una baja impedancia (menos de 1Ω), opera desde los $450\ \mu\text{A}$ hasta $5\ \text{mA}$ y el voltaje de alimentación suministrado debe estar entre los 5V y los 30V . [17]

Figura 7. LM 335

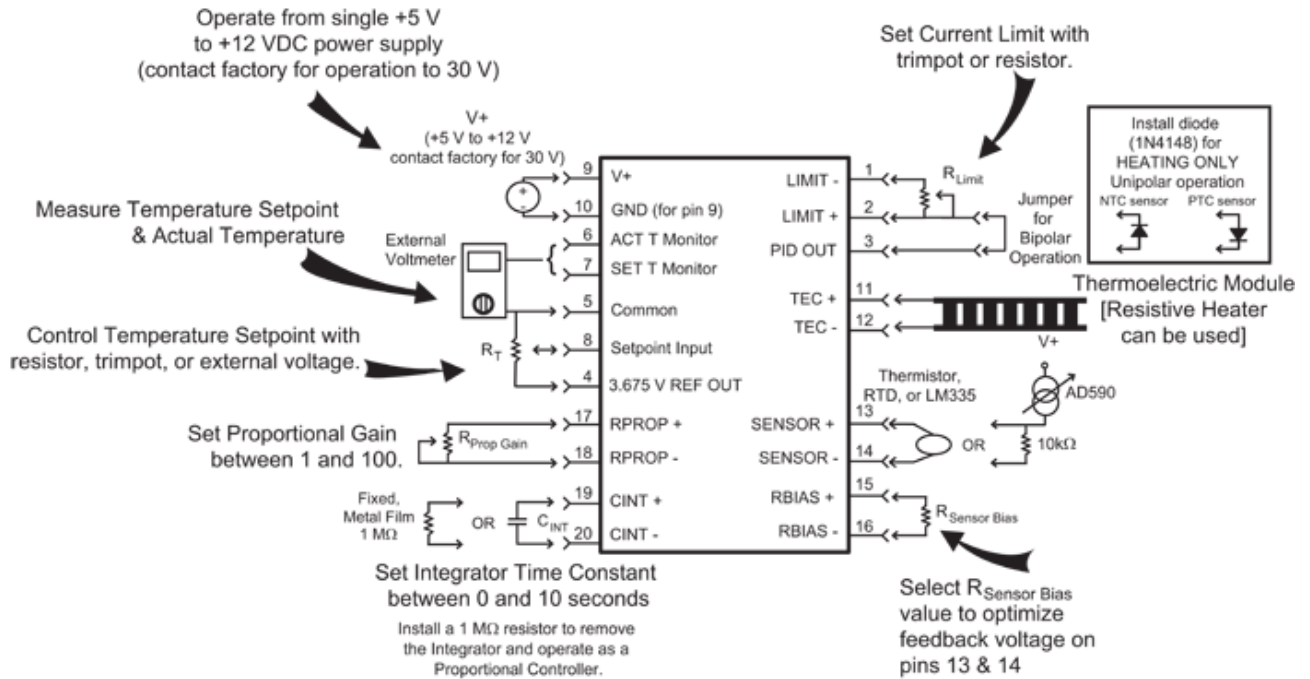


Fuente: Imagen propia

1.5 Controlador HTC 1500

Es un controlador lineal de temperatura de la serie HTC, el cual tiene una corriente de salida para el control de temperatura de 1.5 A, opera con un voltaje de alimentación comprendido desde los 5V a los 12V. Está compuesto de 20 pines y teniendo en cuenta la hoja de datos proporcionada por el fabricante se debe llevar a cabo la conexión; este controlador ofrece corriente unidireccional o bidireccional (figura 8), para el caso de las celdas de Peltier requiere de operación bipolar porque permite el flujo de la corriente en ambas direcciones. [18]

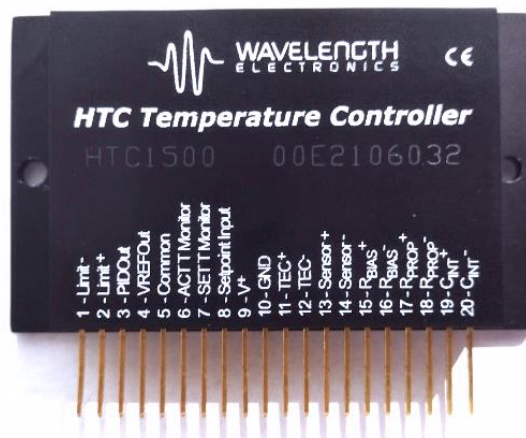
Figura 8. Conexiones para el controlador de temperatura



Fuente: Hoja de datos del fabricante [18]

El controlador permite varias configuraciones en su implementación ya que se puede pasar del uso de un potenciómetro para el setpoint a un ajuste digital por medio de un DAC para ejecutar un control más preciso de la temperatura que se desea obtener. [18]

Figura 9. Controlador HTC 1500

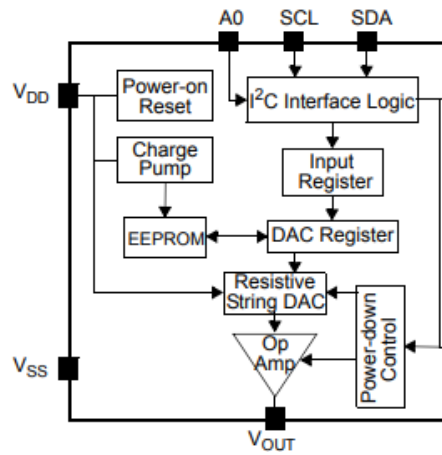


Fuente: Imagen propia

1.6 Convertidor Digital – Análogo (DAC) MCP4725

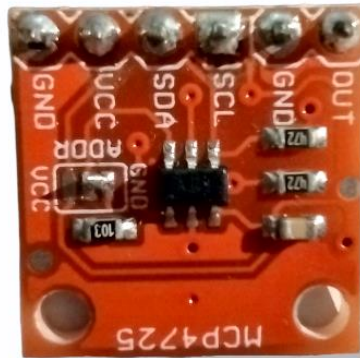
El módulo es un conversor digital – análogo (DAC) que permite controlar el integrado MCP4725 mediante el protocolo de comunicación de interfaz serial I2C, el voltaje de alimentación es de 2.7V a 5V el cual puede ser suministrado desde el Arduino, posee una memoria EEPROM que le permite seguir almacenando los datos sin seguir conectado al voltaje de alimentación, El pin SDA del módulo es el que permite escribir o leer los datos de la comunicación I2C, mientras que el pin SCL es la entrada del reloj para la comunicación I2C. Para el funcionamiento correcto del DAC se requiere de una resistencia en pull-up desde la línea de alimentación. [19]

Figura 10. Diagrama de bloques del módulo MCP4725



Fuente: Hoja de datos del fabricante [19]

Figura 11. Módulo MCP 4725



Fuente: Imagen propia

1.7 Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 está basado en ATmega 2560, posee 54 pines de entrada / salida digital , 15 son de PWM, 16 de entradas analógicas, conexión USB, memoria EEPROM de 4KB, su voltaje de operación es de 5V, se puede alimentar mediante la conexión USB o con una fuente de alimentación externa.[20]

Figura 12. Arduino Mega 2560



Fuente: Imagen propia

El tipo de memoria que se usa para las placas Arduino es la siguiente [21]:

- Núcleo de A8 bits, que permite la operación en 4 bytes de procesamiento único desde la frecuencia de la CPU.
- Velocidad del procesador de CPU de 16 MHz.
- 8 Kbytes SRAM y Memoria flash 256 Kbytes
- Chip MAX3421E USB Host Controller.

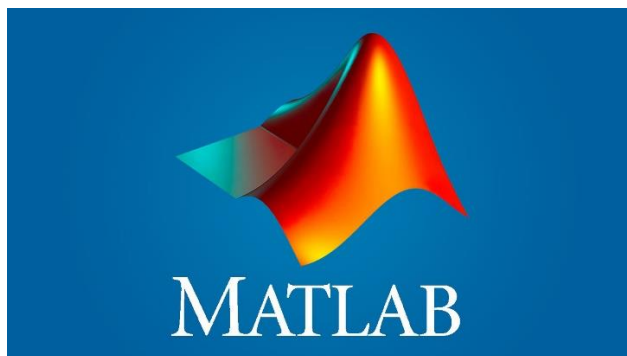
1.8 Plataformas de desarrollo

1.8.1 Matlab

Es una plataforma de programación y cálculo numérico, que permite analizar datos de forma que se puedan adquirir y explorar, puede ser usado para sistemas de control, machine learning (entrenamiento de modelos) y Deep learning (preparación de datos), procesamiento de señales, robótica y comunicaciones inalámbricas. [22]

Con Matlab también se pueden crear interfaces gráficas las cuales mediante iconos o imágenes le permiten al usuario interactuar fácilmente y mejorar procesos, por ejemplo, si se requieren ingresar determinados valores la forma más eficiente es una interfaz que permita agregarlos y modificarlos sin recurrir a la línea de código logrando optimización en el proceso evitando en ocasiones comandos que pueden llegar a ser complejos y confusos.

Figura 13. Logo Matlab



Fuente: Base de datos de la investigación [22]

1.8.2 Arduino IDE

El software Arduino IDE (Integrated Development Environment) permite desarrollar y guardar el código realizado para la programación de las placas Arduino, la cual una vez conectada al computador será detectada automáticamente por el software indicando el tipo de tarjeta y el puerto COM con el cual está trabajando. El IDE de Arduino posee diferentes elementos que permiten verificar que no se presente ningún error, subir los códigos haciendo que se cargue la memoria del microcontrolador y visualización del monitor serial donde se podrá ver la información que se está transmitiendo por el puerto serie. [23]

Figura 14. Logo Arduino IDE



Fuente: Base de datos de la investigación [23]

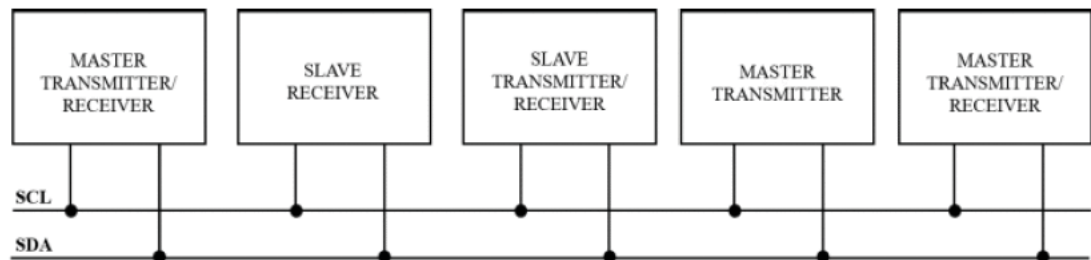
1.9 Comunicación

1.9.1 Comunicación I2C

El protocolo de comunicación I2C, define la trama de datos y comunicaciones físicas para transferir bits entre dos dispositivos digitales, los puertos incluyen dos cables de comunicación SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock), el protocolo permite conectar hasta 127 dispositivos esclavos. [24]

Ya que el protocolo permite la conexión a múltiples dispositivos, los mensajes que se envían a través del puerto I2C, además del byte de información incluyen una dirección de registro del sensor, para que esta sea recibida por el dispositivo correcto.[25]

Figura 15. Comunicación I2C



Fuente: Base de datos de la investigación [24]

En el esquema de comunicación del protocolo I2C, se diferencian dos elementos básicos: [24], [25]

- El maestro se encarga de controlar el SCL y también de iniciar y detener la comunicación, mientras que la información se envía a través del SDA; una de las condiciones que posee el protocolo I2C, es que dos maestros no pueden hacer uso del mismo puerto y funcionaría de dos formas: como maestro transmisor o maestro receptor.
- El esclavo lo conforman los dispositivos conectados que usualmente son sensores (en este caso DAC), los cuales suministran información al maestro. Las condiciones para los esclavos indican que, pueden actuar como esclavos transmisores o esclavos receptores, un esclavo no puede generar señal SCL.

