



# **Diseño e implementación de un control de temperatura para una planta de caracterización de fotomultiplicadores de silicio**

**Autora:  
Paola Andrea Baquero Beltrán**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Villavicencio, Colombia  
2020



# **Diseño e implementación de un control de temperatura para una planta de caracterización de fotomultiplicadores de silicio**

**Paola Andrea Baquero Beltrán**

Trabajo integral de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Electrónico**

Director:

Ing. Luis Fernando Castañeda Melo, Ph.D.

Línea de Investigación:

Ciencias naturales exactas y aplicadas

Grupo y Centro de Investigación:

Sistemas electrónicos

Centro de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (CICBA)

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia

2020

Nota de aceptación

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

*Dedico este triunfo a todas las personas que me ayudaron a desarrollar mi trabajo de grado y que todo el tiempo estuvieron apoyándome para que no me diera por vencida ante las dificultades y las adversidades que se presentaron.*

También dedico este logro a la memoria de mi abuelo Alfonso, que desde el cielo me brindó luz y fuerza para seguir adelante, sé que hubiera estado muy orgulloso de mí.



## **Agradecimientos**

Gracias a Dios y a la Virgen María por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida y haberme dado salud para lograr más objetivos, además de su infinita bondad y amor por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de mi estudio.

Agradezco a mis padres, por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí, gracias al amor recibido, la dedicación y paciencia con la que cada día se preocupaban por mi avance y desarrollo de este trabajo de grado, hoy logro concluir este proyecto.

El desarrollo de este trabajo de grado no lo puedo catalogar como algo fácil, pero lo que sí puedo hacer, es afirmar que durante todo este tiempo pude aprender mucho en cada momento, que cada investigación y proceso que se realizaron dentro de este lo disfrute y eso se lo debo al Ingeniero Luis Fernando Castañeda, por darme la oportunidad de realizar este proyecto y brindarme su consejo, conocimiento y experiencia a lo largo de este proceso. Gracias por haber sido el vínculo que me llevo a realizar un viaje que me permitió conocer muchas personas y adquirir nuevos conocimientos.

Agradezco a mis profesores quienes con su paciencia y dedicación contribuyeron en mi formación académica.

Agradezco a mis amigos por haber compartido los mejores momentos, gracias por brindarme su apoyo y confianza, por tener las palabras precisas en el momento indicado.





## Resumen

Los fotomultiplicadores de silicio (SiPM *por sus siglas en inglés*) son dispositivos ampliamente utilizados y tienen aplicación directa en varios campos científicos, actualmente la Universidad Antonio Nariño (UAN) financia el Proyecto de Investigación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Física de Altas Energías, con cooperaciones Internacionales en las cuales se realizan un trabajo de fotodetección, donde se emplean SiPM. En estos proyectos se requieren conocer detalladamente ciertas características que permiten su correcto funcionamiento. Una de las características más importantes es la ganancia, la cual se ve afectada directamente con la variación de la temperatura, lo que genera una respuesta con baja confiabilidad.

El presente trabajo expone el desarrollo de un sistema de control automático de temperatura proporcional integral (PI) analógico, con el cual se controla una planta de caracterización para los SiPM que permite variar la temperatura desde temperatura ambiente hasta 50°C, que estabiliza el sistema en menos de 1 minuto con error de posición menor al 5.53%.

**Palabras clave: SiPM, ganancia, temperatura, control PI.**

## Abstract

Silicon photomultipliers (SiPM) are widely used devices which have direct application in various scientific fields, currently the Antonio Nariño University (UAN) finances the Research, Science, Technology and Innovation Project of High Energy Physics in International Cooperations in which is carried out a photodetection work, where SiPM are used, for which they require to know in detail certain characteristics that allow its correct operation. One of the most important characteristics is the gain, which is directly affected with the temperature variation, which generates a response with low reliability.

The present work expose the development of an analog integral proportional temperature (PI) automatic control system with which a characterization plant for the SiPM is controlled that allows the temperature to be varied from room temperature to 50 ° C, which stabilizes the system in less than 1 minute with position error less than 2%.

