



**Sistema de control automático de temperatura para una  
plataforma de caracterización de sipm en el labdetvillavicencio**

**VÍCTOR HUGO RÍOS PINEDA**

20441528324

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad De Ingeniería Mecánica, Electrónica Y Biomédica

Ciudad, Colombia

2021

**Sistema de control automático de temperatura para una  
plataforma de caracterización de sipm en el labdetvillavicencio**

**Víctor Hugo Ríos Pineda**

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

**Ingeniero Electrónico**

Director:

Ing. Luis Fernando Castañeda Melo, PhD

Línea de Investigación:

Control y automatización

Grupo de Investigación:

Labdet Villavicencio

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia

2021

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado Sistema de control  
automático de temperatura para una  
plataforma de caracterización de SiPM en  
labdetvillavicencio, Cumple con los  
requisitos para optar  
Al título de Ingeniero Electrónico.

---

Firma del Tutor

---

Firma Jurado

---

Firma Jurado

Villavicencio, 20 de noviembre de 2021

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
2. JUSTIFICACION .....	18
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	20
4. MARCO TEORICO.....	21
4.1. PRINCIPIOS DE FÍSICA NUCLEAR.....	21
4.1.1 Radiación ionizante .....	21
4.1.2 Radiactividad .....	21
4.1.3 Radioactividad $\alpha$ .....	21
4.1.4 Radiactividad $\beta$ .....	22
4.1.5 Radioactividad $\gamma$ .....	22
4.1.6 Fotón .....	22
4.2 FOTOMULTIPLICADOR DE SILICIO (SIPM).....	22
4.3. CARACTERISTICAS IMPORTANTES DE LOS SIPM.....	24
4.3.1. Factor de relleno (Fill factor).....	24
4.3.2. Eficiencia en la deteccion de fotones (PDE).....	24
4.3.3. Ancho de banda .....	25
4.3.4. Rango dinamico.....	25
4.3.5. Ganancia .....	25
4.3.6. Relacion señal a ruido .....	26
4.3.7. Cuentas oscuras (Dark counts) .....	26
4.3.8. Crosstalk.....	26
4.3.9. Afterpulsing.....	27
4.4. VENTAJAS DE LOS FOTOMULTIPLICADORES DE SILICIO	27

4.5.	DESVENTAJAS DE LOS FOTOMULTIPLICADORES DE SILICIO.....	27
4.6.	FOTOMULTIPLICADORES ANALÓGICOS DE SILICIO.....	28
4.7.	CONTROL PROPORCIONAL (PI).....	28
4.8.	SENSOR DE TEMPERATURA LM335.....	30
4.9.	CONTROLADOR HTC 1500.....	31
5.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	33
5.2.	MÉTODO .....	33
5.2.1	Fase I. Rediseño de la estructura física de la planta del SiPM	
	34	
5.2.1.	Fase II. Identificación y modelización de la nueva planta de caracterización de SiPM .....	35
5.2.2.	Fase III. Diseño e implementación de la interfaz grafica de usuario para la plataforma de caracterización del SiPM.....	38
5.2.3.	Adaptación del control de temperatura e implementación analógica .....	39
5.2.4.	Integrar y probar la interfaz gráfica, la planta y el controlador analógico .....	42
5.	ANALISIS DE RESULTADOS .....	43
5.1	MODELIZACION DE LA NUEVA PLANTA DE CARACTERIZACION DE SIPM.....	43
5.1.1	Caracterización de los sensores LM335.....	44
5.1.2	Modelo matemático de la planta.....	45
5.3.	RESPUESTA DEL CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMATICO.....	47
5.3.1.	Acondicionamiento del driver de temperatura htc1500.....	49
6	CONCLUSIONES.....	57
7	RECOMENDACIONES .....	59

8	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	60
9	ANEXOS .....	65
9.1	anexo 1 codigo de matlab.....	490
9.2	anexo 2 planos de la planta.....	494
9.3	anexo 3 Estabilización de temperatura de la celda peltier sometida a variación de tención en temperaturas bajas y altas ..	495
9.4	anexo 4 comparación del voltaje de polarización del semiconductor termoeléctrico.....	496
9.5	anexo 5 diseño de la interfaz grafica .....	496

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fotomultiplicadores de silicio (SiPM) [20].	23
Figura 2. Diagrama de un controlador PI. [23]	29
Figura 3. Sensor LM335 [23]	31
Figura 4. HTC 1500 Control de temperatura	32
Figura 5. Estructura física de la planta	34
Figura 6. Adquisición de datos en el programa MATLAB	36
Figura 7. Adquisición de datos en Systemn Identification Toolbox	37
Figura 8. Adquisición de datos en la interfaz ident.	38
Figura 9. Adquisición de datos para el desarrollo de la interfaz	39
Figura 10. Adquisición de datos en control system designer	40
Figura 11. Adquisición de datos para el diseño del control PI	41
Figura 12. Adquisición de datos para el diseño del control Pi automático	42
Figura 13. Interfaz obtenida para la plataforma	42
Figura 14. Modelización de los SiPM en la planta	43
Figura 15. Circuito propuesto por el fabricante	44
Figura 16. Modelamiento matemático de la planta	45
Figura 17. Representación de la respuesta para el modelo matemático	46
Figura 18. Respuesta función de transferencia	47
Figura 19. Respuesta del control de temperatura automático	48
Figura 20. HTC 1500 temperature controller	49
Figura 21. Instalación de diodo de alta velocidad en los pines 2 y 3	50
Figura 22. Instalación de una resistencia $R_{LIMITE}$	51
Figura 23. Configuración de la resistencia en los pines 15 y 16	52
Figura 24. Rediseño de la estructura de la planta	55
Figura 25. Elementos que componen la planta	55

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de estabilización de la temperatura de la celda peltier sometida a variación de tensión.....	46
Tabla 2. Corriente de polarización .....	51



## Lista de anexos

Anexo 1. Código Matlab.....	65
Anexo 2. Planos de la planta .....	69
Anexo 3. Estabilización de temperatura de la celda peltier sometida a variación de tención en temperaturas bajas y altas .....	70
Anexo 4. Comparación del voltaje de polarización del semiconductor termoeléctrico .....	71
Anexo 5. Diseño de la interfaz grafica .....	72

*Dedico este gran triunfo a mis  
padres y cada una de las  
personas que me ayudaron a  
hacer posible este sueño.*

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres quienes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y cada uno de mis anhelos, los cuales estuvieron siempre a mi lado en los días más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida y las personas que más han confiado en mí y en mis capacidades. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro amado padres, como una meta más conquistada.

Agradecerle a mi tutor el ing. Luis Fernando Castañeda Melo, PhD por el tiempo dedicado, los todos los conocimientos brindados y apoyo a la hora de guiarme a través de cada una de las etapas de este proyecto en las cuales aprendí muchas cosas que no hubiera podido lograr solo.

Por último, quiero agradecer a todos mis compañeros en especial a Jhon alexander santos, por el apoyo incondicional ya que me extendió la mano en muchas ocasiones, aun mas cuando me encontraba en aprietos. Gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo mejorar la plataforma de caracterización de fotomultiplicadores de silicio con control analógico de temperatura, para su ejecución se empleó una metodología cuantitativa, descriptiva bajo un enfoque experimental, para su desarrollo se llevaron a cabo cinco fases la primera consistió en establecer los parámetros para el rediseño de la estructura de la planta, la segunda fase fue la identificación y modelización de la planta, la tercera el diseño e implementación de la interfaz, la cuarta fase la adaptación del control de temperatura e implementación analógica y la quinta fase que consistió en integrar y probar la interfaz gráfica, la planta y el controlador analógico. De igual manera se emplearon como instrumentos los sensores LM35, el controlador de temperatura HTC 1500 y como modelador el programa MatLab, obteniendo como resultados una mejora significativa en ganancia de la planta.

**Palabras claves:** SiMP, control analógico, fotomultiplicadores de silicio, temperatura

## **ABSTRACT**

The present research aimed to improve the characterization platform of silicon photomultipliers with analogue temperature control, for its execution a quantitative, descriptive methodology was used under an experimental approach, for its development five phases were carried out, the first one consisted in establishing the parameters for the redesign of the plant structure, the second phase was the identification and modeling of the plant, the third the design and implementation of the interface, the fourth phase the adaptation of temperature control and analog implementation and the fifth phase which consisted of integrating and testing the graphical interface, the plant and the analog controller. In the same way, the LM35 sensors, the HTC 1500 controller and the MatLab program were used as instruments, obtaining as results a significant improvement in profit of the plant.

**Keywords:** SiMP, analog control, silicon photomultipliers, temperatura

## INTRODUCCION

Los fotomultiplicadores de silicio por sus siglas en inglés (SiPM) son fotodetectores innovadores que se basan en una tecnología de estado sólido, se caracterizan por la capacidad de cuantificar desde un fotón individual hasta mil fotones simultáneamente. Así mismo, son sensores altamente veloces que permiten obtener mediciones de tiempo incluso con 10ps (picos segundos) de precisión, trabajan a bajos voltajes de polarización, son compactos, robustos e insensibles a campos magnéticos por lo que tiene una alta eficiencia para la detección de fotones [1].

Por todas estas características se emplean como reemplazo en aplicaciones que requieran fotosensores ultrasensibles y veloces, de ahí que sea utilizado en diversas investigaciones para controlar las variaciones de la ganancia por fluctuaciones de temperaturas para el diseño de prototipos capaces de variar su tensión de salida de 0 a 200V [2], en la amplitud de pulsos oscuros para medir igualmente las variaciones de ganancia [3] y como microcontroladores de lazo cerrado para estabilizar la ganancia y que puedan funcionar en tiempo real y ajustar la tensión de bias [4], [5].

Por lo tanto, teniendo en cuenta todas las propiedades que posee este tipo de fotodetectores se planteó desarrollar la presente investigación enfocada en elaborar un sistema de control automático de temperatura para una plataforma de caracterización de fotomultiplicadores de silicio, el objetivo principal consistió en mejorar la plataforma SiPM a través de un control analógico de temperatura, para el cual se utilizó una metodología experimental, cuantitativa y descriptiva. El estudio se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Antonio Nariño sede

Villavicencio el cual cuenta con laboratorios de detectores (LabDet) en el Centro de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (CICBA).

Para la ejecución inicialmente se explican conceptos relacionados a la temática y se analizan algunas prácticas elaboradas que ayudan a comprender el tema a desarrollar, posteriormente se llevaron a cabo cinco fases en donde se la primera consistió en establecer los parámetros para el rediseño de la estructura de la planta, la segunda fase fue la identificación y modelización de la planta, la tercera el diseño e implementación de la interfaz, la cuarta fase la adaptación del control de temperatura e implementación analógica y la quinta fase que consistió en integrar y probar la interfaz gráfica, la planta y el controlador analógico. Finalmente se plantean los resultados obtenidos, las conclusiones de la investigación y las recomendaciones para futuros proyectos.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

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. Los SiMP son capaces de detectar señales de muy baja intensidad hasta el nivel de un solo fotón [6], [7]. 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 afterpulse (pulsos tardíos), el cross-talk, dark noise y la tensión de Bias [8], [9], [10].

La UAN sede Villavicencio viene ejecutando un proyecto de grado que corresponde al proceso de caracterización de los SiPM con un controlador analógico de temperatura. Los resultados obtenidos del proyecto arrojaron que la estructura de la planta presenta limitaciones con el tiempo de estabilización; pues una sola celda de peltier no es suficiente para adquirir el máximo desempeño, ya que actúa como una bomba de calor termoeléctrica, la cual requiere de un tiempo para su proceso de calefacción.