1.9.2 Comunicación serial

La comunicación del puerto serie es el protocolo más común para comunicarse entre dos o más dispositivos, en este caso la comunicación será entre el software Matlab y la placa Arduino, para la aplicación del puerto serie en Matlab, se debe crear un objeto de puerto serie con la función `serialport` la cual requiere especificar a que puerto COM se encuentra conectado y la velocidad de transmisión en baudios. [26]

Figura 16. Comunicación serial entre Matlab y Arduino

```
clc %limpia la pantalla del comand window
global T1 T2 T3 T4
warning off %eliminar las posibles alertas

COM='COM6'; % Cambiar al com de su arduino
delete(instrfind({'Port'},{COM})); %borrar cualquier uso del puerto COM que esté previamente activo
arduinoSerial=serial(COM); %crear el objeto puerto serial COM
```

Fuente: Imagen propia

1.10 Tarjeta NI

La tarjeta NI de referencia USB-6215 es un dispositivo de adquisición de datos (DAQ), ofrece entradas y salidas analógicas o digitales y dos contadores de 32 bits, cuenta con tecnología que permite la transferencia de datos en dos direcciones a alta velocidad. El dispositivo es ideal para aplicaciones de prueba, control y diseño, entre ellas, registro de datos portátil. El USB-6215 tiene una cubierta mecánica ligera y es energizado por bus para fácil portabilidad. [27]

Figura 17. Tarjeta NI USB-6215



Fuente: Imagen propia

1.11 Fuente de alimentación

Una fuente de alimentación es un dispositivo electrónico que se adapta a la tensión de la red, regulando y filtrando la electricidad que recibe permitiendo que los dispositivos conectados a ella operen de manera correcta, puesto que nivela la energía de acuerdo al consumo que requieren los equipos y realiza la conversión de corriente alterna a varias formas de corriente directa. [28]

Actualmente las fuentes de poder son conmutadas y de voltaje dual, lo que permite dos modos de funcionamiento: mientras el equipo opera y en modo stand by. Para el presente trabajo se empleará una fuente conmutada de 460 W, modelo SPI4601UG que entrega múltiples salidas de alimentación, de acuerdo con la hoja de datos del fabricante la fuente tiene un tiempo de retardo de encendido aproximadamente entre los 100 ms y 500ms y un retardo de apagado mínimo de 1 ms. [29]

El modelo SPI4601UG tiene una dimensión de 220x110x40,5 mm, es de alta eficiencia y confiabilidad, incluye un ventilador interno de 12V DC, posee protección de salida contra sobre voltaje, cortocircuito y protección de corrientes; los voltajes de salida suministrados por la fuente son de 3.3V y 5V los cuales tienen una corriente mínima de 0.5 A y una corriente máxima de 20 A, los tres voltajes de 12V cada uno la corriente mínima es de 1 A y la corriente máxima de 16 A. [29]

Figura 18. Fuente de alimentación



Fuente: Imagen propia

2. Marco Metodológico

2.1 Corroborar el funcionamiento de la planta dentro de los rangos de temperatura para la caracterización de la ganancia.

Con base en la planta de caracterización desarrollada previamente por la línea de investigación del LabDet [1], se realizó un diagnóstico de prueba con el fin de conocer el estado de funcionamiento e integridad de la planta de caracterización, dando como resultado que presentaba varias fallas tales como:

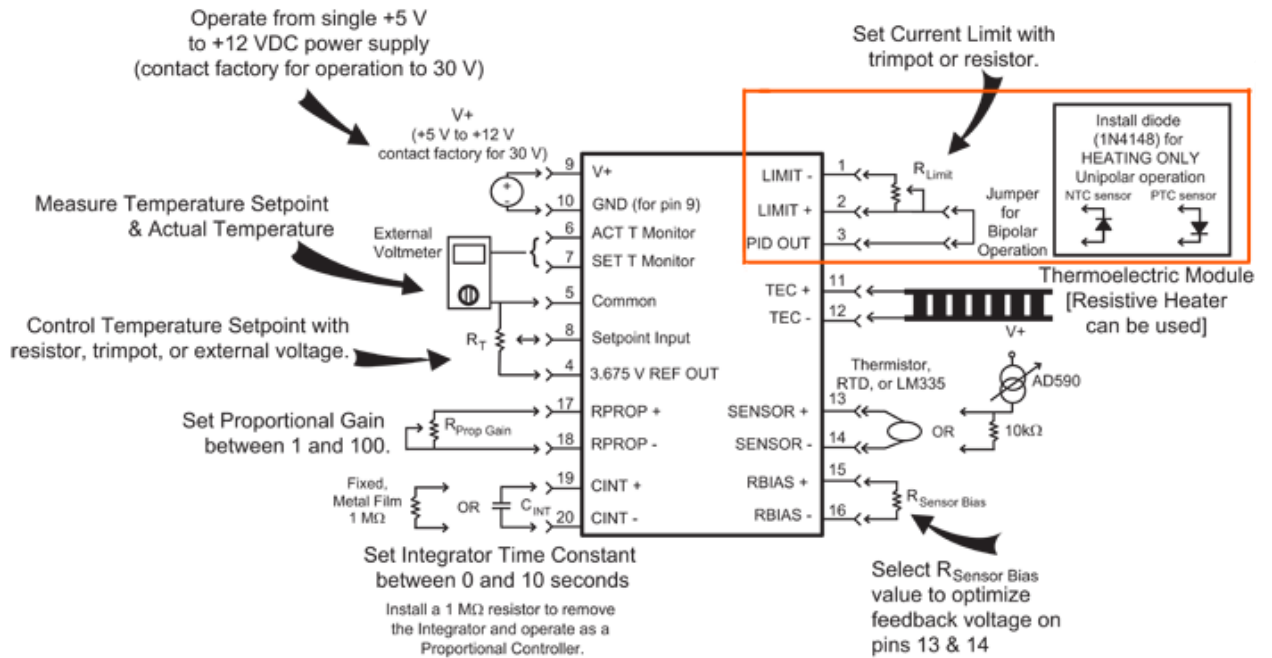
- El controlador de temperatura HTC 1500 presentaba una configuración unipolar, lo cual indicaba que únicamente las celdas de peltier iban a calentar.
- Al interior de la planta se encontraron dos placas de cobre que se encargaban de transferir el calor proporcionado por las celdas de peltier, se observó que no eran simétricas, excesivamente gruesas y se encontraban unidas por puntos de soldadura que no permitían una eficiente transferencia de temperatura.
- La planta debía contar con 4 celdas de peltier, al verificar el contenido solo se encontraron 3 por lo tanto se adquirieron 2 celdas más para agregar la que faltaba y dejar una en backup.

Para dar solución a las fallas encontradas se plantean las siguientes subfases:

2.1.1 *Reconfiguración e implementación del HTC 1500*

De acuerdo al datasheet del controlador de temperatura HTC 1500, se opta por la configuración bipolar que ofrece el fabricante realizando cambios a la configuración de la salida de corriente (pines 2 y 3), ya que en trabajos anteriores [1] en estos pines estaba conectado un diodo Zener que teniendo en cuenta la hoja de datos del controlador se usa para operación unipolar, pero de acuerdo a los requerimientos del trabajo se cambia por un jumper, pasando de configuración unipolar a bipolar, permitiendo que las celdas de peltier tengan las funciones de enfriar y calentar.

Figura 19. Configuración unipolar o bipolar



Fuente: Hoja de datos del fabricante [18]

Se realizaron pruebas con esta nueva configuración donde se confirma la funcionalidad de la operación bipolar mostrando variaciones en la temperatura con valores desde los 5 °C y aumentando hasta 60 °C.

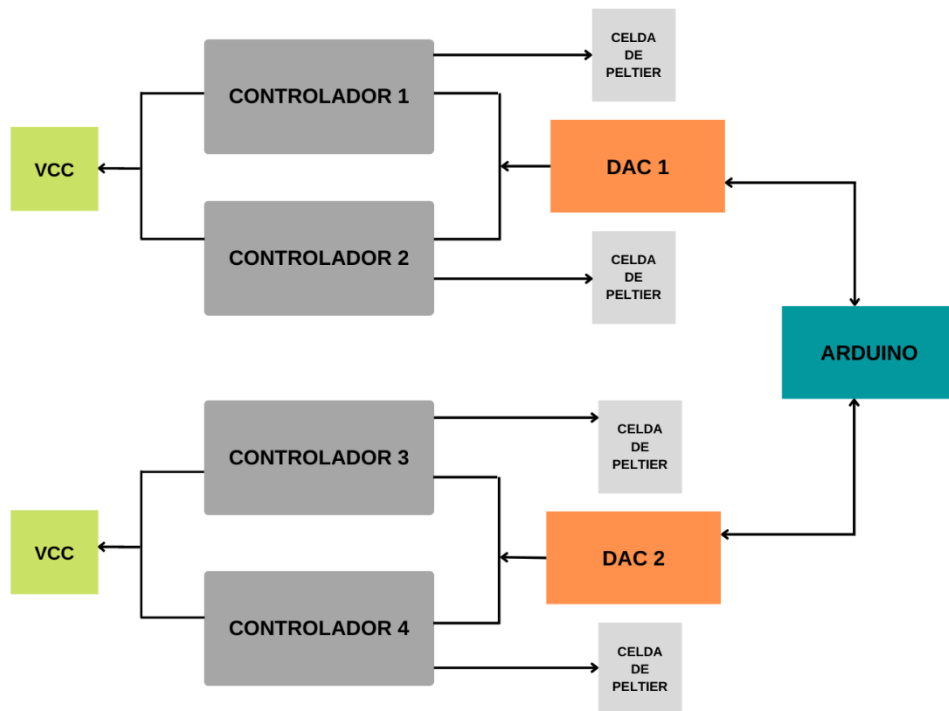
Adicionalmente se realizó otro cambio para la implementación del controlador de temperatura donde se agrega un conversor digital – analógico conectado en los pines 8 y 5, con el fin de conseguir más precisión en las temperaturas requeridas.