**Keywords: SiPM, gain, temperature, PI control.**

# Contenido

	Pág.
<b>1. Marco teórico .....</b>	<b>3</b>
1.1 Fotomultiplicadores de silicio .....	3
1.1.1 Parámetros intrínsecos .....	4
1.1.2 Fuente de ruido en el SiPM .....	5
1.1.3 Ganancia de los SiPM.....	5
1.2 Actuador, sensor y disipador .....	6
1.2.1 Actuador (Celda de Peltier).....	6
1.2.2 Sensores de temperatura integrados .....	7
1.2.3 Disipador de temperatura .....	9
1.3 Métodos de caracterización de los dispositivos .....	9
1.3.1 Ajuste de curvas.....	10
1.3.2 Función de transferencia del sistema .....	12
1.4 Controladores.....	14
1.4.1 Clasificación de los sistemas de control .....	14
1.4.2 Tipos de sistemas de control .....	15
1.5 Método del lugar de las raíces .....	17
1.5.1 Efecto de la adición de polos y ceros .....	18
1.6 Diseño de circuito de control activo.....	19
<b>2. Metodología .....</b>	<b>21</b>
2.1 Diseño, implementación y adecuación de la estructura física de la planta .....	21
2.1.1 Diseño CAD de la planta.....	21
2.1.2 Elementos que componen la planta .....	22
2.1.3 Implementación de la planta .....	23
2.2 Caracterización de componentes electrónicos .....	24
2.2.1 Adquisición de datos .....	24
2.2.2 Análisis de resultados .....	26
2.3 Caracterización y modelización de la planta.....	27
2.3.1 Identificación de la planta .....	27
2.3.2 Adquisición de datos.....	27
2.3.3 Análisis de la respuesta presentada por la planta.....	28
2.4 Diseño e implementación de un sistema de control automático .....	30
<b>3. Resultados .....</b>	<b>35</b>
3.1 Caracterización de los sensores LM35 y el actuador .....	35
3.1.1 Muestras tomadas con multímetros.....	35
3.1.2 Muestras tomadas digitalmente.....	36
3.2 Caracterización y modelización de la planta.....	38

3.3	Diseño e implementación del sistema de control automático .....	40
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>47</b>
4.1	Recomendaciones .....	48
<b>A.</b>	<b>Anexo 1: Planos planta de temperatura .....</b>	<b>49</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo 2: Relación de tensión de celda-temperatura y corriente-temperatura, medidas tomada con multímetros .....</b>	<b>50</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo 3: Relación de tensión de celda-temperatura y corriente-temperatura, medidas tomadas digitalmente.....</b>	<b>51</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo 4: Resultados de la modelización de la planta, variables obtenidas calculando las constantes y utilizando IDENT.....</b>	<b>52</b>
<b>E.</b>	<b>Anexo 5: Respuesta del controlador Vs la planta .....</b>	<b>53</b>
<b>F.</b>	<b>Anexo 6: Relación entre los mV entregados por los sensores y la tensión de la fuente .....</b>	<b>54</b>
<b>G.</b>	<b>Anexo 7: Relación entre la temperatura y la tensión de la fuente medidas tomadas digitalmente.....</b>	<b>55</b>
<b>H.</b>	<b>Anexo 8: Sistema de control PI analógico .....</b>	<b>56</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1</b> Fotomultiplicadores de silicio .....	3
<b>Figura 1-2</b> Implementación básica de un SiPM .....	4
<b>Figura 1-3</b> Esquema efecto Peltier .....	6
<b>Figura 1-4</b> Celda de Peltier .....	7
<b>Figura 1-5</b> Encapsulado LM35 .....	8
<b>Figura 1-6</b> Disipador Cooler master .....	9
<b>Figura 1-7</b> Curva de respuesta en forma exponencial (Identificación de Sistemas de Primer Orden) .....	13
<b>Figura 1-8</b> Sistema de control .....	14
<b>Figura 1-9</b> Sistema de lazo abierto .....	15
<b>Figura 1-10</b> Sistema de lazo cerrado .....	15
<b>Figura 1-11</b> (a) Gráfica del lugar de las raíces de un sistema con tres polos; (b), (c) y (d) gráfica del lugar de las raíces que muestra el efecto de la adición de un cero al sistema. 19	19
<b>Figura 1-12</b> Amplificador operacional configurado para realizar función de transferencia 19	19
<b>Figura 2-1</b> Diseño CAD de la planta de caracterización .....	22
<b>Figura 2-2</b> Elementos que componen la plata .....	22
<b>Figura 2-3</b> Planta de caracterización .....	23
<b>Figura 2-4</b> Plataforma experimental .....	24
<b>Figura 2-5</b> Circuito resistencia de shunt .....	25
<b>Figura 2-6</b> Curve Fitting Tool .....	26
<b>Figura 2-7</b> Respuesta a un escalón unitario de una planta .....	27
<b>Figura 2-8</b> System identification (IDENT) .....	29
<b>Figura 2-9</b> Process Model de IDENT .....	30
<b>Figura 2-10</b> Control system designer (SISOTOOL) .....	31
<b>Figura 2-11</b> Diseño sistema de control PID .....	32
<b>Figura 2-12</b> Simulación del control en Simulink .....	32
<b>Figura 2-13</b> Diagrama de bloques del sistema de control automático .....	33
<b>Figura 3-1</b> Relación tensión de la fuente con la temperatura medida osciloscopio .....	35
<b>Figura 3-2</b> Curva de ajuste relación tensión de la fuente con la temperatura medida. ....	36
<b>Figura 3-3</b> Relación tensión de la fuente con la temperatura medida digitalmente .....	36
<b>Figura 3-4</b> Curva de ajuste de la relación tensión de la fuente con la temperatura medida digitalmente .....	37
<b>Figura 3-5</b> Datos tomados en el laboratorio, para la identificación experimental del modelo de la planta .....	38