Debido a esto, el presente trabajo propone una reestructuración a la planta, ya que se deben instalar más de una celda de Peltier en diferentes configuraciones como lo son: 1. Dos celdas con caras iguales; que determinan una mejora en el tiempo de estabilización del sistema. 2. Dos celdas con caras contraria las cuales permiten polarización inversa y así lograr la obtención de temperaturas por encima y por debajo de la temperatura ambiente [11]. Y así garantizar un mejor funcionamiento bajo características específicas; las cuales son: 1. Cuatro actuadores termoeléctricos (celdas de peltier) los cuales permitirían variar la temperatura sobre los fotodetectores. 2. Cuatro sensores ubicados en diferentes puntos de la zona donde están anclados los SiPM para



establecer la temperatura del sistema. 3. Elementos de anclaje tales como: soporte para la celda de peltier con sistema de radiación exterior, soporte para los sensores de temperatura y soporte para los SiPM. 4. Sistema automático de control de temperatura. Se demuestra la necesidad de mejorar el sistema de control automático de temperatura para una plataforma de caracterización de SiPM en el LabDet-Villavicencio.

## 2. JUSTIFICACION

Los SiPM tienen aplicaciones en varios campos científicos. Por ejemplo, tienen aplicación directa en la detección de fluorescencia con propósitos biomédicos como en medicina nuclear, estudios de expresión génica (clave para la creación de fenotipos), estudio de ciclos bioquímicos (ejemplo ciclo del carbón, agua entre otros), etc [12], [13].

Además, los SiPM pueden ayudar a implementar un escáner que combine tomografía por emisión de positrones (Positrón Emission Tomography, PET) y resonancia magnética nuclear (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) gracias a su alta eficiencia cuántica y a su insensibilidad a los campos magnéticos [12], [13].

Sin embargo, dichas aplicaciones necesitan confiabilidad en la respuesta de los SiPM, dado que, si sobre uno de ellos varía la temperatura, su respuesta variaría y comprometería la confiabilidad del sistema que se ve afectada por cualquier cambio. Esta confiabilidad solo se logra conociendo la razón de cambio entre la ganancia y la temperatura.

La presente propuesta requiere el rediseño de la estructura física y la adaptación de un sistema de control de temperatura para una plataforma de caracterización del SiPM, el cual permitiría obtener la relación que describe la razón de cambio entre la ganancia de este dispositivo y la temperatura; al conocer estos parámetros se podrán generar diversas aplicaciones donde la ganancia se pueda mantener constante sin importar la temperatura a la que se encuentre expuesto el SiPM y de esta manera se podrá tener mayor confiabilidad en su respuesta.

La norma NTC 4476 de métodos de ensayo para la inspección y verificación de termómetros dice que este proceso debe ser realizado a 20°C temperatura; por lo tanto, se caracterizarán dispositivos y demás; a

medidas de temperatura ambiente logradas en los laboratorios de la UAN-Villavicencio ya que actualmente no hay ninguna instalación que cumpla con esta característica requeridas de la norma NTC 4476.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1.OBJETIVO GENERAL**

Mejorar la plataforma de caracterización de fotomultiplicadores de silicio con control analógico de temperatura.

#### **3.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Rediseñar la estructura física de la planta del SiPM.
- Identificar y modelizar la nueva planta de caracterización de SiPM bajo los criterios del trabajo previo.
- Diseñar e implementar la interfaz gráfica de usuario para la plataforma de caracterización del SiPM.
- Adaptar el control de temperatura e implementarlo analógicamente
- Integrar y probar la interfaz gráfica, la planta, y el controlador analógico

## **4. MARCO TEORICO**

### **4.1.PRINCIPIOS DE FÍSICA NUCLEAR**

La física nuclear es el campo de la física que estudia el comportamiento de los átomos, sus elementos constituyentes y las interacciones entre estos y otras partículas [14]. Está conformada por los siguientes principios:

#### **4.1.1 Radiación ionizante**

Una radiación ionizante son fotones o partículas de elementos radioactivos que tienen la energía suficiente para ionizar átomos o moléculas. Este proceso ocurre cuando un átomo o molécula libera un electrón y estos antes de perder toda su energía llegan a romper las ligaduras de los átomos o moléculas en millones de veces [15].

#### **4.1.2 Radiactividad**

Es la característica que presentan algunos nucleídos de desintegrarse de forma espontánea, es decir es la cantidad de veces que una sustancia se desintegra por unidad de tiempo, su unidad de medida es el becquerelio (Bq) [14].

#### **4.1.3 Radioactividad $\alpha$**

La radioactividad  $\alpha$  consiste en una emisión que tiende a llevar al nucleido a la estabilidad, es característica de elementos con números atómicos altos y está conformada por dos protones y dos neutrones [16].

#### **4.1.4 Radiactividad $\beta$**

La radioactividad  $\beta$  consiste en una transformación dentro del núcleo, la cual puede ser de dos formas positiva o negativa. La  $\beta$  (-) es cuando un neutrón se transforma en un protón creándose simultáneamente un electrón y un antineutrino<sup>2</sup>, para seguidamente ocurrir la expulsión del núcleo. La  $\beta$  (+) es el caso contrario abarca la transformación de un protón a un neutrón, pero con la creación de un electrón positivo y un neutrino<sup>2</sup> [16].

#### **4.1.5 Radioactividad $\gamma$**

La radioactividad  $\gamma$  es la emisión a través del núcleo de una radiación electromagnética o fotón [16].

#### **4.1.6 Fotón**

El fotón es una partícula indivisible que cuantifica la luz y su comportamiento corpuscular se mueve siempre a la velocidad de la luz y es la partícula que más radiación electromagnética aporta [17], [18].

### **4.2 FOTOMULTIPLICADOR DE SILICIO (SiPM)**

Los fotomultiplicadores de silicio, por su siglas en inglés (Silicon Photomultipliers, SiPM) también conocidos como fotodiodos de avalancha en modo Geiger (Geiger-mode Avalanche Photo-Diodes, GAPDs), son una nueva generación de fotoprotectores que tiene una elevada sensibilidad. Se caracteriza por ser un dispositivo matricial en el cual cada celda está compuesta por un fotoprotector de avalancha que trabaja en modo Geiger y que incorpora un resistor de colapso de avalancha [19]. Es decir, al contener microceldas formadas cada una por uniones de silicio P-N, los electrones emigran hacia el lado P y los huecos

van hacia el lado, creando una región la cual se le conoce como “región de deflexión” en donde los electrones y huecos se eliminan a través de la recombinación [20].

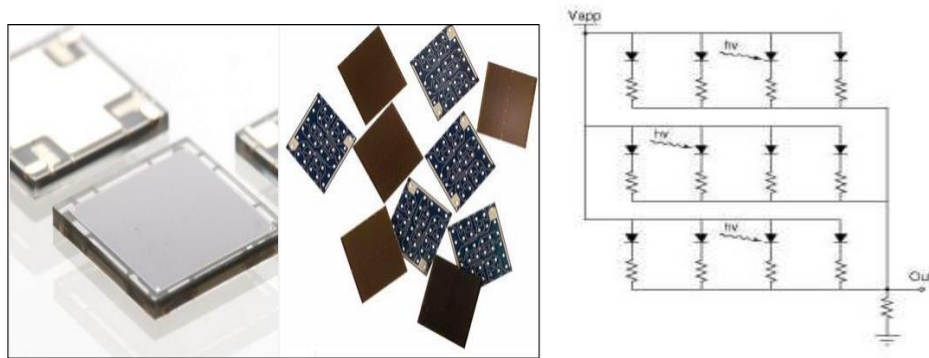


Figura 1. Fotomultiplicadores de silicio (SiPM) [20].

Esto indica que al estar todas las celdas unidas por medio de un mallado metalico la fotocorriente total es directamente proporcional al numero de fotones incidentes (numero de celdas disparadas). Por lo tanto, la respuesta normal del SiPM ante un pulso de luz incidente es un flanco de subida muy rapido y continuamente una caida lenta. Siendo la amplitud del pico proporcional a la intensidad del pulso optico de excitación, lo que permite junto con la alta sensibilidad de este dispositivo contar el numero de fotones que alcanza el fotodetector [19].

Generalmente la matriz de un SiPM esta constituida por  $1 \times 1$  y  $5 \times 5$   $mm^2$  y del orden de 1000 micro celdas independientes (píxeles) por cada  $mm^2$  conectadas en paralelo [6]. El SiPM requiere para su correcto funcionamiento que se tengan en cuenta sus propiedades de funcionamiento, tales como la tensión de ruptura (breakdown voltage), el afterpulse (pulsos tardíos), el cross-talk óptico, dark noise y la tensión de Bias (Bias voltage) [9], [10]. Sin embargo, la propiedad más importante

es su ganancia, la cual tiene afectación directa por variación de temperatura, dado que al variar la temperatura varia la tensión de ruptura generando cambios directos sobre la ganancia debido al cambio de Ecuación 1:

$$G = Q q = C \Delta V q = C(VBIAS - VBD) q \text{ Ecuación 1}$$

Donde:  $VBD$ : Tensión de ruptura,  $VBIAS$ : Tensión Bias,  $C$ : Capacitancia del SiPM, y  $q$ : Carga el fotoelectrón primario.

### **4.3. CARACTERISTICAS IMPORTANTES DE LOS SIPM**

Entre las características más importantes de los fotomultiplicadores de silicio se encuentran las siguientes:

#### **4.3.1. Factor de relleno (Fill factor)**

Es aquel que se relaciona con el área sensible del dispositivo y el área total del mismo. De acuerdo con la estructura de los SiPM las celdas tienen que estar separadas una de otras para poder llevar a cabo el aislamiento óptico y eléctrico. Así mismo, debe estipularse parte del área a la resistencia que está en serie con el APD y a las pistas de señal, para que de esta manera la superficie no sea sensible y se reduzca el factor de relleno [21].

#### **4.3.2. Eficiencia en la detección de fotones (PDE)**

Es aquella que como su nombre lo indica tiene la capacidad de detectar eficientemente los fotones y se determina a través de la ecuación 2:

$$PDE(\lambda, V) = \eta(\lambda) \times \varepsilon(V) \times F \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $\eta(\lambda)$  = eficiencia cuántica del silicio



$\epsilon(V)$  = probabilidad de iniciación de avalancha por encima de la tensión de ruptura

F= factor de llenado (factor geométrico del dispositivo) contempla la fracción del área activa respecto al área total

#### **4.3.3. Ancho de banda**

Es aquel que activa cada microcélula en un tiempo de descarga y recuperación de 100ns con una velocidad de conteo de 10MHz y cual va a depender del nivel de la señal incidente [16].

#### **4.3.4. Rango dinámico**

El nivel de señal óptica incidente el cual proporciona al detector una buena salida. Sin embargo, una de sus limitaciones es el número total de microcélulas, ya que cada microcélula tiene la capacidad de detectar un único fotón, por ende el número máximo de fotones que se puedan detectar dependerán del número de microcélulas presentes [16].

#### **4.3.5. Ganancia**

Es la relación de la carga de salida por evento de ruptura, es decir es la carga que se produce en una sola avalancha Geiger por cada fotón detectado y se expresa en unidades de carga de electrones [16]. Cada celda proporciona una cantidad uniforme y cuantificada por cada avalancha que se genera por absorción de un fotón [21]. Se calcula mediante la siguiente ecuación 3:

$$M = \frac{C_j \times \Delta V}{q} \quad \text{Ecuación 3}$$

#### 4.3.6. Relacion señal a ruido

En la relacion señal a ruido se debe tener en cuenta el tiempo durante el cual se captura o muestrea, ya que cada pulso de ruido equivale a la señal de un fotón y se origina aleatoriamente con una frecuencia de 1 MHz/mm<sup>2</sup>. De esta manera, una rafaga de fotones emitidos instataneamente tendra una relacion señal a ruido mucho mayor que el mismo numero de fotones adquiridos durante un largo periodo de tiempo [16].