Para el setpoint digital del controlador, se opta por la utilización de un conversor Digital – Analógico (DAC) de referencia MCP4725, el cual se alimenta con los 5V proporcionados por la placa de desarrollo de Arduino. Para la comunicación entre la placa y el DAC se emplea la comunicación I2C que es compatible entre los dos dispositivos; como se mencionaba anteriormente, el módulo MCP4725 cuenta con memoria EEPROM, y una configuración de dos direcciones 0x61 y 0x62 que se

deben especificar al momento de usar la comunicación I2C recordando la teoría de maestro y esclavo. Para asegurar una correcta conexión entre el módulo y el controlador, se debe conectar el pin OUT del módulo a la entrada del setpoint del controlador (pin 8), y el pin GND del módulo al pin 5 (common) del controlador.

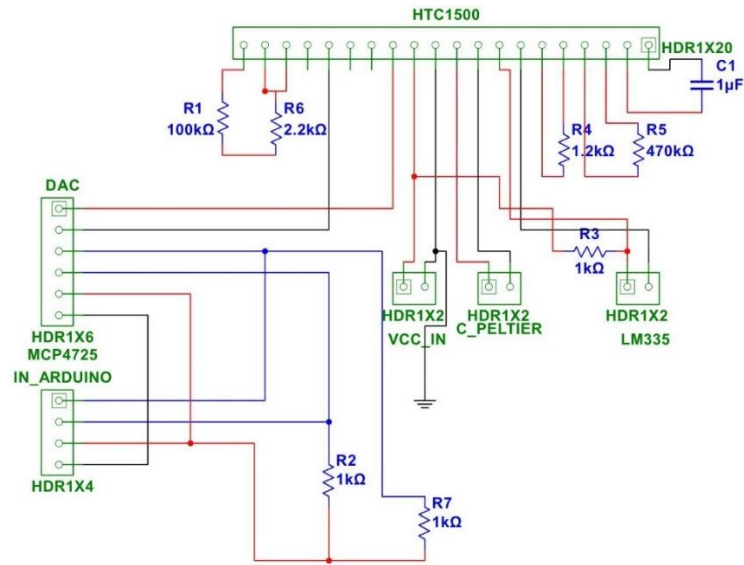
Se diseñó una PCB con el fin de agregar los cuatro controladores de temperatura para cada una de las celdas de peltier, y los dos conversores digitales – analógicos que permitirán controlar la temperatura para los pares de controladores. A continuación, se presenta el diagrama donde se muestra la conexión para los cuatro controladores (Figura 20) y una parte del circuito diseñado para el control de temperatura (Figura 21).

Figura 20. Diagrama de bloques correspondiente a la PCB



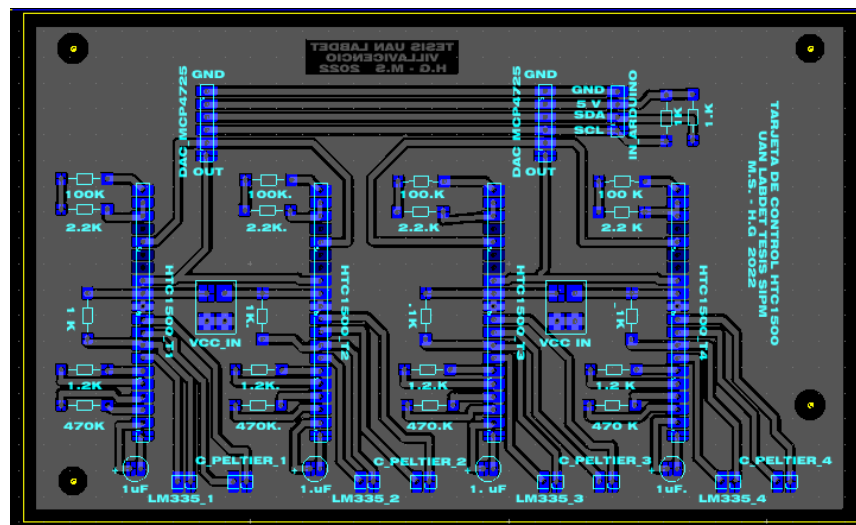
Fuente: Imagen propia

Figura 21. Circuito diseñado para el control de temperatura



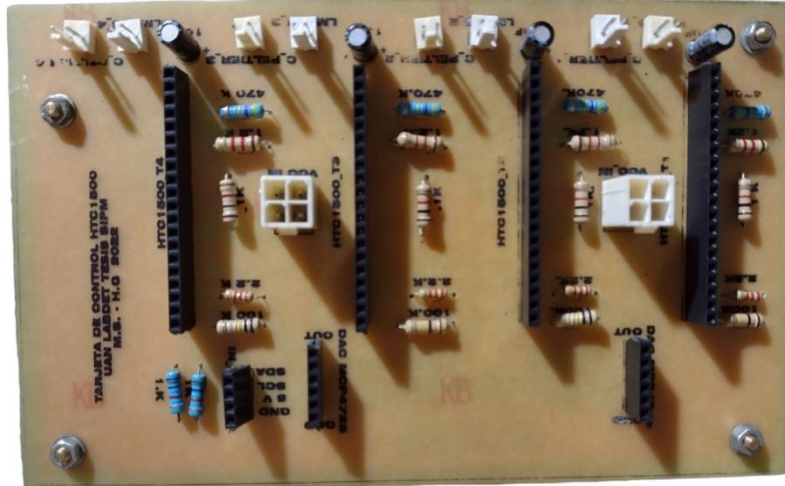
Fuente: Imagen propia

Figura 22. Diseño de PCB para el control de temperatura



Fuente: Imagen propia

Figura 23. Circuito impreso



Fuente: Imagen propia

La placa de desarrollo de Arduino, es programada desde Arduino IDE donde se especifican las librerías a usar, las instrucciones y parámetros para el control del DAC teniendo en cuenta las condiciones del controlador donde indica que no debe recibir más de 3.8 voltios en los pines 5 y 8, como el DAC se alimenta con 5v desde la tarjeta Arduino, debemos truncar la salida de este y dar cumplimiento a las condiciones del controlador, se agrega a la programación las siguientes condiciones:

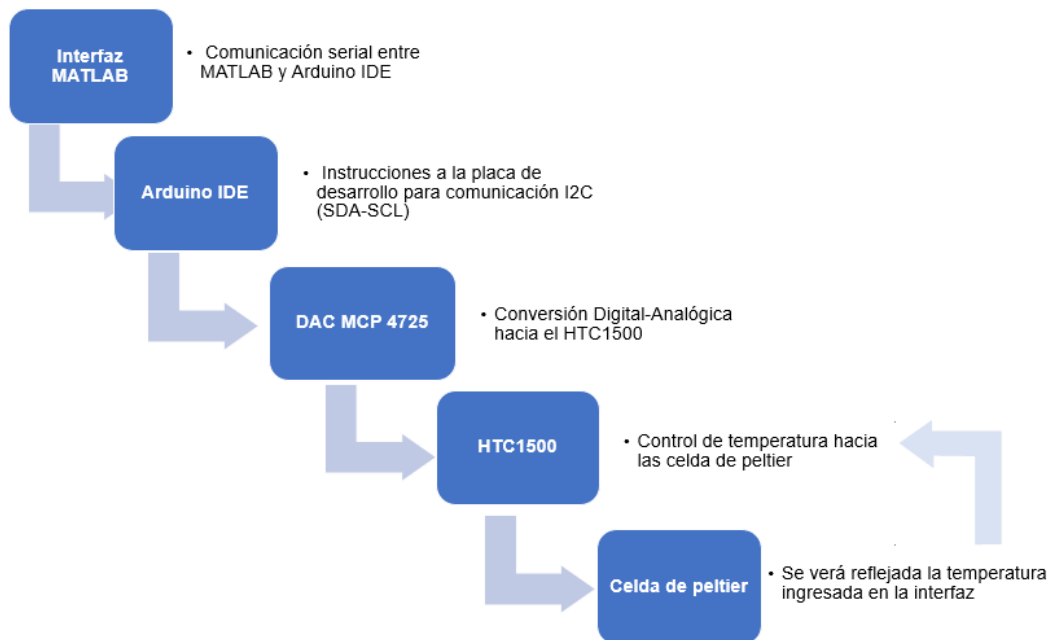
$$\text{salida del DAC} = (4095/90) * \text{la temperatura requerida} \quad \text{Ecuación 2.}$$

$$\text{if}(\text{salida DAC0} < 2730 \ \&\& \ \text{salida DAC1} < 2730) \quad \text{Ecuación 3.}$$

De esta forma nos aseguramos que el convertidor no sobrepase los límites del controlador; el programa permite la conexión con la plataforma Matlab a través de la comunicación serial donde se creó una interfaz de usuario que facilita el envío de la temperatura deseada para las celdas de peltier mediante instrucciones hacia Arduino IDE, este se encargará de compilar los datos y subirlos a la placa de

desarrollo que a su vez serán enviados al DAC, al controlador HTC 1500 y finalmente a las celdas de peltier.