---

<b>Figura 3-6</b> Función escalón en razón de temperatura .....	38
<b>Figura 3-7</b> Respuestas obtenidas en la modelización de la planta con valores calculados .....	39
<b>Figura 3-8</b> Respuestas obtenidas en la modelización de la planta IDENT .....	39
<b>Figura 3-9</b> Ubicación de los polos y ceros para el diseño de un control PI pseudo D .....	40
<b>Figura 3-10</b> Respuesta del sistema y del control PI pseudo D diseñado .....	41
<b>Figura 3-11</b> Ubicación de los polos y ceros para el diseño de un control PI .....	42
<b>Figura 3-12</b> Respuesta del sistema y del control PI con una entrada escalón .....	42
<b>Figura 3-13</b> Respuesta Escalón planta sin controlador (Azul) y con controlador (Naranja). .....	43
<b>Figura 3-14</b> Circuito analógico de un controlador PI .....	44
<b>Figura 3-15</b> Promedio y conversión a voltios de los sensores LM35 .....	45
<b>Figura 3-16</b> Diferencia entre la temperatura medida y la deseada .....	45
<b>Figura 3-17</b> Driver de la celda de Peltier .....	46
<b>Figura A-1</b> Plano de la planta de temperatura .....	49
<b>Figura A-2</b> Imagen 3D de la planta .....	49
<b>Figura B-1</b> Relación tensión de la celda y temperatura muestras tomadas con multímetros .....	50
<b>Figura B-2</b> Relación corriente y temperatura muestras tomadas con multímetros .....	50
<b>Figura C-1</b> Relación tensión de la celda y temperatura muestras tomadas digitalmente ..	51
<b>Figura C-2</b> Relación corriente y temperatura muestras tomadas digitalmente .....	51
<b>Figura E-1</b> Diagrama desarrollado en Simulink para controlador PI .....	53
<b>Figura E-2</b> Acción de control .....	53
<b>Figura E-3</b> Respuesta escalón control PI .....	54
<b>Figura F-1</b> Curva de ajuste de la relación entre la tensión del sensor-tensión de la fuente .....	54
<b>Figura G-1</b> Gráfica de relación temperatura y tensión de la fuente .....	55
<b>Figura G-2</b> Curva de ajuste de relación temperatura y tensión de la fuente .....	55
<b>Figura H-1</b> Sistema de control automático .....	56



## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1</b> Diseño de circuitos de control usando amplificadores operacionales.....	20
<b>Tabla D-1</b> Tabla de valores de constantes calculadas .....	52
<b>Tabla D-2</b> Tabla de valores de constantes estimadas en IDENT.....	52



# 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 fotodetección usando SiPM. Los SiPM son capaces de detectar señales de muy baja intensidad hasta el nivel de un solo fotón(López, 2015)(Lorca Galindo, 2010)(Oda, 2016) . Los procesos de fotodetección actualmente se realizaron en el marco del Proyecto de Investigación Ciencia, Tecnologías e Innovación de la Física de Altas Energías en las Cooperaciones Internacionales, financiado por la Universidad Antonio Nariño dentro de la convocatoria interna de investigación 2017.