#### 4.3.7. Cuentas oscuras (Dark counts)

Son pulsos que se originan de manera espontánea en carencia de luz, son el producto de la generación térmica de portadores indistinguibles de los disparos resultantes de la absorción de un fotón y depende de factores como la temperatura, sobretensión, tamaño del píxel y calidad del material semiconductor [21].

#### 4.3.8. Crosstalk

Son fotones secundarios que se detectan por otras celdas del SiPM y provocan su disparo. Por lo general esta avalancha secundaria se da de manera sincrónica en el tiempo con la avalancha primaria, originando una señal resultante del apilamiento de las señales individuales de cada celda [21] . Se calcula mediante la ecuación 4:

$$P_{Crosstalk} = \frac{N_{1,5 PE}}{N_{0,5 PE}} \quad \text{Ecuación 4}$$

#### **4.3.9. Afterpulsing**

Se conocen como afterpulsing el proceso en donde quedan atrapados portadores durante la avalancha que después de un determinado tiempo se liberan, ocasionando un pulso de menor amplitud [21].

#### **4.4. VENTAJAS DE LOS FOTOMULTIPLICADORES DE SILICIO**

La utilización de esta nueva generación de fotodetectores ofrece grandes ventajas en comparación con otros dispositivos tradicionales, entre estas Yebras, (2013) destaca las siguientes:

- Proporciona una alta ganancia y elevada velocidad de respuesta
- Tiene la capacidad de proveer bajos niveles de consumo y de voltaje de polarización.
- Facilita su utilización al tener un tamaño pequeño
- Se caracteriza por su robustez
- Proporciona inmunidad frente a campos magnéticos
- Es un dispositivo que su producción es de bajo costo
- Sus características de alta frecuencia y ultra baja intensidad luminosa los convierten en dispositivos ideales para aplicaciones de fotoprotección

#### **4.5. DESVENTAJAS DE LOS FOTOMULTIPLICADORES DE SILICIO**

Sin embargo, su aplicación también genera desventajas las cuales según Yebras, (2013) asocian a:

- Lenta caída de la señal de fotodetección aun cuando se manejan pulsos de excitación cortos.
- Limitado rango dinámico

- Fuerte influencia de los darkcounts
- Fuerte dependencia de sus parametros con la temperatura.

#### 4.6. FOTOMULTIPLICADORES ANALÓGICOS DE SILICIO

Cuando un fotodiodo opera en modo Geiger, esto significa que funciona por encima de la tensión de ruptura y con un preceptivo circuito de quenching sea pasivo o activo se le denomina SPAD. La suma de las salidas analógicas de los SPAD constituyentes de los fotomultiplicadores de silicio originan una corriente macroscópica, proporcional al número de los mismos que se han disparado y proporcional al número de fotones que inciden. La elección del número de SPAD está relacionada al número de fotones que se espera medir, ya que la corriente de salida tiene una relación lineal con el número de fotones detectados cuando estos tienen menos sensibilidad que el número de celdas. En conclusión, un fotomultiplicador analógico está formado de múltiples SPAD con resistencia quenching ( $R_q$ ) y alimentado inversamente a un voltaje  $V_{BIAS}$ , en donde el pulso de corriente de salida se convierte en pulso de voltaje mediante la resistencia se Shunt ( $R_s$ ) [22]. Esta relación se describe en la siguiente ecuación 5.

$$Ganancia = \frac{N_{celdas}}{N_{total}} = \left( 1 - e^{-\frac{PDE * N_{fotones}}{N_{total}}} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

#### 4.7. CONTROL PROPORCIONAL (PI)

El control PI es un controlador realimentado que tiene como función hacer que el error en estado estacionario  $e(t)$ , entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta  $\gamma(t)$ , sea cero. Un PI está formado de dos partes, las cuales producen su propia acción de control que sumando todas las respuestas de las partes del controlador se alcanza a tener diversos efectos en la respuesta de la planta [23].

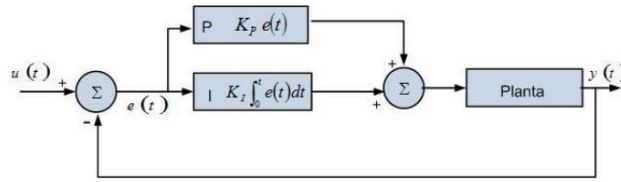


Figura 2. Diagrama de un controlador PI. [23]

En la parte proporcional la magnitud de la salida del controlador es equivalente al tamaño del error y la relación lineal entre la salida del controlador y el error se presenta solo dentro de ciertos intervalos de errores a los cuales se les llama banda proporcional [23].

El controlador PI, está basado en la siguiente ecuación 6, que se expresa a continuación [24].

$$e(t) = p_{sp}(t) - p_D(t) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\Delta Q_D = Q_D(t) - Q_D(t - 1) = K_p(e(t) - e(t - 1)) + K_i e(t); K_i = \frac{K_p}{T_i} \Delta t$$

Ecuación 7.

En donde  $K_i$  abarca el tiempo de muestreo, la constante proporcional y el tiempo integrativo, dando como resultado la siguiente ecuación 8, para el flujo de descarga [24].

$$Q_D(t) = Q_D(t - 1) + K_p(e(t) - e(t - 1)) + K_i e(t) \quad \text{Ecuación 8.}$$

Sin embargo, existen diversas estructuras definidas para controladores PI, las cuales pueden ser [20].

a) Controlador ideal: que se basa en la siguiente ecuación 9.

$$G_C(S) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i S}\right) \quad \text{Ecuación 9.}$$

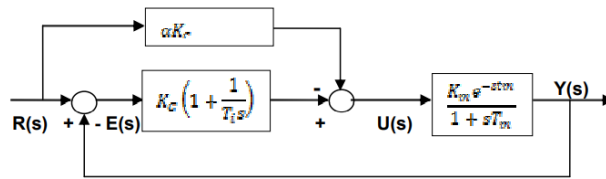
- b) Controlador ideal en serie con filtro de 1º orden que se representa en la ecuación 10.

$$G_C(S) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \left(1 + \frac{1}{T_f s}\right) \quad \text{Ecuación 10.}$$

- c) Controlador ideal en serie con filtro de 2º orden.

$$G_C(S) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \left(\frac{1+0,5T_m s+0,0833T_m^2 s^2}{1+0,1T_m s}\right) \quad \text{Ecuación 11.}$$

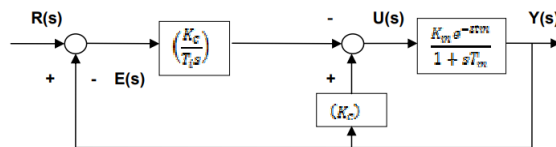
- d) Controlador con ponderación en la referencia que se representan en el diagrama



Y tiene la siguiente ecuación  $U(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) E(s) - \alpha K_C R(s)$

Ecuación 12.

- e) Controlador con termino proporcional actuando en la salida, como se muestra en el siguiente diagrama



Y se representa con la siguiente ecuación  $U(s) = K_C Y(s) - \frac{K_C}{T_i s} E(s)$

Ecuación 13.

#### 4.8. SENSOR DE TEMPERATURA LM335

El dispositivo LM335 es un sensor de temperatura que tiene una precisión calibrada de 1°C con un rango de -40°C a +100°C y puede tener diversos

encapsulados pero el más empleado y conocido es el TO-92 [26]. Es un sensor que se ejecuta como un diodo Zener y tiene un voltaje de rompimiento directamente proporcional a la temperatura que varia su voltaje en 10mV por cada grado centígrado de temperatura y alcanza a generar corrientes de 4.000 $\mu$ A a 5 mA [27].

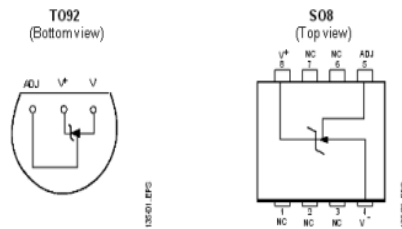


Figura 3. Sensor LM335 [23].

Este dispositivo tiene diferentes encapsulados pero el más empleado es el TO-92 el cual está formado por 3 patas, dos que cumple la función de alimentarlo y la tercera que se encarga de entregar el valor de tensión proporcional a la temperatura medida por el dispositivo [26].

#### 4.9. CONTROLADOR HTC 1500

El controlador HTC 1500 se caracteriza por ser un sensor de temperatura que emplea HTC y una fuente de corriente de polarización del sensor incorporada que simplifica el uso con sensores de temperatura resistivos [29].

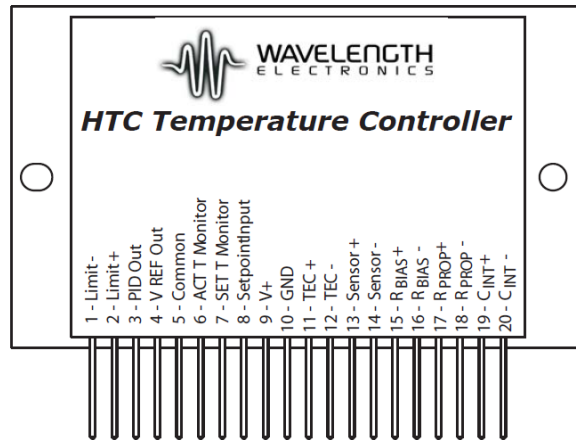


Figura 4. HTC 1500 Control de temperatura

Fuente: Base de datos de la investigación

Es un sensor que ofrece una gran flexibilidad, tiene una estabilidad de la temperatura de  $0.001^{\circ}\text{C}$ , una sola resistencia determina la corriente de salida máxima para cargar, un voltaje de referencia a bordo simplifica el control del potenciómetro del punto de ajuste de temperatura, permite operar de forma remota con un voltaje de consigna externo. Es un controlador que entre sus especificaciones cuenta con una precisión de  $<0.2\%$ , con un rango de ganancia proporcional de 1 a 100, con un rango constante de tiempo del integrador de 0 a 10 segundos, voltaje de alimentación de +5V a +12V, son paquetes pequeños y de bajo perfil ideales para diseños con limitación de espacio [29], [30].



## **5. DISEÑO METODOLOGICO**

### **5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La presente investigación es de enfoque cuantitativo debido a que es un estudio donde se recogen y analizan datos para determinar la fuerza de la correlación entre variables, la generalización y objetivación de los resultados [31]. Se aplica dentro de este estudio de los datos que se recolecten del montaje y las pruebas que se obtengan de la plataforma de caracterización de SiPM en el laboratorio.

Así mismo es de tipo descriptiva porque mide la presencia, características o distribución de un fenómeno en una población en un momento concreto, sobre todo, limitándose a describir uno o varios fenómenos sin intención de establecer relaciones causales con otros factores [32]. En esta investigación se asocia con la descripción de cada uno de los procedimientos que se lleven a cabo para el montaje de la plataforma de caracterización SiPM.