Figura 24. Diagrama lógico de comunicación

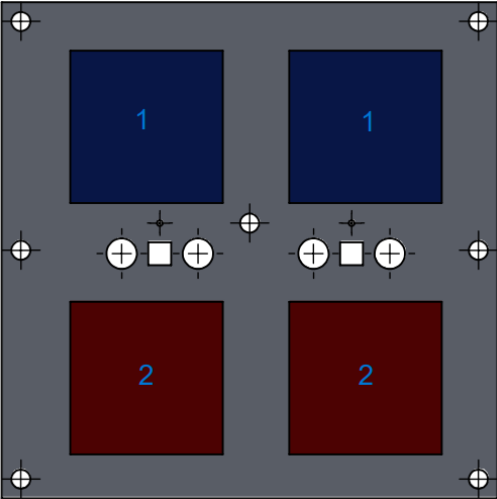


Fuente: Imagen propia

2.1.2 Configuración celdas de peltier

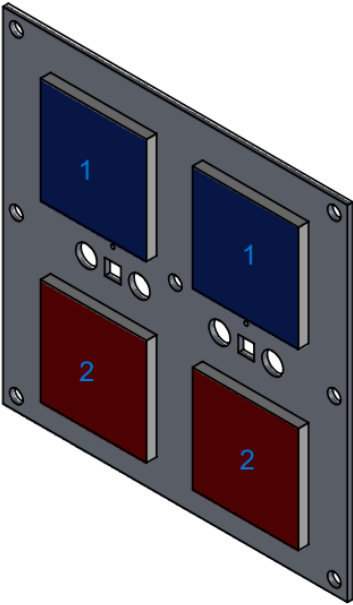
A continuación, se muestra la ubicación de las celdas de peltier y la configuración que debe tener para garantizar que, al momento de recibir la orden de los controladores estas logren estabilizar la realimentación mediante los LM335 y así contar con una variación en la temperatura.

Figura 25. Vista frontal ubicación de las celdas de peltier



Fuente: Imagen propia

Figura 26. Vista lateral de la ubicación de las celdas de peltier

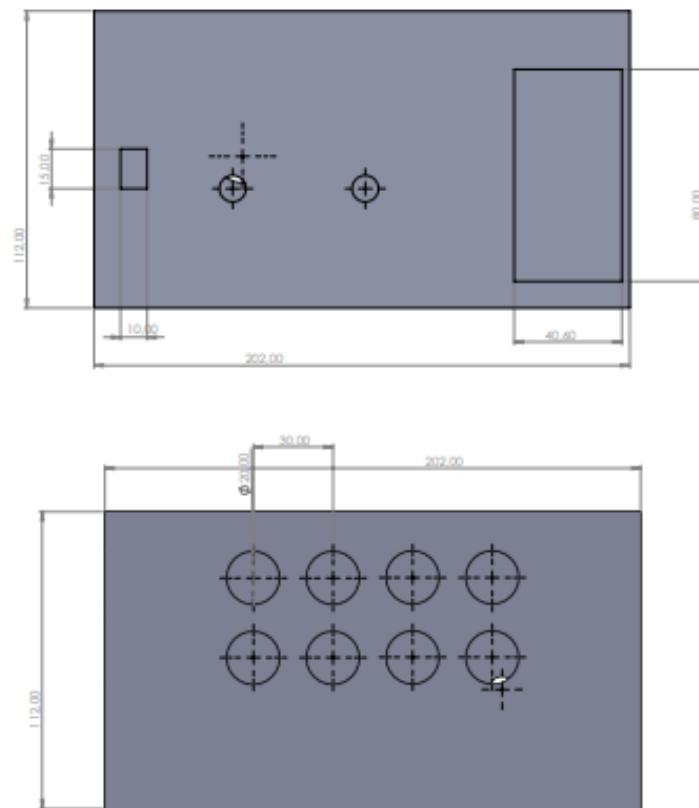


Fuente: Imagen propia

2.1.3 Diseño y acondicionamiento de la planta de control

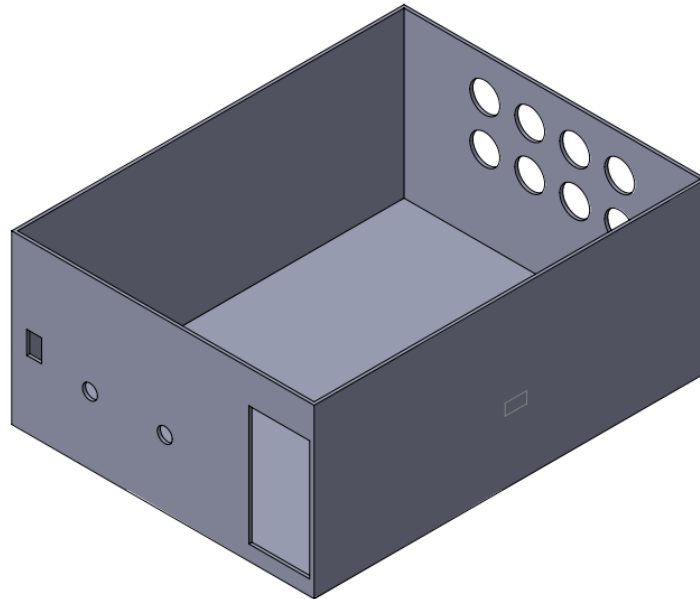
Para garantizar una mejora en el control de temperatura y organizar los componentes, se diseña una caja de conexión que está destinada a contener la PCB de control de temperatura junto con la fuente de alimentación y el Arduino Mega 2560, lo anterior se realizar con el propósito de establecer una conexión segura y mejorar la presentación. A continuación, se muestra el diseño realizado:

Figura 27. Diseño para las conexiones de la caja



Fuente: Imagen propia

Figura 28. Diseño 3D de la caja



Fuente: Imagen propia

La caja cuenta con las siguientes características:

- 8 salidas para conectar las celdas de peltier y los sensores
- 2 ventiladores para la refrigeración de los controladores HTC1500
- 1 puerto para la conexión USB con Arduino
- Puerto que permite encender/apagar la fuente

2.2 Acondicionar a la planta de caracterización una fuente de luz y los SiPMs.

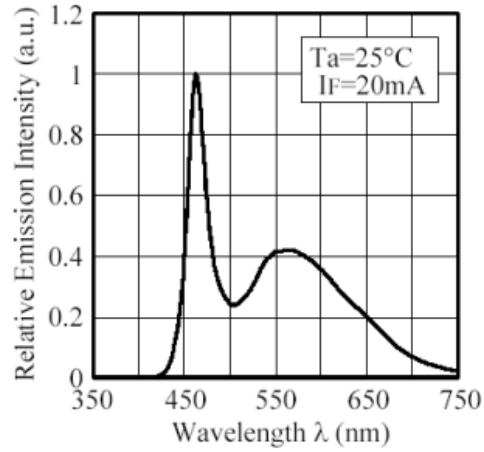
Durante esta fase se realizaron ajustes a la planta de caracterización, con la intención de solucionar el inconveniente existente con las placas de cobre mencionado anteriormente y acondicionar a la planta de caracterización una fuente de luz y los SiPMs.

2.2.1 Acondicionamiento de la fuente de luz

El acondicionamiento de la fuente de luz hace referencia a un led que se encuentra conectado a un generador de señales que le permite parpadear a la frecuencia indicada, para este caso se usó el led de referencia L5P47 [30] permitiendo generar una cantidad determinada de fotones para ser detectados por el SiPM, para visualizar la señal y la cantidad de voltios enviados al led, se conecta de forma paralela un osciloscopio donde se evidencia la señal enviada y así comparar la respuesta que proporciona el SiPM.

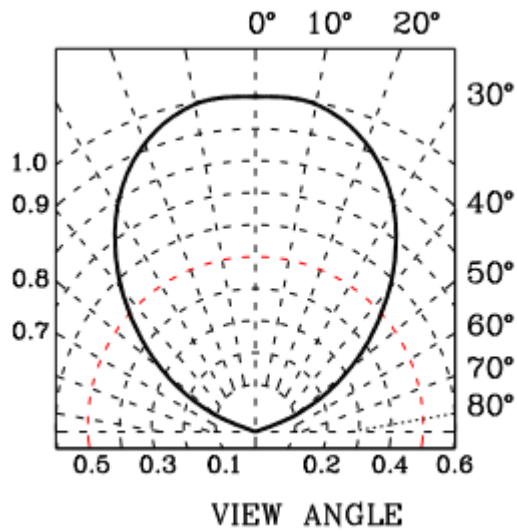
El led L5P47 tiene un espectro de luz comprendido desde los 470nm aproximadamente hasta los 700nm, por esta razón la luz es blanca debido a que se encuentra emitiendo los colores del espectro de luz, en la Figura 29 se muestra la gráfica para el espectro del led. La Figura 30 hace referencia al ángulo de vista del led, el cual indica donde se encuentra emitiendo radiación, es decir, que dentro del lóbulo es donde se concentra la mayor intensidad de luz. [30]

Figura 29. Espectro del led



Fuente: Hoja de datos del fabricante [30]

Figura 30. Ángulo de vista

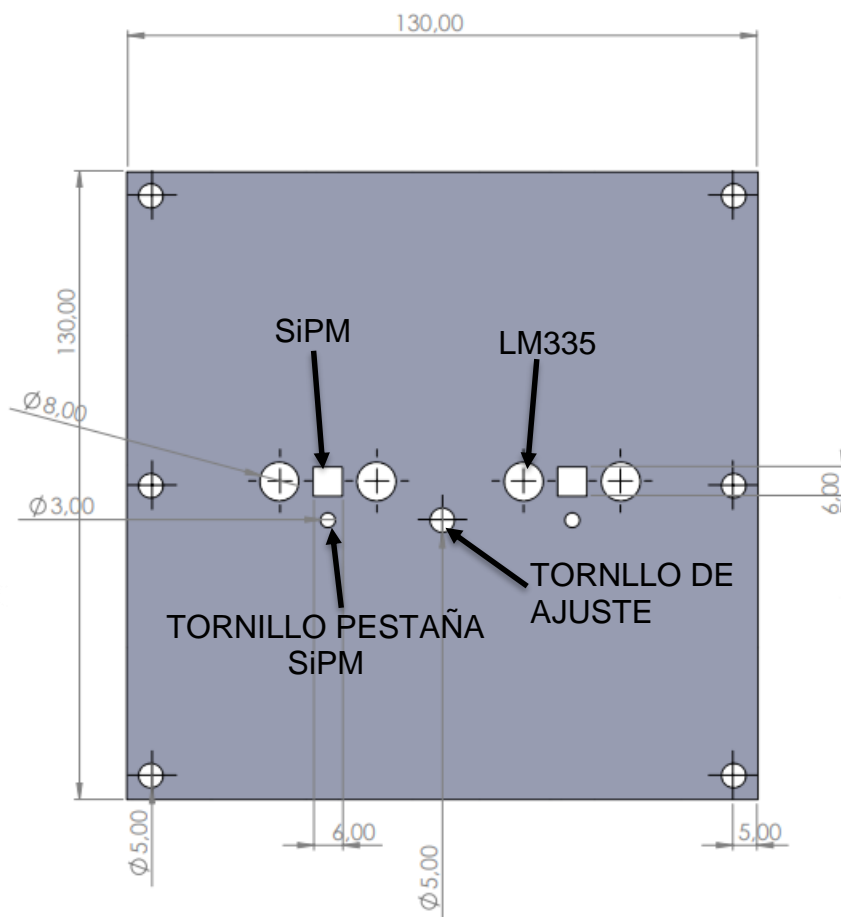


Fuente: Hoja de datos del fabricante [30]

2.2.2 Acondicionamiento de los SiPMs

En versiones anteriores de la planta de caracterización se contaba con placas de cobre que no eran prácticas debido a su grosor, falta de uniformidad y no contaba con más espacio para instalar los SiPMs ya que se encontraban unidas por soldadura. Para mayor comodidad y versatilidad de la planta de caracterización se cambian las placas de cobre por placas de aluminio de 2mm de grosor, realizando una reubicación de los sensores de temperatura y agregando espacio que permita instalar los SiPMs, ya que requieren de una ubicación fija y estable, como se observa en la figura 31.