Para realizar procesos de fotodetección efectivos se requiere conocer en detalle las características del foto detector 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 (Lorca Galindo, 2010)(Vacheret & Ward, 2008)(Vacheret et al., 2011). Procesos de caracterización como los trabajos de Oda y Lorca corroboran que la ganancia del SiPM varía de forma inversamente proporcional a la variación de la temperatura (Lorca Galindo, 2010)(Oda, 2016). Dichos trabajos corresponden a aplicaciones del SiPM donde es crítico el monitoreo de su ganancia debido a que cualquier variación en dicha característica generaría cambios importantes en la respuesta del SiPM.

Partiendo de lo mencionado, el proyecto desarrollado corresponde a una planta de control de temperatura para la caracterización de SiPM, con la cual se pretende caracterizar estos dispositivos en función de la temperatura permitiendo determinar la relación entre la ganancia y la temperatura. Para esto, se diseñó e implementó una planta que incluye en su interior una celda de Peltier (actuador), sensores LM35, SiPM y conectores que aíslan los componentes del exterior, permitiendo tomar las medidas necesarias. Con la planta diseñada se realizó un control proporcional integral (PI) analógico con el cual se redujo el tiempo de establecimiento, el sobrepaso y se garantizó que a los SiPM alcancen la temperatura deseada.

En el capítulo 1 se explican los conceptos de las temáticas que incorporan el proyecto y algunas prácticas elaboradas que ayudan a entender el tema a desarrollar, en el capítulo

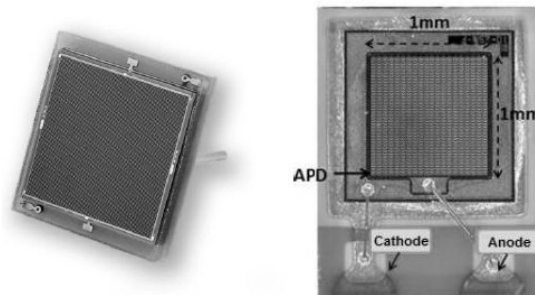
2 se llevan a cabo las etapas y los métodos utilizados que permiten explicar cómo se llegó a desarrollar el proyecto propuesto partiendo del diseño, implementación y adecuación de la planta el cual permite aislar los componentes y medir las variables necesarias, en el capítulo 3, se muestran los resultados obtenidos a través de los métodos que se utilizaron para cumplir con el desarrollo del proyecto. Finalmente, el capítulo 4 muestra las conclusiones obtenidas al finalizar el proyecto y recomendaciones para futuros trabajos, tomando como partida el trabajo desarrollado en este documento, ya sea para mejorarlo o tomarlo como referencia. Al final de este documento, se encuentran los anexos con información complementaria.

# 1. Marco teórico

## 1.1 Fotomultiplicadores de silicio

Los Fotomultiplicadores de Silicio, abreviándose SiPM, son foto detectores o detectores de luz que están formados por una matriz de fotodiodos de avalancha (APDs). Una de las características importantes del SiPM es su tamaño; llega a tener un área de 1x1 mm hasta 6x6 mm como se observa en la Figura 1-1, donde al ser más grande mejora su eficiencia, y aumenta su sensibilidad. Como su área es tan pequeña cada APD tiene un tamaño de 20 a 100 micrómetros, esto quiere decir que pueden llegar a unirse hasta 1000 fotodiodos en un área de 1x1mm. Este foto detector puede operar con flujos de luz muy pequeños, Debido a que detecta más de un fotón por APD, por lo cual al determinar el número de APDs activados en el SiPM se puede determinar el número total de fotones detectados (López, 2015). Actualmente, Hamamatsu Photonics ofrece SiPM de hasta 14000 pixeles con modelos de referencia de la familia S13 y 14.