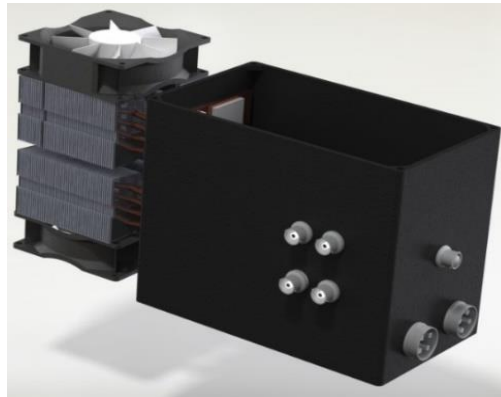
De igual manera, es una investigación experimental porque altera una o varias variables al mismo tiempo en un ambiente estrictamente vigilado en donde el investigador evalúa la forma y razón por la que sucede el fenómeno en particular [33].

### **5.2. MÉTODO**

El proyecto desarrollado consistió en la construcción de una planta de caracterización de SiPM con control de temperatura. Para lo cual se llevaron a cabo las siguientes fases:

### 5.2.1 Fase I. Rediseño de la estructura física de la planta del SiPM

Se realizó a partir de la planta actual, donde se construyó una nueva con un tamaño de 25cm de largo, 20cm de alto y 15cm ancho, con un sistema de enfriamiento/calefacción que contuvo, por lo menos, 4 celdas de peltier, un ventilador, un disipador, un sistema de aislamiento térmico y se utilizó para su construcción lámina galvanizada por ser un material óptimo que facilita el doblado y tiene una mayor resistencia a la soldadura (Ver figura 5). Posteriormente se abrieron 13 huecos de conexión, debido a que la planta contara con dispositivos electrónicos que funcionaran en su interior y por ende estos, deben estar excluidos de cualquier incidencia de luz externa, por tal motivo se disponen diferentes conectores para asegurar la conexión con estos dispositivos y el aislamiento del exterior. Seguidamente se fijó por medio de soldadura en la parte externa de la planta la base en donde estarán instalados los disipadores, se ubicó en esa posición con el fin de crear una planta versátil que permitiera ser desarmada con facilidad para poder cambiar cualquier componente, finalmente en la parte interna se dispusieron de dos láminas de cobre sujetas por cuatros tornillos de cabeza lenticular que cumplían la función de aislar la luz



del exterior.

Figura 5. Estructura física de la planta  
Fuente: Base de datos de la investigación

### **5.2.1. Fase II. Identificación y modelización de la nueva planta de caracterización de SiPM**

La modelización se llevó a cabo en el programa MATLAB, por medio de la app Analog Input Recorder en donde se realizó la digitalización de los datos obtenidos por los sensores de temperatura LM35 en tiempo real. Esta app como se observa en la figura 6, permite ingresar en el apartado 1 el número de muestras por segundo, en el apartado 2 ajustar la duración en segundos de la toma de datos y los apartados 3,4 y 5 son para incluir otros tipos de informaciones pertinentes para la investigación. Se empleo la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments USB-6215 la cual cuenta con 16 entradas analógicas y digitales, esta tarjeta cuenta una tasa de muestreo de 250k muestras por segundo. De esta manera durante 2100s se tomaron datos para poder analizar todo el comportamiento de la planta.

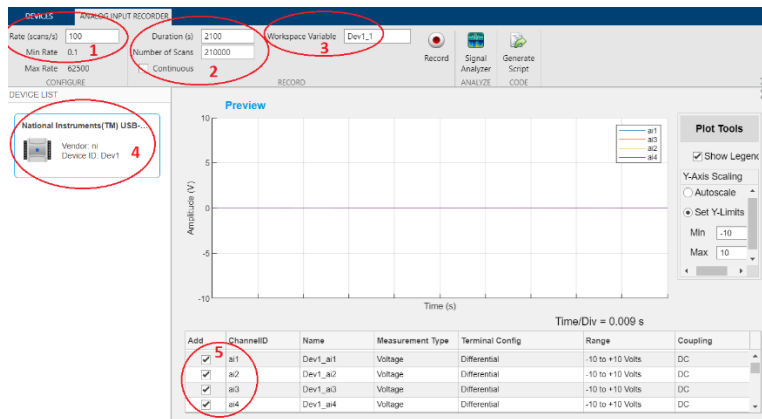


Figura 6. Adquisición de datos en el programa MATLAB

Fuente: Base de datos de la investigación

Posteriormente antes de llevar a cabo la identificación, se ejecutó un código en donde se prepararon los datos en función de los requerimientos del INDET, para ello se realizaron matrices de nombre INT para la entrada de los datos y OUT para la salida, donde en dicha matriz se almacenaron las respuestas al escalón del promedio de todas las señales recibidas por los sensores. De igual manera, se utilizó la herramienta System Identification Toolbox™ (ident) de Matlab, el cual tiene como función la identificación de sistemas por medio de análisis de datos entregados por una entrada, salida y un tiempo de muestreo.

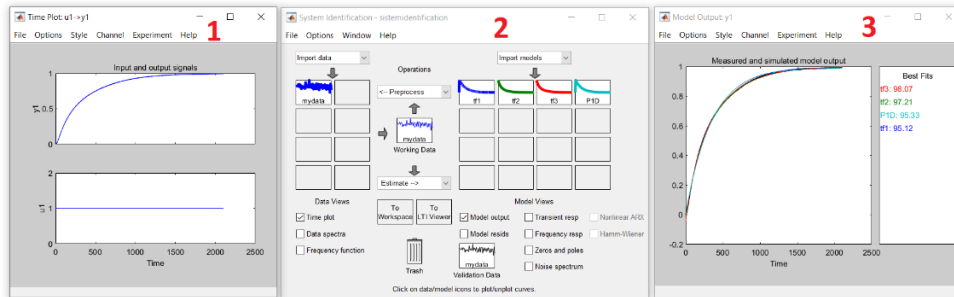


Figura 7. Adquisición de datos en Systemn Identification Toolbox

Fuente: Base de datos de la investigación

En la figura 7, se presenta la adquisición de datos en el programa System Identification Toolbox™ (ident) de Matlab, en donde se logra observar que el apartado 1 corresponde a los datos de la entrada y salida normalizada del sistema, con un tiempo de muestreo ( $t_s$ ) previamente establecido por la tarjeta de adquisición de datos nationals instruments. En el apartado 2 se abarca el proceso que se ejecutó para agregar cada señal ident y la verificación de las distintas estimaciones a respuestas de funciones de transferencia de la planta y por último el apartado 3 correspondió a determinar el nivel de precisión arrojando como resultado la señal tf3 un nivel de efectividad del 98,07%

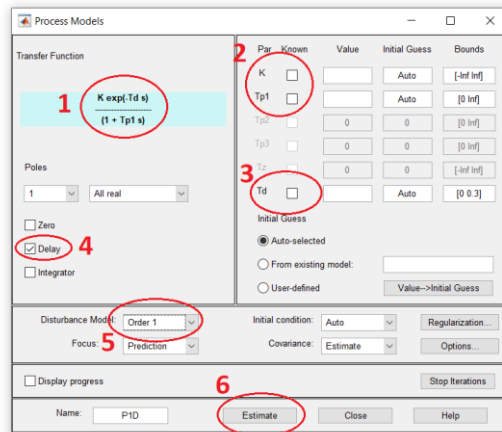


Figura 8. Adquisición de datos en la interfaz ident  
Fuente: Base de datos de la investigación

Para la verificación de la función de transferencia, se observa en la figura 8 que se ejecutó por la interfaz ident en donde en el apartado 1 se plantea la fórmula para la función de transferencia, en el apartado se ingresan los datos de los valores K (Constante Proporcional), Tp1 (Constante de Tiempo), en el apartado 3 los valores de Td (Constante de Retardo), en los apartados 4 y 5 se definen las características y finalmente se da clic en el botón estimate para finalmente obtener la función de transferencia de nuestro sistema.

### 5.2.2. Fase III. Diseño e implementación de la interfaz grafica de usuario para la plataforma de caracterización del SiPM

La interfaz gráfica fue implementada en Matlab debido a que la UAN-Villavicencio cuenta con licencias para este software de prototipado, la monitorización de los datos se realizó a través de este programa por medio de una interfaz de usuario que permitía una fácil interacción con el programa y la obtención de los botones, gráficos y cuadros de texto. En la figura 9, se presentan los pasos para el desarrollo de la interfaz

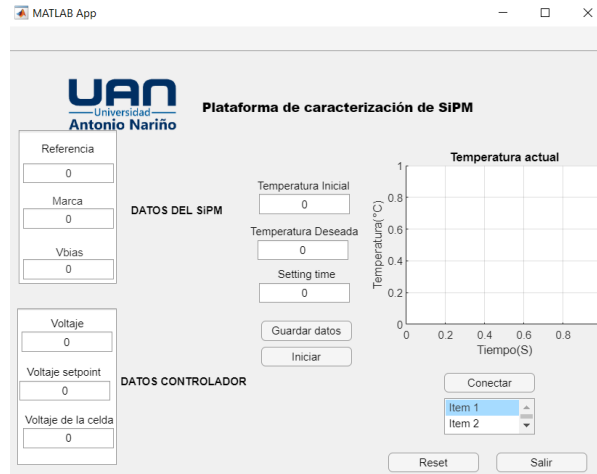


Figura 9. Adquisición de datos para el desarrollo de la interfaz

Fuente: base de datos de la investigación

### 5.2.3. Adaptación del control de temperatura e implementación analógica

Para ejecutar esta fase se utilizó la herramienta control system designer (SISOTOOL), la cual es una app de Matlab que permite hacer cualquier tipo de control automático que el usuario solicite. Para esta investigación se requiere un sistema de control PI ya que con los controladores analógicos HTC 1500 tienen una respuesta efectiva frente a este tipo de sistema, para lo cual se cargaron los datos que se obtuvieron en la adquisición del diseño de identificación de la planta, el resultado obtenido se acondiciono a través de un código de Matlab el cual permitió exportar una variable G que contiene toda la información de modelo matemático de la planta este proceso de exportación se observa en la figura 10.

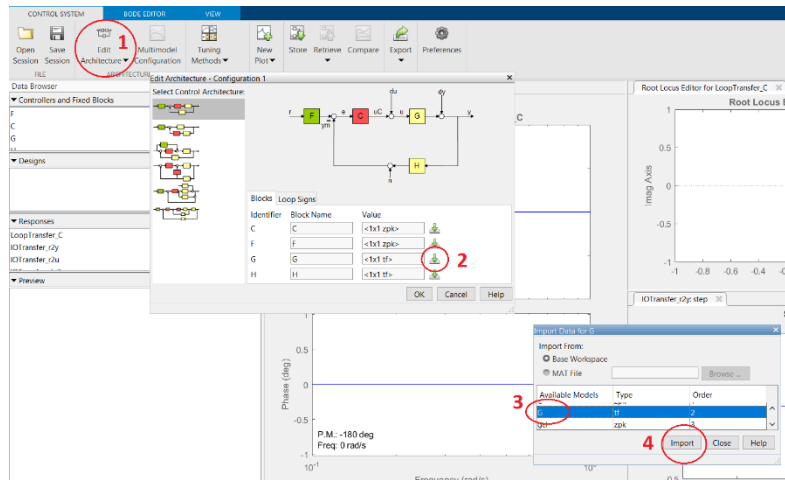


Figura 10. Adquisición de datos en control system designer

Fuente: base de datos de la investigación

Después de cargar todos los datos, se inicia con el proceso de diseño del control PI, el cual involucra directamente la respuesta al escalón, sin embargo, estos requerimientos no modifican el sistema ni el control, solo se encargan de resaltar la zona a la cual se plantea llegar. Esto se observa en la figura 11, en donde se establecen los parámetros que se deben acondicionar y los requerimientos que se deben tener en cuenta como el overshoot, rise time y settling time.