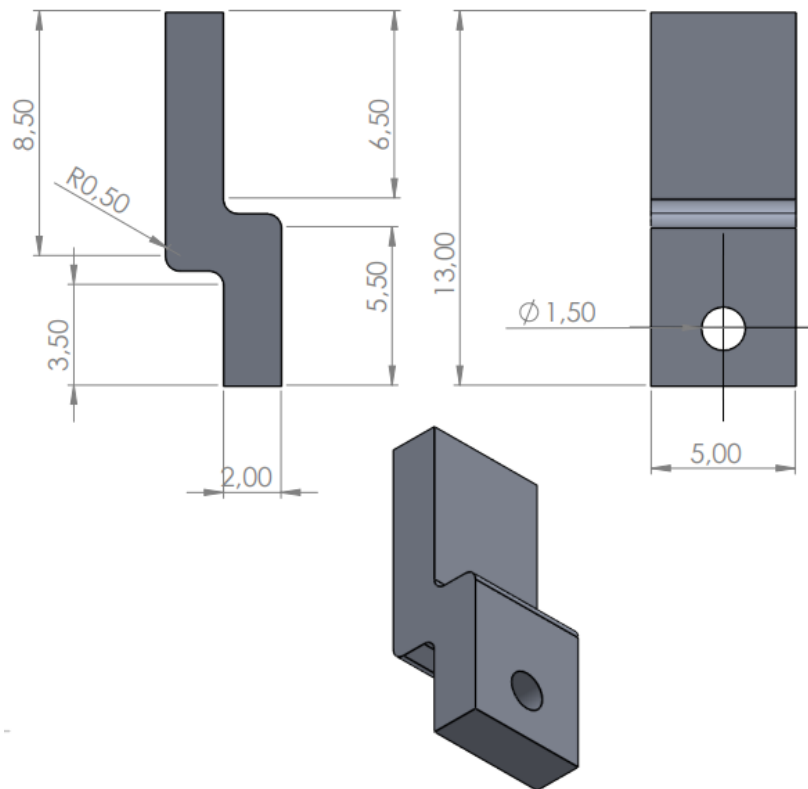
Figura 31. Placa de aluminio diseñada



Fuente: Imagen propia

Para sujetar los SiPMs se diseñan dos pestañas a medida que los sostendrá, permitiendo que estos queden fijos y estables.

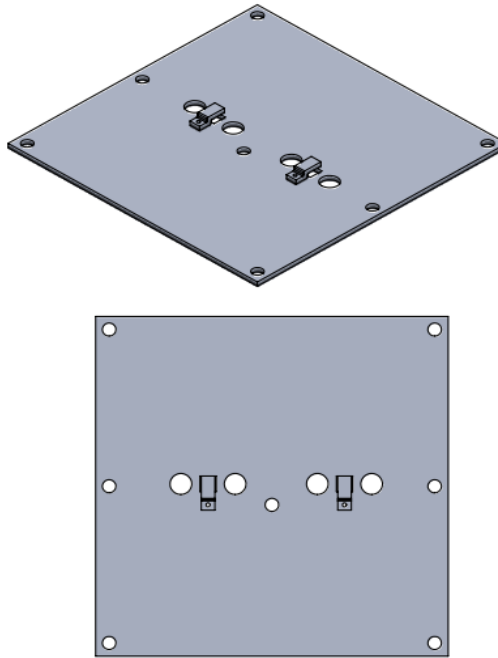
Figura 32. Pestaña de adaptación



Fuente: Imagen propia

Las dos pestañas de acondicionamiento se atornillaron a la placa de aluminio mostrada anteriormente:

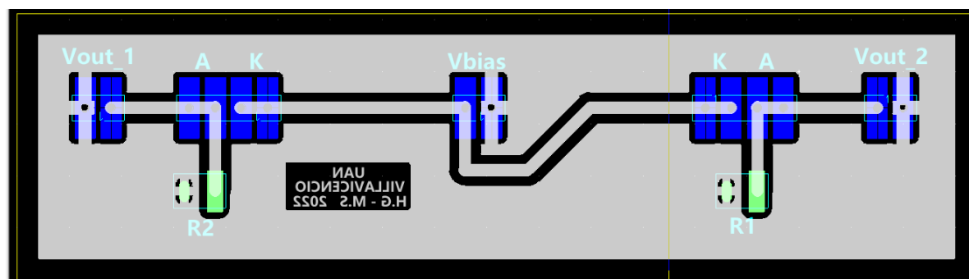
Figura 33. Placa de aluminio con las adecuaciones



Fuente: Imagen propia

Para el SiPM se diseñó un circuito impreso que tiene la función de alimentarlo y adquirir los datos generados para posterior análisis, el diseño de este circuito se hace respetando la configuración de los SiPM (ánodo y cátodo).

Figura 34. Circuito diseñado para el acondicionamiento de los SiPM

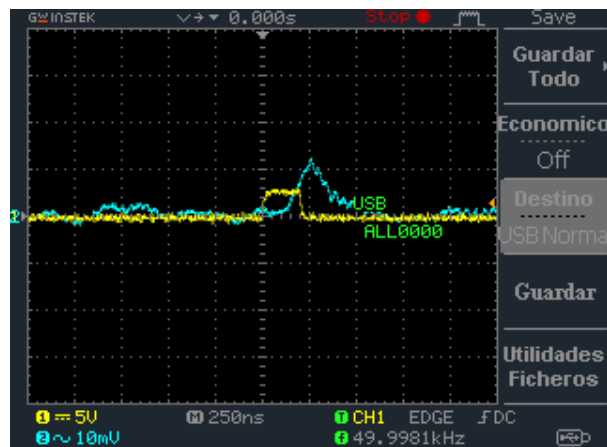


Fuente: Imagen propia

2.3 Adquirir datos y construir histogramas para diferentes temperaturas.

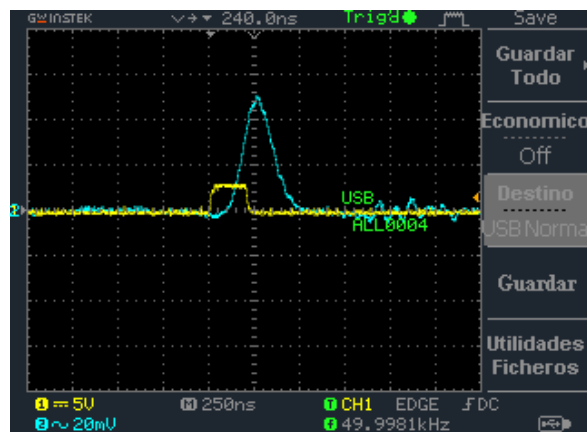
Durante la adquisición de datos se exponen al SiPM a pulsos ópticos de duración variable desde el led, donde se puede ver que al variar el pulso la respuesta cambia, permitiendo identificar que es una variable importante. A continuación, se muestran las gráficas donde se evidencian estos cambios.

Figura 35. Pulso óptico para baja intensidad de luz



Fuente: Imagen propia

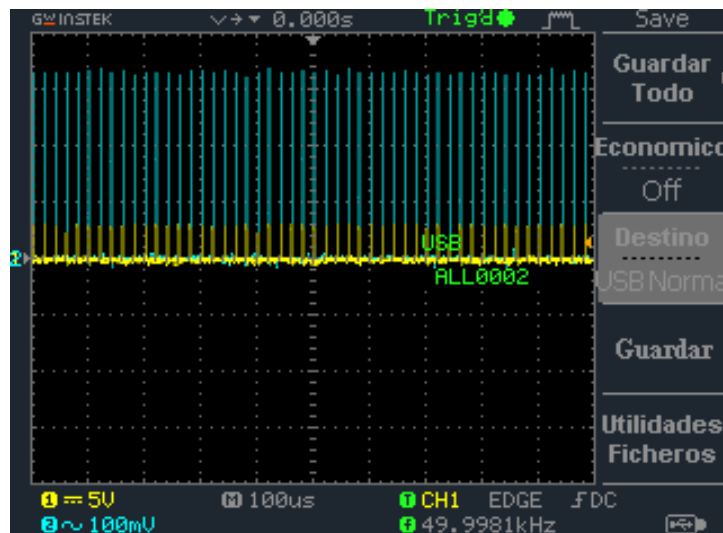
Figura 36. Pulso optico para alta intensidad de luz



Fuente: Imagen propia

Para ver la cantidad de pulsos enviados, se muestra la siguiente imagen

Figura 37. Pulsos enviados



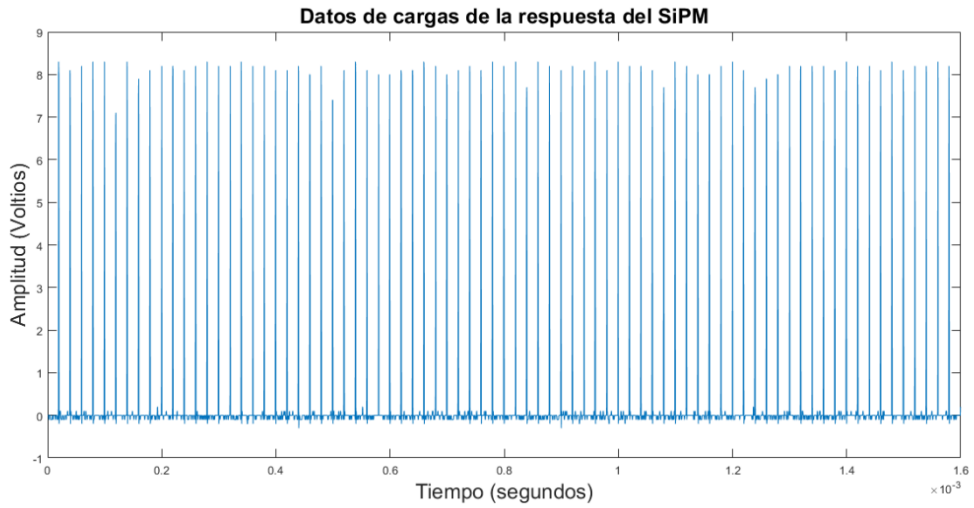
Fuente: Imagen propia

Una vez capturados los datos de los pulsos enviados al osciloscopio se guardan en una memoria USB como archivo .csv, estos se transfieren a la interfaz gráfica para ser analizados y crear histogramas de los datos obtenidos.

Para crear los histogramas se usa la siguiente ecuación:

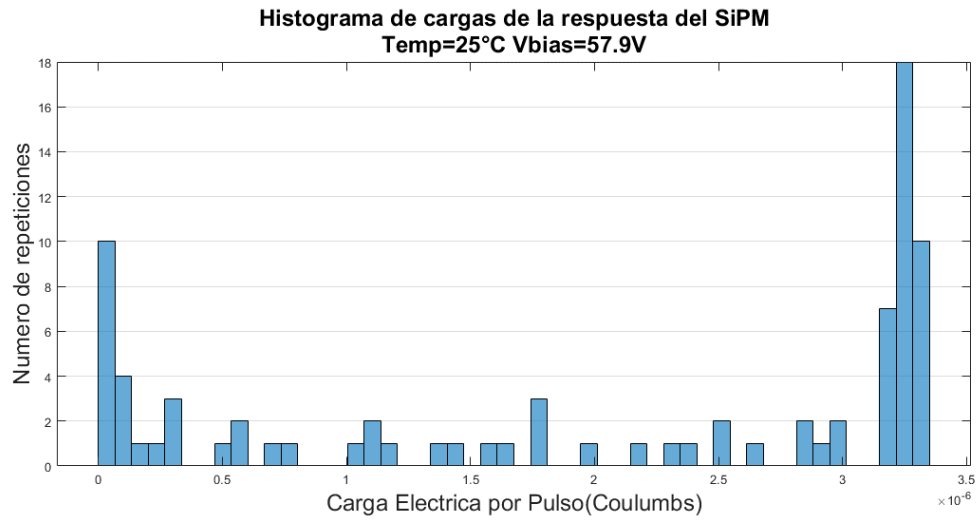
$$Q(t) = \frac{1}{R} \int_a^b V(t) dt \quad \text{Ecuación 4.}$$

Figura 38. Datos respuesta SiPM



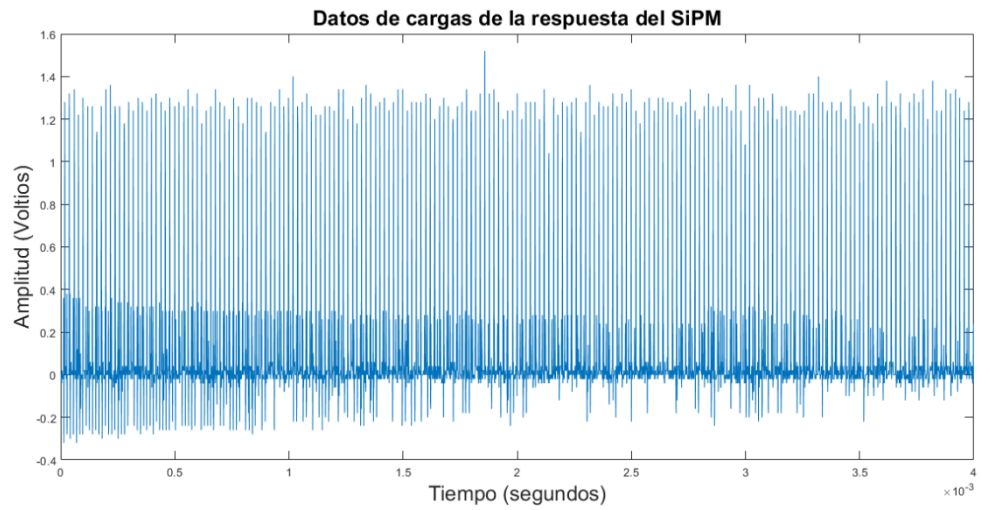
Fuente: Imagen propia

Figura 39. Histogramas



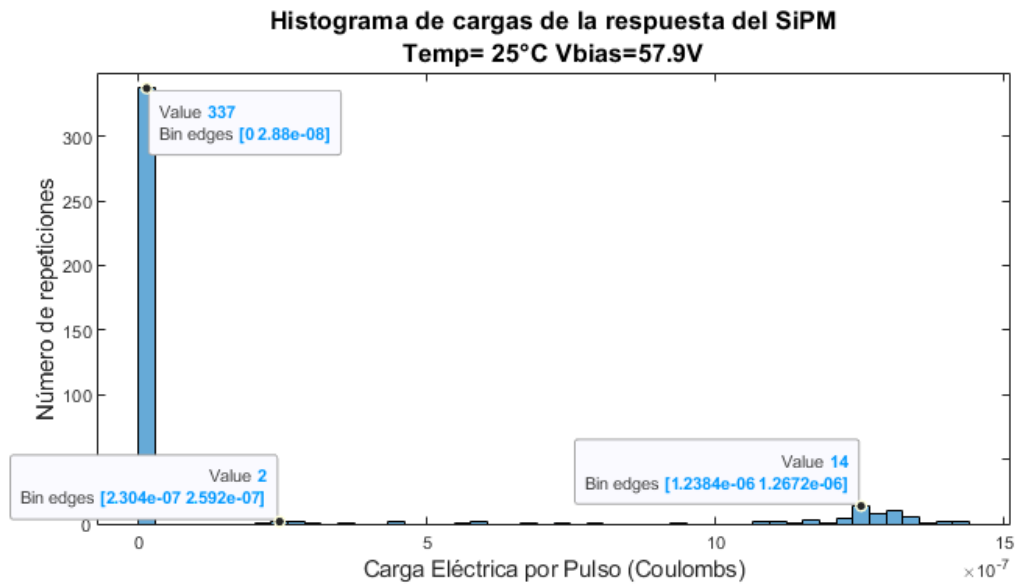
Fuente: Imagen propia

Figura 40. Datos respuesta SiPM



Fuente: Imagen propia

Figura 41. Histograma



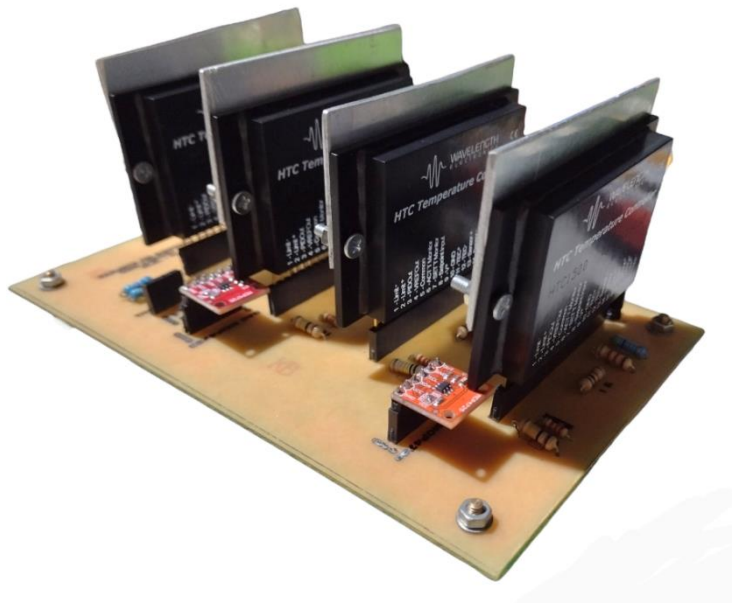
Fuente: Imagen propia

3. Resultados

3.1 Diseño y configuración de la caja de control

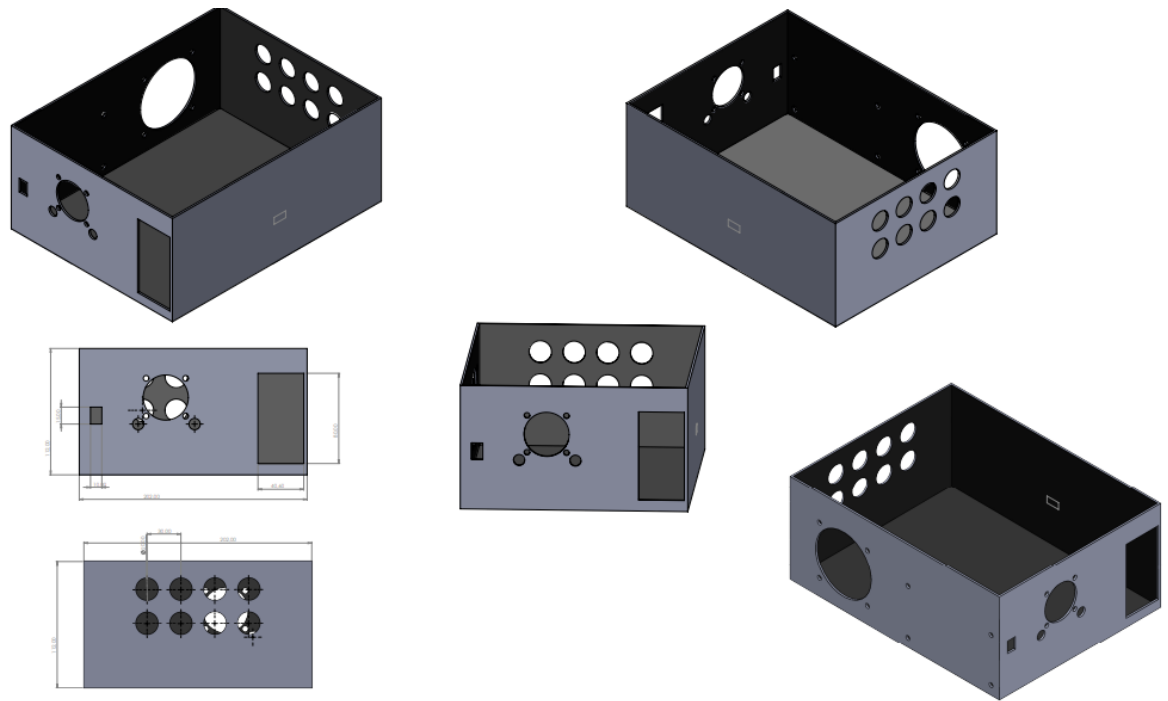
Para una mejor adquisición de los datos y que sea estable, se diseña y construye una caja de paso usada en instalaciones eléctricas la cual pueda contener una conexión fija con la planta de caracterización, en ella se instaló la tarjeta de control de temperatura (PCB) que integra los controladores HTC1500 y dos DAC MCP4725, una fuente de alimentación para la tarjeta y sistema de refrigeración. Junto a esto se integró un Arduino Mega 2560 para la comunicación con la interfaz de control de temperatura.