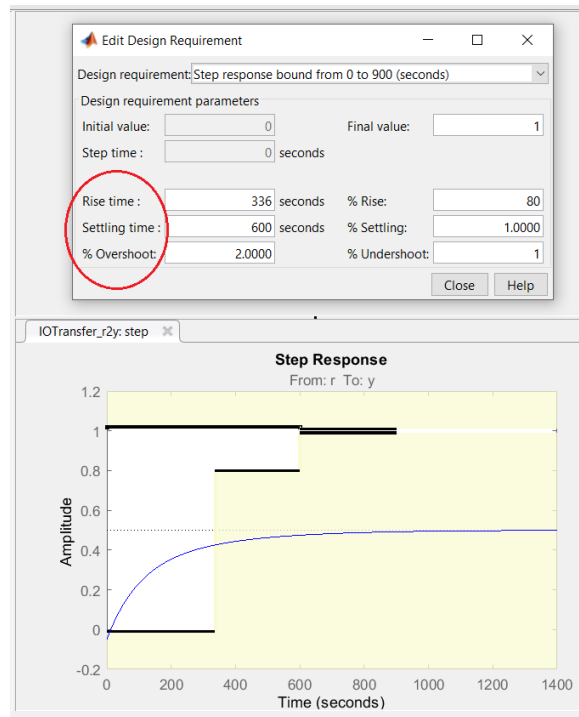


Figura 11. Adquisición de datos para el diseño del control PI

Fuente: base de datos de la investigación

Finalmente, después de tener cada uno de los parámetros acondicionados se diseña el control automático agregando al sistema la cantidad necesaria de polos y ceros, de acuerdo con los criterios definidos para el diseño basado en un control PI, tal como se observa en la figura 12.

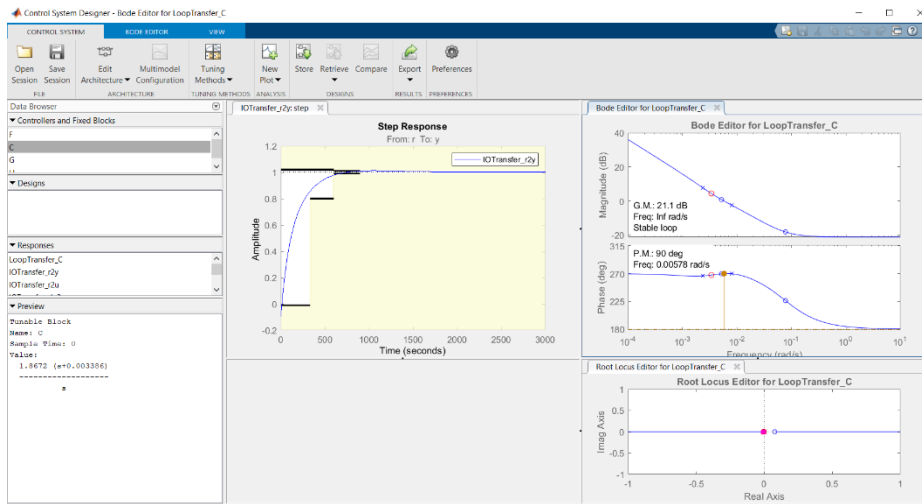


Figura 12. Adquisición de datos para el diseño del control Pi automático

Fuente: base de datos de la investigación

### 5.2.4. Integrar y probar la interfaz gráfica, la planta y el controlador analógico

En la figura 13, se muestra la interfaz obtenida para la plataforma.

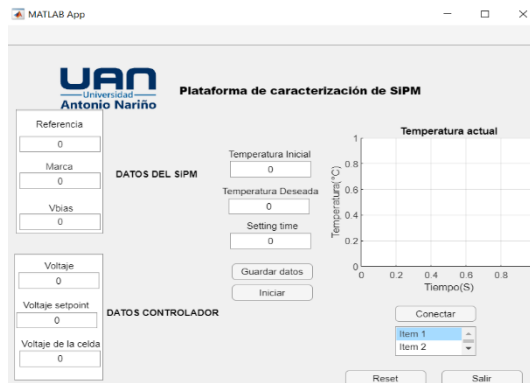


Figura 13. Interfaz obtenida para la plataforma

Fuente: base de datos de la investigación

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS

En el desarrollo de esta investigación se obtuvieron de las practicas experimentales los siguientes resultados.

### 5.1 MODELIZACION DE LA NUEVA PLANTA DE CARACTERIZACION DE SiPM

Para la modelización se instalaron físicamente celdas de perltier en dos grupos. En el primer grupo de instalaron dos celdas con caras calientes hacia la dirección del SiPM y en el segundo se colocaron dos celdas con la cara fría en dirección al SiPM como se observa en la figura 14. En lo relacionado a los sensores, igualmente se trabajaron en dos grupos obteniendo de esta manera una mejor respuesta para todo el sistema, en donde se contemplaron los sensores S4 y S2 para la adquisición de datos cuando la planta se encuentra en proceso de calentamiento y se implementaron los sensores S3 y S1 para el proceso de enfriamiento de la planta.

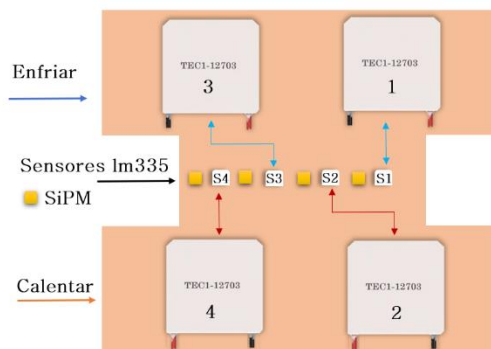


Figura 14. Modelización de los SiPM en la planta

Fuente: base de datos de la investigación

### 5.1.1 Caracterización de los sensores LM335

EL LM335 es un sensor de alta precisión de temperatura el cual se puede calibrar fácilmente, la salida del, LM335 es proporcional a la temperatura absoluta con la salida extrapolada del sensor yendo a 0V a 0 ° K (-273.15 ° C). Para la calibración de estos sensores se hizo uso de un circuito de ajuste que establece el manual del fabricante.

La salida del circuito (calibrada o no) viene dada por la ecuación 14:

$$V_{OT} + VO_{TO} \times \frac{T}{T_0} \quad \text{Ecuación 14.}$$

Donde T es la temperatura desconocida y To es la temperatura de referencia (en °K). Nominalmente, la salida está calibrada a 10mV /°K.

En la figura 15, se observa el circuito que el fabricante propone para la calibración de dicho sensor este proceso se llevó a cabo con los 4 sensores que dispone la planta.

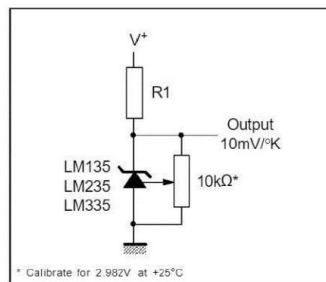


Figura 15. Circuito propuesto por el fabricante

Fuente: base de datos de la investigación

### 5.1.2 Modelo matemático de la planta

El análisis de los datos obtenidos por los sensores LM335 se trabajó a través del programa MatLab, donde mediante un código se hace una representación visual tipo grafica de las curvas a diferentes entradas de la estabilización de la temperatura para una variación de voltaje. Esto con el fin obtener una respuesta promedio de todas estas gráficas y así poder normalizar para encontrar la respuesta del comportamiento del sistema. Dicho proceso se representa en la figura 16, donde se aprecia la estabilización de la temperatura frente a 6 variaciones de voltaje

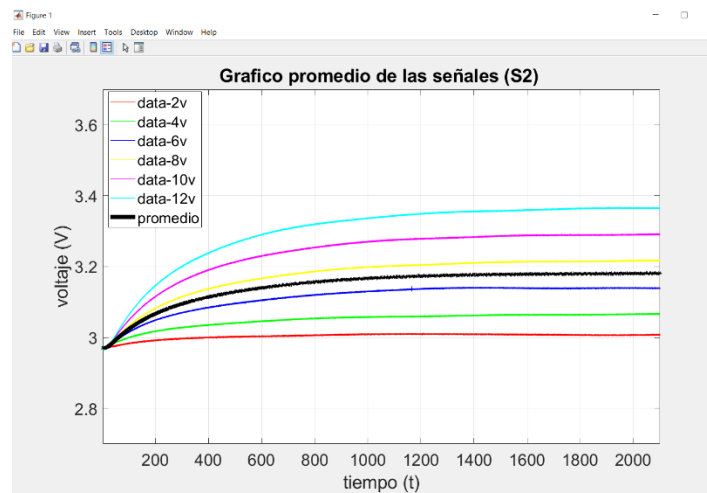


Figura 16. Modelamiento matemático de la planta

Fuente: base de datos de la investigación

Tabla 1. Datos de estabilización de la temperatura de la celda peltier sometida a variación de tensión

Temperatura inicial	Rate (scans/s)	Tiempo de datos	Temperatura de estabilización	Voltaje de la celda	Nombre de la variable
24°C	100	2100 s	29.2°C	2v	Dev1_2
24°C	100	2100 s	36.8°C	4V	Dev1_4
24°C	100	2100 s	46.6°C	6V	Dev1_6
24°C	100	2100 s	56.3°C	8V	Dev1_8
24°C	100	2100 s	66.4°C	10V	Dev1_10
24°C	100	2100 s	77.1°C	12V	Dev1_15

Fuente: base de datos de la investigación

En la tabla 1, se presentan los datos de estabilización de la temperatura cuando la celda de peltier es sometida a una variación de tención en su terminales, con el fin de hacer una estimación del tiempo de estabilización del sistema. Para la obtención del modelo matemático de la planta se adoptó como única grafica la representación de la respuesta al promedio de todas las gráficas, tal como se muestra en la figura 17.

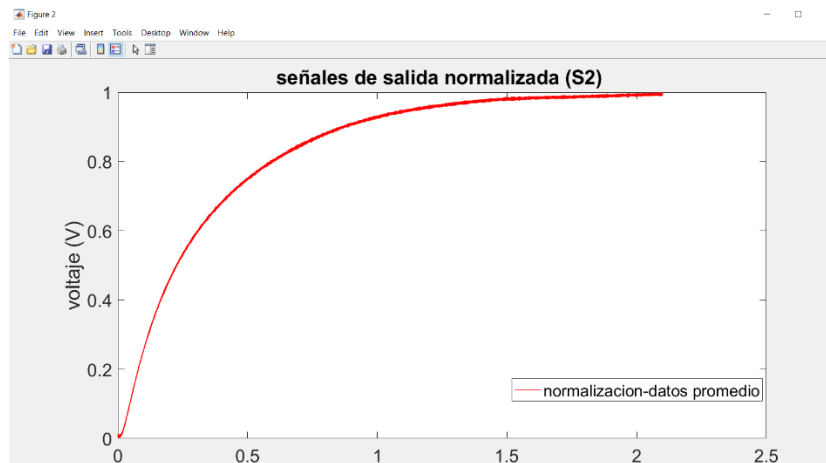


Figura 17. Representación de la respuesta para el modelo matemático

Fuente: base de datos de la investigación.

El resultado que se obtuvo de la planta fue una respuesta transitoria para el modelo de primer orden con retardo, por lo tanto, se puede utilizar el siguiente modelo matemático, representado en la ecuación 15

$$G(s) = \left[ \frac{K (e^{-L \times s})}{1 + T \times s} \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

En el cual K simboliza la ganancia; T= la constante de tiempo y L=el tiempo de retardo. Del mismo modo se desarrolló el modelo matemático de la planta obteniendo la siguiente grafica representativa de la respuesta al escalón del sistema dinámico, el cual se representa en la figura (b)

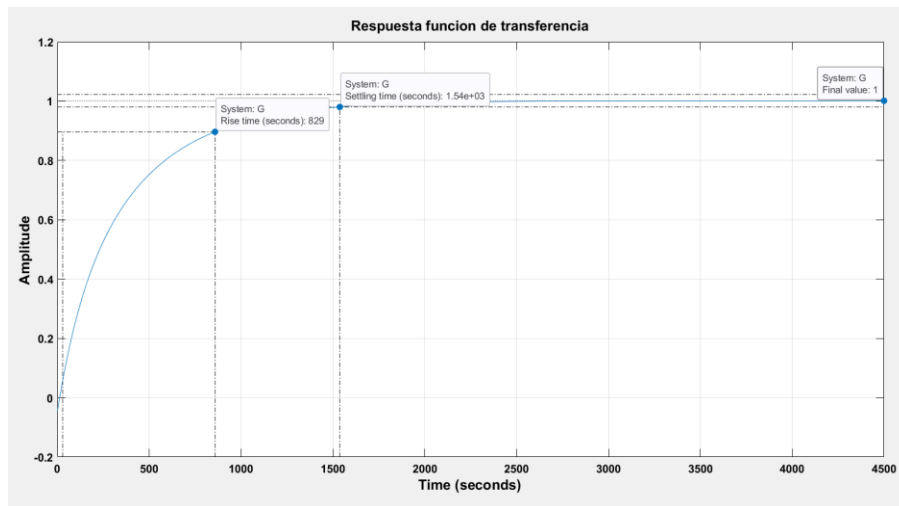


Figura 18. Respuesta función de transferencia

Fuente: base de datos de la investigación.

### 5.3. RESPUESTA DEL CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMATICO

Para analizar la respuesta del control de temperatura se realizó una representación gráfica de la mejora significativa obtenida por la implementación del controlador PI que se le aplico a la planta tal como se muestra en la figura 19. En donde se observa que se pasó de tener

un tiempo de estabilización de 1540 segundos equivalente a 25.67 minutos a un tiempo de estabilización de 601 segundos equivalente a 10 minutos, presentando el sistema un pequeño sobrepaso del 1.01%.

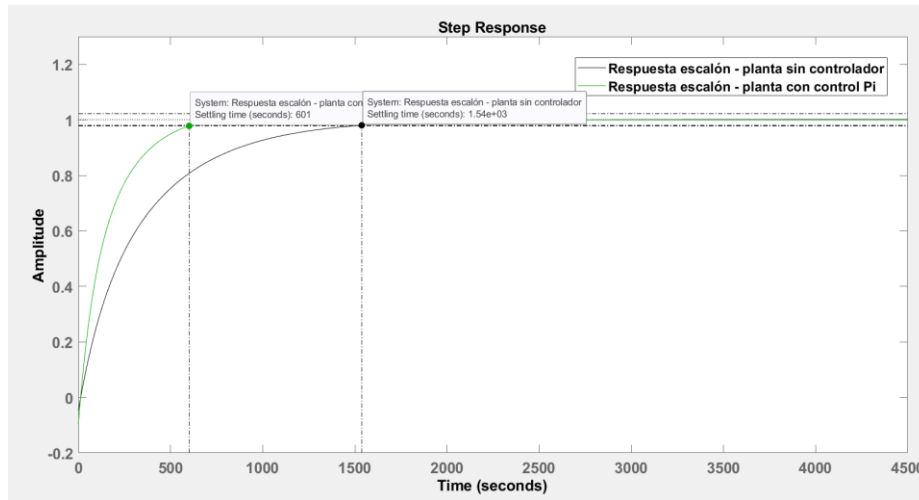


Figura 19. Respuesta del control de temperatura automático

Fuente: base de datos de la investigación.

Posteriormente, una vez verificada la estabilidad en lazo cerrado al que responde el sistema, se determina el modelo matemático que describe el comportamiento del controlador PI, el cual está dado por la ecuación 15.

$$\frac{kp\left(s+\frac{1}{\tau_i}\right)}{s} \quad \text{Ecuación 15.}$$

En donde:

$K_p$ =ganancia,  $k_p= 1.8672$

$$\frac{1}{\tau_i} = 0.003386 \quad ; \quad \tau_i = (0.003386)^{-1} \quad ; \quad \tau_i = 295.3$$



### 5.3.1. Acondicionamiento del driver de temperatura htc1500

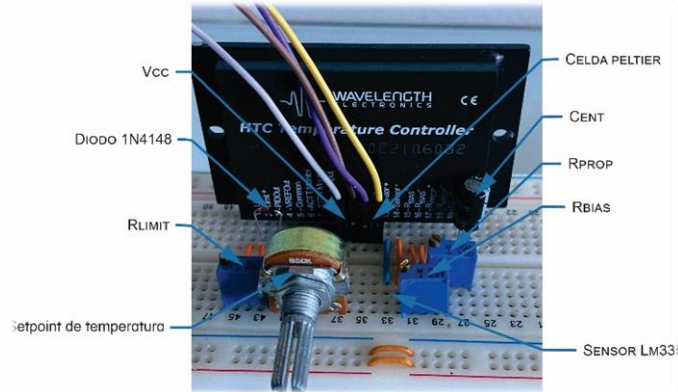


Figura 20. HTC 1500 temperature controller

Fuente: base de datos de la investigación.

La selección del controlador HTC 1500 de temperatura se basó en los resultados observados en un proyecto que se llevo a cabo en la universidad en donde implementaron el mismo sensor bajo iguales condiciones como controlador para la temperatura de un sistema. Se eligió este driver ya que cuenta con una alta precisión, estabilidad y versatilidad, características muy importantes para el desarrollo de este proyecto. Así mismo, es un controlador que tiene la capacidad de configurarse fácilmente para cualquier diseño e implementarse con cualquier sensor de temperatura. Sin embargo, el fabricante recomienda una serie de parámetros que se analizan a continuación:

#### 5.3.1.1. Corriente de polarización de salida

Basado en el datasheet del htc1500 el fabricante recomienda la instalación de un diodo de alta velocidad 1N4148 entre los pines 2 y 3, como se muestra en la figura 21. Así mismo para el funcionamiento

correcto se debe analizar el tipo de sensor con el cual se está manejando el proyecto, en este caso el lm335 es un sensor IC de coeficiente de temperatura positivo (PTC), lo que quiere decir que la resistencia del sensor aumenta al incrementar la temperatura.

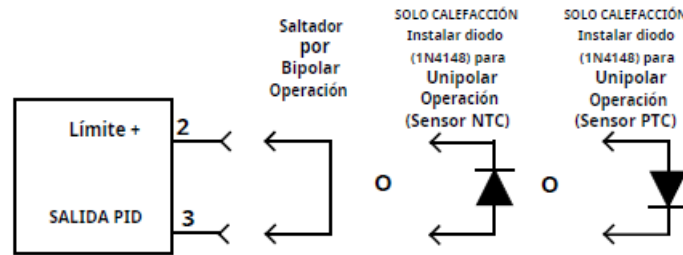


Figura 21. Instalación de diodo de alta velocidad en los pines 2 y 3

Fuente: base de datos de la investigación.

### 5.3.1.2. Límite de corriente de salida

en este apartado se establecieron los límites de corriente tanto de calefacción como de refrigeración por medio de una resistencia entre los pines 1 y 2, la cual viene dada por la siguiente ecuación 16.

$$R_{LIMITE} = \frac{7.864 \times I_{LIMITE}}{1.8864 - 1.1796 \times I_{LIMITE}} \text{ Ecuación 16.}$$

Para una corriente límite de 1.5 amperios se obtuvo lo siguiente

$$R_{LIMITE} = \frac{7.864 \times 1.5A}{1.8864 - 1.1796 \times 1.5A}$$

$$R_{LIMITE} = 1.1 K\Omega$$

En la figura 1, se representa la instalación de una resistencia  $R_{LIMITE}$

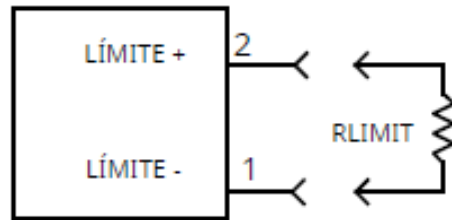


Figura 22. Instalación de una resistencia  $R_{LÍMITE}$

Fuente: base de datos de la investigación.

### 5.3.1.3. Corriente de polarización sensor

Siguiendo los criterios de diseño del fabricante para la corriente de polarización del sensor, se debe ajustar una resistencia  $R_{bias}$  la cual está dada por la ecuación 17. Basados en esta información para el lm335 la corriente recomendada es de 1mA como se observa en la siguiente tabla, dicha resistencia debe configurarse entre los pines 15 y 16 como se observa en la figura 22.

Tabla 2. Corriente de polarización

Criterio	10 $\mu$ A	100 $\mu$ A	1mA	10mA
Termistor de 10 K $\Omega$		x		
Termistor de 100 K $\Omega$	x			
RTD			x	x
LM335			x	

Fuente: base de datos de la investigación.

$$R_{bias} = \frac{1.225}{I_{parcialidad}} - 122 \quad \text{Ecuación 17.}$$

Reemplazando se obtiene:

$$R_{bias} = \frac{1.225}{1mA} - 122$$

$$R_{bias} = 1.1 \text{ K}\Omega$$

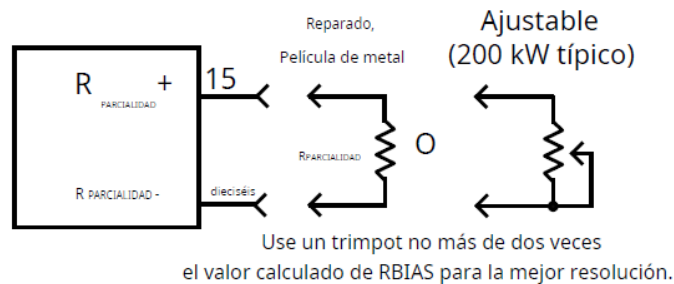


Figura 23. Configuración de la resistencia en los pines 15 y 16

Fuente: base de datos de la investigación.

#### 5.3.1.4. Setpoint de temperatura:

El setpoint es el parámetro que se varió entre los pines 8 y 5, con el fin de indicar al controlador la temperatura a la cual se planea llegar, este parámetro se puede realizar de dos maneras, la primera variando un potenciómetro para ajustar setpoint y la segunda aplicando un voltaje entre los pies 8 y 5. Para calcular este voltaje se tiene como referencia el siguiente ejemplo:

Temperatura deseada: 25°C

Rbias Sensor: 1.1KΩ

Resistencia a 25°C es de 1.1 KΩ

Corriente de Polarización: 1mA

Voltaje Setpoint:  $1K\Omega * 1mA = 1V$

### 5.3.1.5. Ganancia proporcional y constante de tiempo

Para configurar la ganancia proporcional del sistema se debe utilizar el valor  $k_p$  que se obtuvo en el control PI, este valor se reemplazó en la ecuación 18, recordando que  $k_p$  es la ganancia del sistema de control. Este ajuste de ganancia se lleva a cabo utilizando una resistencia entre los pines 17 y 18, teniendo en cuenta que una ganancia alta equivale a un tiempo de asentamiento muy corto, pero así mismo puede desestabilizar las cargas con tiempos de retardo intrínsecos prolongados.

$$R_{prop} = \frac{500K\Omega}{k_p} - 5K\Omega \quad \text{Ecuación 18}$$

Reemplazando

$$R_{prop} = \frac{500K\Omega}{1.8672} - 5K\Omega$$

$$R_{prop} = 263K\Omega$$

La constante de tiempo  $C_{int}$  representa el valor del condensador que se establece entre los pines 19 y 20 del HTC 1500, este capacitor depende de la constante de tiempo de integración ( $T_{int}$ ) que se encuentra a la hora de realizar el controlador PI. La ecuación 19 describe a  $C_{int}$  y está dada por:

$$C_{int} = \frac{T_{int}}{1M\Omega} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$C_{int} = \frac{295.334}{1M\Omega}$$

$$C_{int} = 259\mu F$$

#### **5.3.1.6. Integración de la celda de peltier y controlador HTC 1500**

El ultimo criterio de conexión indica que la celda de peltier va dispuesta entre los pines 11 y 12 del controlador, estos pines se encargan de proporcionarle a las celdas la corriente deseada para el valor de temperatura al cual deben llegar este valor depende netamente de la entrada suministrada por el setpoint.