Figura 42. PCB para control de temperatura



Fuente: Imagen propia

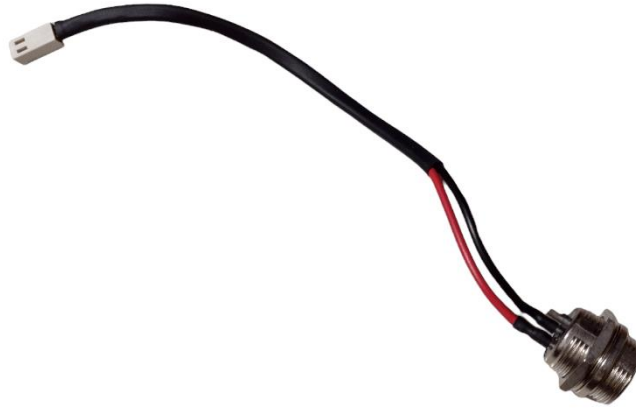
Figura 43. Modelo final de la caja con acondicionamiento para el sistema de refrigeración



Fuente: Imagen propia

Para la conexión con la planta de caracterización se usan conectores circulares XLR de 3 pines, que garantizan una fijación ya que cuenta con una rosca que se ajusta y una única configuración de conexión lo cual es útil porque no se cambiaría la polarización. Para la conexión interna con la tarjeta se instalan dos cables a cada uno de los conectores respetando la configuración de la planta, y en el otro extremo se instala un conector gp de dos pines para conectar a la tarjeta.

Figura 44. Cable de conexión interno



Fuente: Imagen propia

Figura 45. Cable de conexión externo



Fuente: Imagen propia

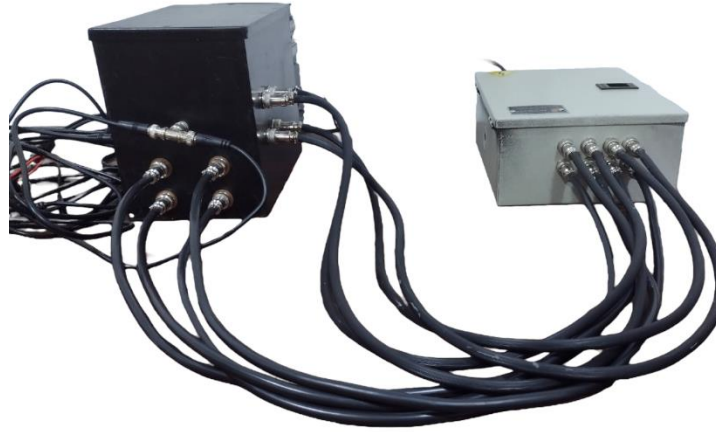
Finalmente se muestra internamente la caja donde se encuentra la PCB, la fuente de alimentación, la tarjeta Arduino y el sistema de refrigeración; posteriormente se muestra la conexión de la planta de caracterización con la caja de control.

Figura 46. Vista interna de la caja de control



Fuente: Imagen propia

Figura 47. Conexión con la planta de caracterización y la planta de control



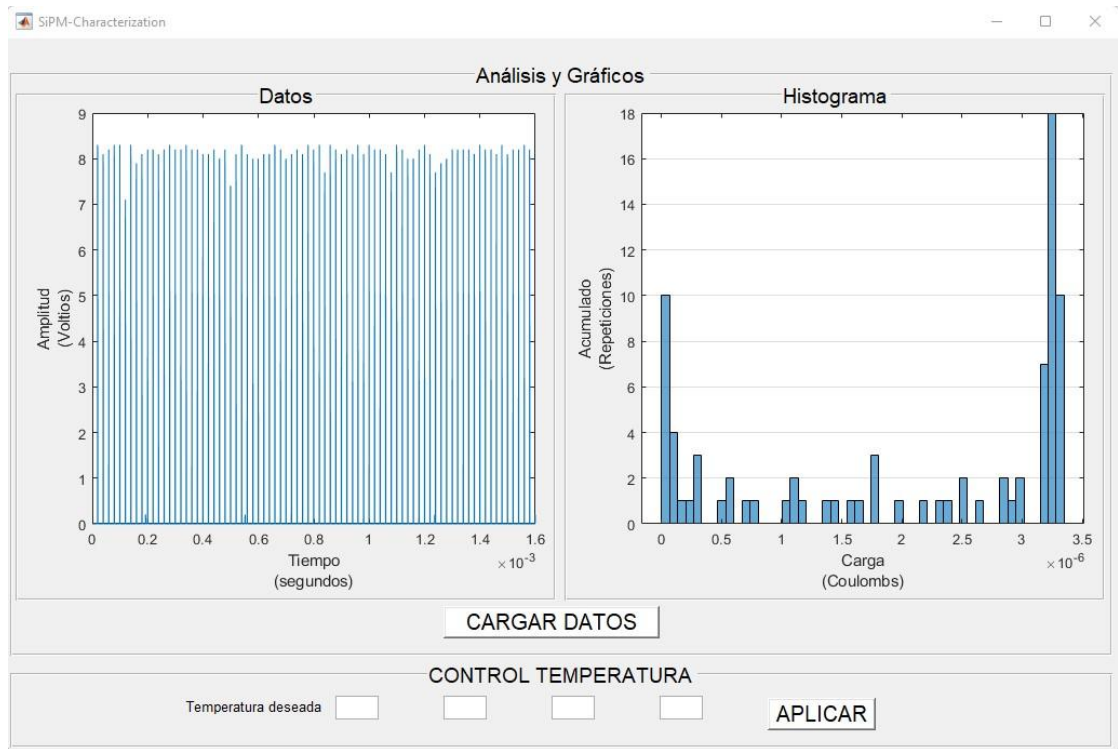
Fuente: Imagen propia

3.2 Interfaz gráfica, datos e histogramas

Se desarrolla una interfaz gráfica en Matlab donde esta se conecta con los controladores por medio de Arduino usando la comunicación serial para realizar las variaciones de temperatura; en esta misma interfaz se puede analizar los datos obtenidos previamente, de esta forma se continúa realizando operaciones e ir guardando datos en la memoria del osciloscopio, es decir los datos que se estarían analizando son los correspondientes a las operaciones anteriores y no a las actuales.

Los datos e histogramas obtenidos durante la ejecución del trabajo se logran evidenciar de las variaciones en las respuestas del SiPM al ser expuesto a cambios de temperatura.

Figura 48. Interfaz gráfica e histogramas



Fuente: imagen propia

4. Conclusiones y recomendaciones

Durante el desarrollo del presente trabajo, se realizaron múltiples mejoras respecto a los trabajos anteriormente ejecutados que mostraron buenos resultados, pero de igual forma se abrieron oportunidades de mejora y llegar a las siguientes conclusiones:

- Se mejoró el control sobre la planta de caracterización por medio de una tarjeta que integra los cuatro controladores a una interfaz gráfica con la cual se puede indicar la temperatura deseada.
- Para la planta en las celdas de peltier se debe invertir la orientación de las caras, en este caso se nombrarán como cara 1 y cara 2, puesto que los LM335 al realizar la realimentación hacia la tarjeta de control le indican inicialmente que se deben calentar.
- Controlar las cuatro celdas de peltier al tiempo pasa de ser un sistema simple a y se convierte en un sistema complejo, por lo tanto, se abre la oportunidad a una próxima investigación para un modelo de control de cuatro variables
- Se observó que se debe rediseñar el sistema de refrigeración para la caja de control.
- Se recomienda usar un amplificador operacional con una respuesta en frecuencia mayor o igual a 150MHz y buscar una fuente lo suficientemente potente para alimentar el SiPM, ya que requiere un voltaje mínimo de 60V.

5. Anexos

5.1 Código Matlab comunicación serial

```
clc %limpia la pantalla del comand window
global T1 T2 T3 T4
warning off %eliminar las posbles alertas

COM='COM6'; % Cambiar al com de su arduino
delete(instrfind({'Port'},{COM})); %borrar cualquier uso del puerto COM
que esté previamente activo
arduinoSerial=serial(COM); %crear el objeto puerto serial COM

q1Ref=get(T1, 'String');
q2Ref=get(T2, 'String');
q3Ref=get(T3, 'String');
q4Ref=get(T4, 'String');

q1=0;%crea las variables
q2=0;%donde se almacenan
q3=0;%los datos devueltos por el arduino
q4=0;

fopen(arduinoSerial);% conecta el objeto puerto con el dispositivo
(puerto físico)
pause(3);

disp('Recibiendo Datos..');
trama=[q1Ref ',' q2Ref ',' q3Ref ',' q4Ref]; % trama para envio de datos
fprintf(arduinoSerial, '%s\n', trama, 'sync');% escribe la trama en el
objeto puerto COM, básicamente está enviando la trama al arduino por la
conexión USB

q1 = fscanf(arduinoSerial, '%d\n');
q2 = fscanf(arduinoSerial, '%d\n');
q3 = fscanf(arduinoSerial, '%d\n');
q4 = fscanf(arduinoSerial, '%d\n');

q1Ref=str2num(q1Ref);
q2Ref=str2num(q2Ref);
q3Ref=str2num(q3Ref);
q4Ref=str2num(q4Ref);

disp('Datos Recolectados..');
clc
%%
fclose(arduinoSerial); %desconecta el objeto puerto del COM real
delete(arduinoSerial); %elimina el objeto puerto
%%
```

```

figure
subplot(221)
plot(q1,'b+','LineWidth',2),hold on,
plot(q1Ref,'r','LineWidth',2),legend('Medida','Referencia')
subplot(222)
plot(q2,'b+','LineWidth',2),hold on,
plot(q2Ref,'r','LineWidth',2),legend('Medida','Referencia')
subplot(223)
plot(q3,'b+','LineWidth',2),hold on,
plot(q3Ref,'r','LineWidth',2),legend('Medida','Referencia')
subplot(224)
plot(q4,'b+','LineWidth',2),hold on,
plot(q4Ref,'r','LineWidth',2),legend('Medida','Referencia')