#### **5.4 Rediseño de la estructura física de la planta**

Basados en las recomendaciones de la anterior planta de caracterización realizada en la UAN, donde el principal encargo fue realizar una estructura con unas dimensiones mayores que permitieran instalar mas de una celda de peltier para de esta manera obtener un mejor tiempo de estabilización [34]. Basados en esta información se llego a un excelente resultado por parte de la nueva planta la cual opto por tener unas medidas iguales a 25cm de largo, 20cm de alto y 15cm ancho. Esta estructura al ser más amplia permitió disponer 4 celdas de peltier internamente como se mostro anteriormente en la figura 14 donde se habló de la modelización de la planta, dicha estructura esta mas accesible a cualquier cambio electrónico que se presente en el desarrollo de la caracterización de un sipm. Esta mejora se puede ver refleja en las siguientes dos fotografías de la estructura tanto anterior como actual.



Figura 24. Rediseño de la estructura de la planta  
Fuente: base de datos de la investigación.

#### 5.4.1 Descripción de los elementos que componen la planta

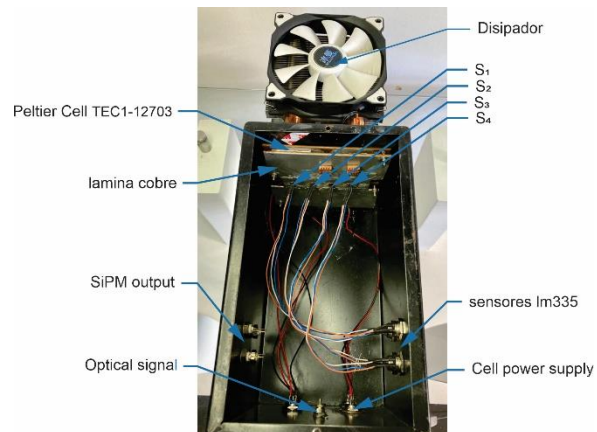


Figura 25. Elementos que componen la planta  
Fuente: base de datos de la investigación.

- Caja de aislamiento de 25 x 20 x 15 cm
- Actuador (celda de Peltier TEC1-12703)
- Disipador Ventilador Cpu 6 Tubos
- Disipador Ventilador Cpu 4 Tubos

- 4 sensores de temperatura (LM335)
- Lámina de cobre de 0.5mm 12 x 15cm
- 4 conectores BNC hembra aislados de masa
- 4 conectores de panel hembra de tres pines (conectores tipo blazing)
- 4 conector de panel hembra de dos pines (conectores tipo blazing)
- Elementos de anclaje (Tornillos y Tuercas)



## 6. CONCLUSIONES

Durante la realización de la investigación inicialmente se planteó variar la temperatura desde los  $-5^{\circ}\text{C}$  hasta los  $50^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, al momento de realizar las pruebas con las celdas peltier se observó que la planta requería de un sistema de refrigeración líquida para tener la capacidad de disipar todo el calor. Teniendo en cuenta que el efecto Peltier se caracteriza por la aparición de una diferencia de temperaturas entre las dos caras del semiconductor, este efecto hace que después de 5 minutos el sistema en refrigeración se desestabilice, por lo que la cara caliente del semiconductor es más intenso que la cara fría, por esto la planta requiere de un mejor sistema de refrigeramiento.

Con respecto al diseño del control inicialmente se planteó realizar un controlador PID digital, pero al momento de seleccionar el driver de temperatura se determinó que este requería era de un control PI analógico, por lo que se obtuvo una mejora significativa a la ganancia del sistema, teniendo por consecuencia que la planta no logra alcanzar temperaturas inferiores a  $28.8$  grados centígrados, no obstante, se logra alcanzar el estimado de  $50$  grados centígrados.

El sistema de control PI alcanza temperaturas hasta los  $53$  grados centígrados, dichas temperaturas se logran alcanzar con voltajes de polarización inferiores a lo que normalmente la planta requiere cuando esta es sometida sin un sistema de control. En el anexo 4 se encontrará una comparación del voltaje de polarización del semiconductor termoeléctrico

La pandemia que se produjo a nivel mundial COVID19 impidió el acceso al laboratorio de detectores de la UAN Villavicencio, pese a esto la implementación de la interfaz gráfica de Matlab no se pudo realizar en su

totalidad ya que para hacer dicho proceso se requiere de implementos físicos del laboratorio labdet Villavicencio, la interfaz esta enlazada directamente a la tarjeta de adquisición de datos national instruments. En el anexo 4 se muestra un estimado de cómo se ejecutaría dicha interfaz.

## **7. RECOMENDACIONES**

Se recomienda mejorar la disipación de calor de la planta, instalando un sistema de refrigeración líquida, lo que conlleva un amplio rango de temperaturas bajas. De esta forma se obtendrán mejores resultados.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] P. Levy y F. Izraelevitch, Implementación de fotomultiplicadores de silicio en aplicaciones espaciales., (Universidad Nacional de San Martín) Tesis de pregrado para el título de Licenciatura en Ciencias Físicas. Departamento de Física, 2018, pp. 1-2.
- [2] A. Gil, J. Rodríguez, V. Álvarez, J. Díaz, J. Goómez y D. Lorca, «Programmable power supply system for SiPM bias,» *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec*, vol. 0037, pp. 787-790, 2012.
- [3] F. Licciulli, I. Indiveri y C Marzocca, «A novel technique for the stabilization of SiPM gain against temperature variations,» *IEEE Trans. Nucl. Sci*, vol. 60, nº 2, pp. 606-611, 2013.
- [4] G. Cozzi, «Development of a SiPM-based detection module for large LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillators for nuclear physics applications,» vol. 2017, pp. 1-5, 2016.
- [5] G. Cozzi, «Development of a SiPM-based detection module for prompt gamma imaging in proton therapy,» *IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imaging Conf. Room Temperature Semicond. Detect. Work. NSS/MIC/RTSD*, vol. 2017, pp. 1-5, 2016.
- [6] A. López, Estudio de las propiedades de los fotomultiplicadores de silicio ( SiPM ), 2015.
- [7] Y. Oda, Basados en fotomultiplicadores con matriz de Silicio , conaplicaciones a muongrafías, s.f..

- [8] D. Lorca, Desarrollo y Caracterización de Fotomultiplicadores de Silicio para NEXT, 2010, pp. 1-47.
- [9] A. Vacheret y M. Ward, 2008, pp. 1-2.
- [10] A. Vacheret, «Characterization and simulation of the response of Multi-Pixel Photon,» *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers*, , vol. 656, nº 1, pp. 69-83, 2011.
- [11] G. Sandoval, Celdas Peltier: Una alternativa para sistemas de enfriamiento con base en semiconductor, s.f..
- [12] P. Conde y P. Eloy, Bloque detector PET basado en cristales monolíticos y fotomultiplicadores de silicio, 2017.
- [13] P. Sharp, H. Gemmell y A. Murray, *Practical Nuclear Medicine*, 3. edición, Ed., 2005.
- [14] E. Oliva, A. Ortiz, A. C. Nuria Moral, J. Perlado, R. Suárez y M. Cotelo, Curso básico de fusión nuclear, España: Sociedad Nuclear Española. Jóvenes nucleares, 2017.
- [15] G. González y C. Rabin, Para entender las radiaciones: Energía nuclear medicina industriaa, DIRAC. Universidad de la Republica, 2011, pp. 15-16.
- [16] M. Argulló, Evaluación de los fotomultiplicadores de silicio (SIPM) como alternativa a los fotomultiplicadores de tubo vacío (PMT) en un Front-End integrado para aplicaciones PET, (Universidad Politécnica de Valencia) Master en ingeniería de sistemas electrónicos, 2015, pp. 10-11.

- [17] V. Velázquez y R. Cadillo, Existencia del fotón, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013, pp. 1-6.
- [18] Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, El fotón, Biblioteca digital ILCE, 2016.
- [19] J. Yebras, Uso de fotomultiplicadores de silicio para medida de alta velocidad y baja intensidad luminosa, (Universidad Complutense de Madrid) Tesis de doctorad. Facultad de ciencias físicas, 2013, p. 5.
- [20] L. Guallichico, Construcción de un prototipo de detector de radiación ambiental con centelladores plásticos, Riobamba: (Escuela Politécnica de Chimborazo) Tesis de pregrado para el título de biofísico. Facultad de ciencias, 2018, p. 26.
- [21] M. Rolf, Optoelectrónica con Fotomultiplicadores de Silicio para Detectores de Rayos Cósmicos, Doctorado en ingeniería. Mención procesamiento de señales e imágenes, 2018, p. 46.
- [22] P. Conde, Bloque detector PET basado en cristales monolíticos y fotomultiplicadores de silicio, (Universitat de València) Tesis doctoral. Departamento de ingeniería electrónica, 2016.
- [23] J. Navarro, Control digital PI de un convertidor Push-Pull utilizado como fuente de alimentación conmutada para aplicaciones fotovoltaicas, (Instituto Tecnológico de Sonora) Tesis de pregrado para el título de ingeniero en electrónica, 2009, pp. 51-52.
- [24] C. Muñoz, Aplicación y comparación de sistemas de control PI y Fuzzi en espesador piloto, (Universidad de Concepción) Tesis de pregrado para el título de ingeniero metalúrgico. Departamento de ingeniería metalúrgica, 2019, pp. 40-41.

- [25] A. Barrios, Controladores PI industriales, (Universidad Tecnológica de Bolívar) Tesis de pregrado para el título de ingeniero electrónico. Facultad de ingeniería eléctrica y electrónica, 2007, pp. 15-16.
- [26] O. Aguado, Control de riego mediante el monitoreo de temperatura, humedad e intensidad solar en un invernadero implementado con Labview, (Instituto Politécnico Nacional) Tesis de pregrado para el título de ingeniero en comunicaciones y electrónica, 2012, pp. 14-15.
- [27] M. Rojas, Sistema electrónico para el monitoreo y control de cultivos utilizando tecnología inalámbrica en la comunidad La Unión del cantón Quero mediante software libre, (Universidad técnica de Ambato) Tesis para optar al título de ingeniero en electrónica y comunicaciones, 2015, p. 3.
- [28] E. López, Automatización de un bioreactor piloto, (Universidad Tecnológica de la Mixteca) Tesis de pregrado para el título de ingeniero en electrónica, 2013, p. 35.
- [29] Wavelength, «Controlador de temperatura HTC1500-62,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.teamwavelength.com/maintenance/product/htc1500-62-1-5-amp-temperature-controller/>.
- [30] Lightwave, «CONTROLADOR DE TEMPERATURA HTC1500 1.5 Amp,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.lightwavestore.com/htc1500-1-5-amp-temperature-controller.html>.
- [31] P. Cadena, R. Rendón, J. Aguilar, E. Salinas, F. d. I. Cruz y D. Sangerman, «Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su

combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias sociales,» *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 8, nº 7, 2017.