```

5.2 Código interfaz gráfica

```

clear all      %borra todas las variables
close all     %cierra todos los puertos, programas...
clc           %limpia la pantalla del comand window
global T1 T2 T3 T4 wq1 wq2
warning off   %eliminar las posbles alertas

IMAGEN=figure('Units','pixels','position',[70 50 1030
660],'dockcontrols','off',...
'Numbertitle','off','resize','on','Name','SiPM-
Characterization','menubar','none','toolbar','none');

controlpanell =
uipanel('Parent',IMAGEN,'units','pixels','Title','Análisis y
Gráficos','FontSize',14,...
        'Position',[4 90 1020 550],'TitlePosition','centertop');

        panelgraftiempo =
uipanel('Parent',controlpanell,'units','pixels','Title','Datos','FontSize
',14,...
        'Position',[4 50 500 480],'TitlePosition','centertop');

        panelhisto =
uipanel('Parent',controlpanell,'units','pixels','Title','Histograma','Fon
tSize',14,...
        'Position',[512 50 500 480],'TitlePosition','centertop');

wq1=axes('Parent',panelgraftiempo,'units','pixels','visible','off','posit
ion',[70 70 410 380]);
%         xlabel({'Tiempo','(segundos)'});
%         ylabel({'Amplitud','(Voltios)'});

```

```

wq2=axes('Parent',panelhisto,'units','pixels','visible','off','position',
[70 70 410 380]);
%       xlabel({'Carga','(Coulombs)'});
%       ylabel({'Acumulado','(Repeticiones)'});

        cargardata =
uicontrol(controlpanell1,'style','pushbutton','string','CARGAR
DATOS','position',[400,15,200,30],...

'backgroundcolor','WHITE','foregroundcolor','BLACK','fontsize',15,...
        'min',0,'max',1,'value',1,'callback','Analisis');
%       grafdata =
uicontrol(controlpanell1,'style','pushbutton','string','GRAFICAR','positio
n',[550,15,200,30],...
%
'backgroundcolor','WHITE','foregroundcolor','BLACK','fontsize',15,...
%       'min',0,'max',1,'value',1,'callback','grafico');

controlpanel2 = uipanel('Parent',IMAGEN,'units','pixels','Title','CONTROL
TEMPERATURA','FontSize',14,...
        'Position',[4 5 1020 80],'TitlePosition','centertop');

        uicontrol(controlpanel2,'Style','text',...
        'String','Temperatura deseada','fontsize',10,...
        'foregroundcolor','BLACK','Position',[150 30 150 15]);

T1=uicontrol(controlpanel2,'units','pixels','Style','edit','backgroundcol
or','white',...
        'Position',[300 25 40 22],'string','','max',1);

T2=uicontrol(controlpanel2,'units','pixels','Style','edit','backgroundcol
or','white',...
        'Position',[400 25 40 22],'string','','max',1);

T3=uicontrol(controlpanel2,'units','pixels','Style','edit','backgroundcol
or','white',...
        'Position',[500 25 40 22],'string','','max',1);

T4=uicontrol(controlpanel2,'units','pixels','Style','edit','backgroundcol
or','white',...
        'Position',[600 25 40 22],'string','','max',1);

aplicar=uicontrol(controlpanel2,'style','pushbutton','string','APLICAR','
position',[700,15,100,30],...

'backgroundcolor','WHITE','foregroundcolor','BLACK','fontsize',15,...
        'min',0,'max',1,'value',1,'callback','comArdu');

```

5.3 Código Arduino comunicación serial

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_MCP4725.h>

String dataString = "";

bool dataComplete = false;

const char separator = ',';

const int dataLength = 4;

int datos[dataLength];

const int LED=8;

//double datos[sizeData];

Adafruit_MCP4725 dac;

Adafruit_MCP4725 dac1;

// Angulos en grados

int q1 = 0;

int q2 = 0;

int q3 = 0;

int q4 = 0;

int q11 = 0;

int q21 = 0;

void setup()

{

    Serial.begin(9600);

    dac.begin(0x60);
```

```

    dac1.begin(0x61);
}
void loop() {
    if (dataComplete)
    {
        for (int i = 0; i < dataLength ; i++)
        {
            int index = dataString.indexOf(separator);
            datos[i] = dataString.substring(0,index).toInt();
            dataString = dataString.substring(index + 1);
        }
        q1=datos[0];
        q2=datos[1];
        q3=datos[2];
        q4=datos[3];
        q11=(4095/90)*q1;
        q21=(4095/90)*q2;
        if(q11<2730 && q21<2730){
            dac.setVoltage(q11, false);
            dac1.setVoltage(q21, false);
        }
        Serial.println(q1);
        Serial.println(q2);
        Serial.println(q3);
        Serial.println(q4);
        dataString = "";
        dataComplete = false;
    }
}

```

```
    }  
}  
void serialEvent() {  
    while (Serial.available()) {  
        char inChar = (char)Serial.read();  
        dataString += inChar;  
        if (inChar == '\n') {  
            dataComplete = true;  
        }  
    }  
}}
```

Referencias Bibliográficas

- [1] V. H. Rios Pineda, *Sistema de control automático de temperatura para una plataforma de caracterización de SiPM en el LabDet-Villavicencio (Tesis de pregrado)*. Villavicencio: Universidad Antonio Nariño, 2021.
- [2] P. A. Baquero Beltrán, *Diseño e implementación de un control de temperatura para una planta de caracterización de fotomultiplicadores de silicio (Tesis de pregrado)*. Villavicencio: Universidad Antonio Nariño, 2020.
- [3] T. Huang and Z. Zhang, "Characterization of 1-inch CLYC scintillator coupled with 8 × 8 SiPM array," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 999, p. 165225, May 2021, doi: 10.1016/J.NIMA.2021.165225.
- [4] R. Klanner, "Characterisation of SiPMs," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 926, pp. 36–56, May 2019, doi: 10.1016/J.NIMA.2018.11.083.
- [5] T. Tsang, "Characterization of VUV sensitive SiPMs in LXe," *2018 IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imaging Conf. NSS/MIC 2018 - Proc.*, Nov. 2018, doi: 10.1109/NSSMIC.2018.8824427.
- [6] P. Gong, Z. Han, L. Gao, P. Wang, J. Zhang, and X. Tang, "Development of a SiPM-based CsI(Tl) spectrometer with gain stabilization designs for rapid temperature variations," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 927, pp. 301–305, May 2019, doi: 10.1016/J.NIMA.2019.02.058.

- [7] Z. Lin, B. Hautefeuille, S. H. Jung, J. Moon, and J. G. Park, "The design of a scintillation system based on SiPMs integrated with gain correction functionality," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 52, no. 1, pp. 164–169, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.NET.2019.07.005.
- [8] S. Kumar Goyal, A. P. Naik, and P. Sharma, "Characterization of Silicon Photomultipliers (SiPMs) for Space Exploration," *Adv. Sp. Res.*, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.ASR.2022.08.047.
- [9] "MPPCs for precision measurement MPPC® (multi-pixel photon counter)," Accessed: Oct. 11, 2022. [Online]. Available: www.hamamatsu.com.
- [10] "MPPCs (SiPMs) / SPADs | Hamamatsu Photonics."
<https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/mppc.html>
(accessed Oct. 11, 2022).
- [11] "Introduction to SiPM Technology."
<https://www.aptechnologies.co.uk/support/SiPMs/intro> (accessed Nov. 02, 2022).
- [12] F. A. Popescu, G. Chiritoi, and E. M. Popescu, "Measurement setup and procedure for the accurate determination of the gain and the breakdown voltage for Silicon Photomultiplier (SiPM) Arrays," *Proc. Int. Semicond. Conf. CAS*, vol. 2021-October, pp. 275–278, 2021, doi: 10.1109/CAS52836.2021.9604171.
- [13] "MPPC S13360-6025CS | Hamamatsu Photonics."
https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S13360-6025CS.html (accessed Oct. 11,

2022).

- [14] L. O. Freire, L. M. Navarrete, B. P. Corrales, and J. N. Castillo, “Efficiency in thermoelectric generators based on Peltier cells,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 355–361, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.08.099.
- [15] A. Mironova, P. Mercorelli, and A. Zedler, “A multi input sliding mode control for Peltier Cells using a cold–hot sliding surface,” *J. Franklin Inst.*, vol. 355, no. 18, pp. 9351–9373, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.JFRANKLIN.2017.10.033.
- [16] “Vista de Temperatura y Ley Cero de la Termodinámica.”
<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/article/view/5595/72>
95 (accessed Oct. 11, 2022).
- [17] STMicroelectronics, “Precision temperature sensors,” 2008, Accessed: Oct. 11, 2022. [Online]. Available: www.st.com.
- [18] W. Electronics Inc, “HTC Series Temperature Controller and Evaluation Board Datasheet,” 2021, Accessed: Oct. 11, 2022. [Online]. Available: www.teamwavelength.com/support/design-tools/soa-tc-calculator/.
- [19] Microchip, “MCP4725 Features,” 2009, Accessed: Oct. 11, 2022. [Online]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf>.
- [20] “Arduino Mega 2560 Rev3 — Tienda online de Arduino.” <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> (accessed Oct. 19, 2022).
- [21] O. Nabil, B. Bachir, and A. Allag, “Implementation of a new MPPT Technique for PV systems using a Boost Converter driven by Arduino MEGA,” *Proc. - Int. Conf. Commun. Electr. Eng. ICCEE 2018*, Feb. 2019, doi: 10.1109/CCEE.2018.8634503.

- [22] “MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink.”
<https://la.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed Oct. 11, 2022).
- [23] “Getting Started with Arduino products | Arduino.”
<https://www.arduino.cc/en/Guide> (accessed Oct. 11, 2022).
- [24] P. Bagdalkar and L. Ali, “Hardware Implementation of I2C Controller on FPGA and Validation through Interfacing with Low-Cost ADC,” *Proc. 4th Int. Conf. Inven. Syst. Control. ICISC 2020*, pp. 887–891, Jan. 2020, doi: 10.1109/ICISC47916.2020.9171095.
- [25] C. Liu, Q. Meng, T. Liao, X. Bao, and C. Xu, “A flexible hardware architecture for slave device of I2C bus,” *Proc. - 2019 Int. Conf. Electron. Eng. Informatics, EEI 2019*, pp. 309–313, Nov. 2019, doi: 10.1109/EEI48997.2019.00074.
- [26] “Comunicación en serie y USB - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina.” https://la.mathworks.com/help/matlab/serial-port-devices.html?s_tid=CRUX_topnav (accessed Oct. 11, 2022).
- [27] “USB-6215 - NI.” <https://www.ni.com/es-co/support/model.usb-6215.html> (accessed Oct. 11, 2022).
- [28] “Fuentes De Poder | ¿Qué Son Y Para Que Sirven? | SDI.”
<https://sdindustrial.com.mx/blog/fuentes-de-poder/> (accessed Oct. 11, 2022).
- [29] Sparkle Power Inc., “SPI4601UG.”
<http://www.sparklepower.com/pdf/SPI4601UG.pdf> (accessed Oct. 11, 2022).
- [30] “5.0 mm DIA LED LAMP LSR5UW5C222G.”