[32] J. Veiga, E. d. I. fuente y M. Zimmermann, «Modelos de estudios en investigación aplicada: conceptos y criterios para el diseño,» *Medicina y seguridad del trabajo*, vol. 54, nº 21, 2008.

[33] D. Rodriguez, *Investigacion experimental:caracteristicas, definición, ejemplos*, 2015.

[34] P. Baquero, *Diseño e implementación de un control de temperatura para una planta de caracterizacion de fotomultiplicadores de silicio*, Universidad Antonio Nariño. Tesis para el título de Ingeniero Electrónico. Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, 2020.

[35] T. Xu, Design and initial performance evaluation of a novel PET detector module based on compact SiPM arrays, *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec*, 2012, pp. 3038-3041.

[36] C. Piemonte, «High-Resolution Gamma-Ray Spectroscopy With a SiPM-Based Detection Module for 1” and 2” LaBr 3 :Ce Readout,» *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 65, nº 1, pp. 645-655, 2017.



## 9. ANEXOS

### Anexo 1. Código Matlab

```
%%%%%%%%%%%%% voltaje= 2v color rojo
%%%%%%%%%%%%%

DATA=Dev1_2(:, {'Dev1_ai1', 'Dev1_ai2', 'Dev1_ai3',
, 'Dev1_ai4'});

for i=1:1:size(DATA,2)
    DATA1(:,i)=DATA.(i);
end
ts=0.01;
tiempo=2100;
tend=tiempo-ts;
t=(0:ts:tend)';
plot(t,DATA1(:,2), 'r');
grid on
hold on

%%%%%%%%%%%%% voltaje= 4v color verde %%%%%%%%%%%%%%

DATA=Dev1_4(:, {'Dev1_ai1', 'Dev1_ai2', 'Dev1_ai3', '
Dev1_ai4'});
for i=1:1:size(DATA,2)
    DATA2(:,i)=DATA.(i);
end
ts=0.01;
tiempo=2100;
tend=tiempo-ts;
t=(0:ts:tend)';
plot(t,DATA2(:,2), 'g')
grid on
hold on

%%%%%%%%%%%%% voltaje= 6v color azul %%%%%%%%%%%%%%

DATA=Dev1_6(:, {'Dev1_ai1', 'Dev1_ai2', 'Dev1_ai3', '
Dev1_ai4'});
for i=1:1:size(DATA,2)
    DATA3(:,i)=DATA.(i);
```

```

end
ts=0.01;
tiempo=2100;
tend=tiempo-ts;
t=(0:ts:tend)';
plot(t,DATA3(:,2),'b')
grid on
hold on

%%%%%%%%% voltaje= 8v color amarillo %%%%%%%%%%%

DATA=Dev1_8(:,{'Dev1_ai1','Dev1_ai2','Dev1_ai3','
Dev1_ai4'});
for i=1:1:size(DATA,2)
    DATA4(:,i)=DATA.(i);
end
ts=0.01;
tiempo=2100;
tend=tiempo-ts;
t=(0:ts:tend)';
plot(t,DATA4(:,2),'y')
grid on
hold on

%%%%%%%%% voltaje= 10v color magenta %%%%%%%%%%%

DATA=Dev1_10(:,{'Dev1_ai1','Dev1_ai2','Dev1_ai3',
'Dev1_ai4'});
for i=1:1:size(DATA,2)
    DATA5(:,i)=DATA.(i);
end
ts=0.01;
tiempo=2100;
tend=tiempo-ts;
t=(0:ts:tend)';
plot(t,DATA5(:,2),'m')
grid on
hold on

%%%%%%%%%% voltaje= 12v color cyan %%%%%%%%%%%

```

```

DATA=Dev1_15(:, {'Dev1_ai1', 'Dev1_ai2', 'Dev1_ai3',
'Dev1_ai4'});
for i=1:1:size(DATA,2)
    DATA6(:,i)=DATA.(i);
end
ts=0.01;
tiempo=2100;
tend=tiempo-ts;
t=(0:ts:tend)';
plot(t,DATA6(:,2), 'c')
grid on
hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

U=[DATA1(:,2) DATA2(:,2) DATA3(:,2) DATA4(:,2)
DATA5(:,2) DATA6(:,2)];

for i=1:1:size(U,1)
    MDATA(i,1)=mean(U(i,:));
end

plot(t,MDATA, 'k', 'linewidth', 5.0)
axis([2 2100 2.7 3.7])
xlabel('tiempo (t)'); ylabel('voltaje (V)');
title('Grafico promedio de las señales (S2) ');
set(gca, 'fontsize', 20)

out= normalize(MDATA, 'range');
figure()
plot(out, 'r')
xlabel('tiempo (t)'); ylabel('voltaje (V)');
title('señales de salida normalizada (S2) ');
set(gca, 'fontsize', 20)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    entrada para el sistema escalon unitario

ts=0.01;
tiempo=2100;
tend=tiempo-ts;

```

```
tt=(0:ts:tend)';  
int= 1*ones(1,210000)';  
figure()  
plot(tt,int)
```

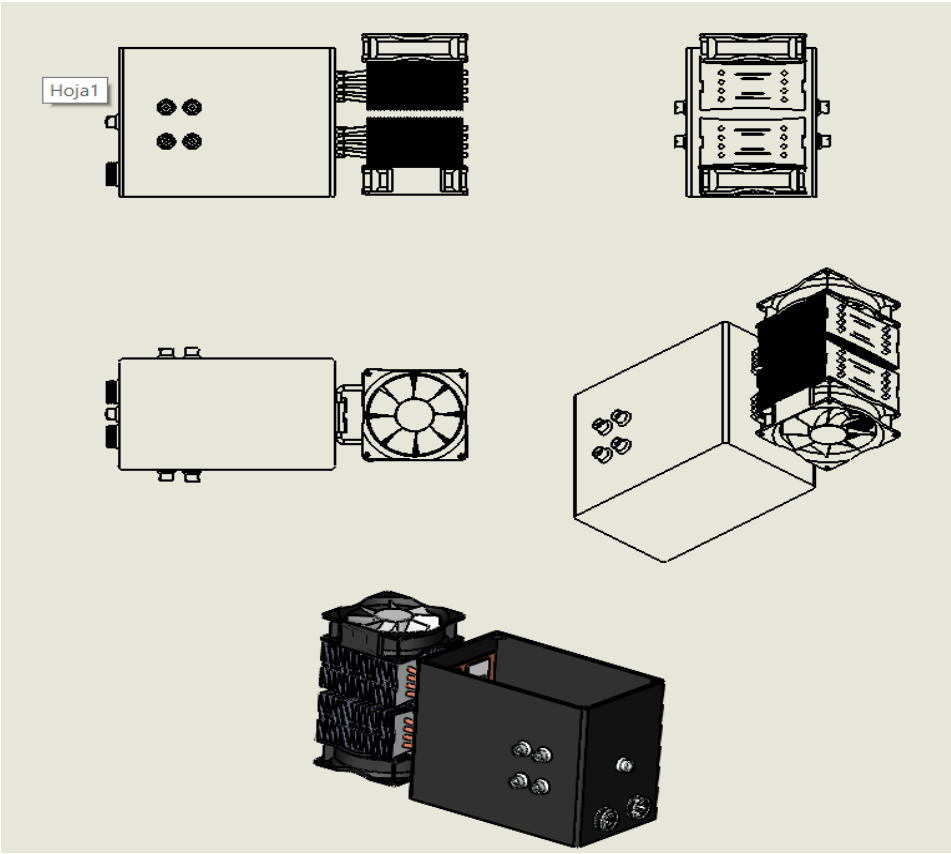
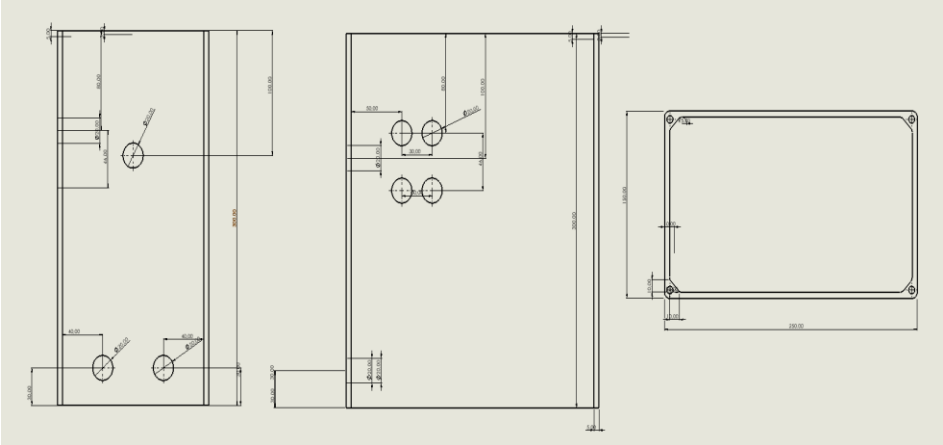
```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
num = tf3.Numerator;  
den = tf3.Denominator;  
G = tf(num,den);  
step(G)
```

```
step(G, 'K')  
hold on
```

```
gcl=feedback(C*G,1)  
step(gcl, 'G')  
hold on
```

Anexo 2. Planos de la planta



Anexo 3. Estabilización de temperatura de la celda peltier sometida a variación de tención en temperaturas bajas y altas

Temperatura altas

<b>Temperatura inicial</b>	<b>Rate (scans/s)</b>	<b>Tiempo de datos</b>	<b>Temperatura de estabilización</b>	<b>Voltaje de la celda</b>	<b>Nombre de la variable</b>
24°C	100	2100 s	29.2°C	2v	Dev1_2
24°C	100	2100 s	36.8°C	4V	Dev1_4
24°C	100	2100 s	46.6°C	6V	Dev1_6
24°C	100	2100 s	56.3°C	8V	Dev1_8
24°C	100	2100 s	66.4°C	10V	Dev1_10
24°C	100	2100 s	77.1°C	12V	Dev1_15

Temperaturas bajas

<b>Temperatura inicial</b>	<b>Rate (scans/s)</b>	<b>Tiempo de datos</b>	<b>Temperatura de estabilización</b>	<b>Voltaje de la celda</b>	<b>Nombre de la variable</b>
24°C	100	300 s	28.2°C	2v	Dev1_2
24°C	100	300 s	27.7°C	3V	Dev1_4
24°C	100	300 s	27.5°C	4V	Dev1_6
24°C	100	300 s	27.3°C	5V	Dev1_8
24°C	100	300 s	27.5°C	6V	Dev1_10

Anexo 4. Comparación del voltaje de polarización del semiconductor termoelectrico

<b>Voltaje polarización celda de peltier sin control</b>	<b>Temperatura de estabilización Sin control</b>	<b>Voltaje polarización celda de peltier con control</b>	<b>Temperatura de estabilización con control</b>
<b>2 v</b>	29.2°C	1.4 v	28.8°C
<b>4 v</b>	36.8°C	3.6 v	35°C
<b>6 v</b>	46.6°C	6.07 v	52.°C
<b>8 v</b>	56.3°C	6.12 v	52.6°C
<b>10 v</b>	66.4°C	6.9 v	53.3°C
<b>12 v</b>	77.1°C	-----	-----

## Anexo 5. Diseño de la interfaz grafica