**Figura 1-1** Fotomultiplicadores de silicio

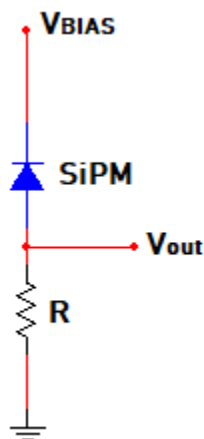


Fuente:(Arnaldi & Bertou, 2017)

El SiPM se puede modelizar como un gran diodo debido a que está conformado por APDs en paralelo eléctricamente y espacialmente forma matricial, además, se debe polarizar en modo Geiger como herencia de los APDs, esto quiere decir que funcionan a una tensión

de polarización inversa mayor que la tensión de ruptura. Los fotodiodos que constituyen el SiPM trabajan de forma paralela, esto produce que genere electrones o portadores de carga negativa proporcional al número de pixeles o fotodiodos que reaccionan a los pulsos de luz. Cuando un pulso de luz excita al SiPM y en algunos fotodiodos la acumulación de electrones alcanza una energía lo suficientemente grande para superar la banda de valencia (*Bandgap*) del silicio, se produce una avalancha gracias al campo eléctrico con el potencial de polarización inversa, esto finalmente se convierte en un impulso de corriente proporcional al número de pixeles o APD que reaccionarán a la incidencia de la luz, como se muestra en la Figura 1-2 este impulso de corriente se puede mostrar como una tensión analógica a través de una resistencia ( $R_{BLAS}$ ) (Lorca Galindo, 2010)

**Figura 1-2** Implementación básica de un SiPM



Fuente: Imagen propia

### 1.1.1 Parámetros intrínsecos

**Tensión de ruptura y Tensión de operación:** Como es sabido, un diodo básico necesita ser sometido a una diferencia de potencial externa, que llamaremos tensión de bias ( $V_{BLAS}$ ), de manera que en su interior se genere un campo eléctrico asociado que acelere a los portadores libres, es decir, se induce un movimiento de cargas cuyo sentido depende de la carga eléctrica del portador. Si el  $V_{BLAS}$  al que sometemos el SiPM es demasiado bajo, el campo eléctrico no será suficientemente intenso como para acelerar al fotoelectrón y éste tendrá una probabilidad alta de recombinarse, desbaratándose las

opciones de detectar la luz incidente. Si continuamos aumentando el  $V_{BIAS}$ , poco a poco llegaremos a valores del campo eléctrico interno del fotodiodo con los que ya seremos capaces de acelerar el fotoelectrón y mediante mecanismos que trataremos en los puntos siguientes, conseguiremos aumentar considerablemente el número de electrones arrancados y acelerados en el diodo, cuya carga podrá ser detectada y medida. Con base en esto, se define el *Breakdown Voltage* ( $V_{BD}$ ) como el  $V_{BIAS}$  en el cual la intensidad del campo eléctrico generado en la zona de depleción es suficiente para generar una avalancha de portadores, es decir, una descarga Geiger (López, 2015).

### 1.1.2 Fuente de ruido en el SiPM

Existen tres fuentes de ruido que afectan la respuesta del SiPM. La primera se conoce como Cuentas oscuras (*Dark Counts*), este ruido se genera cuando el SiPM se encuentra en total oscuridad y se generan una nueva avalancha producto de un suceso espontáneo, no relacionado con los fotones incidentes que se desean medir. El segundo se conoce como *Crosstalk* en el cual mientras sucede una avalancha los portadores cercanos a las uniones con otras celdas pueden radiar fotones al tiempo que son acelerados por el campo eléctrico. Estos fotones pueden viajar a una celda vecina y, eventualmente, accionar una nueva avalancha Geiger en ella. Y el tercero se conoce como Pulsos Tardíos (*Afterpulse*) se produce debido a la existencia de impurezas y defectos en la red cristalina del silicio, algunas cargas pueden quedar atrapadas, siendo liberadas un tiempo después y generando una segunda avalancha (López, 2015)(Vacheret & Ward, 2008)

### 1.1.3 Ganancia de los SiPM

La ganancia del SiPM se define como la carga producida en una sola avalancha Geiger, expresada en unidades de carga de electrones. Las avalanchas son creadas típicamente por un solo portador y puede ser activado ya sea por un fotón o por ruido térmico.

Sin embargo el principal tema a tratar en los SiPM es el efecto del  $V_{BIAS}$  sobre la ganancia de los SiPM, pues tiene una dependencia total sobre este valor como se observa en la ecuación (1.1), ya que al variar el  $V_{BIAS}$  varía la zona de creación de cargas amplificándose de diferente manera la señal. Dado que  $V_{BD}$  aumenta linealmente en  $52 \pm$

4mV por °C, la ganancia disminuye proporcionalmente a medida que la temperatura aumenta en funcionamiento de un  $V_{BLAS}$  fijo (Vacheret et al., 2011).

$$G = C * (V_{BLAS} - V_{BD}) \quad (1.1)$$

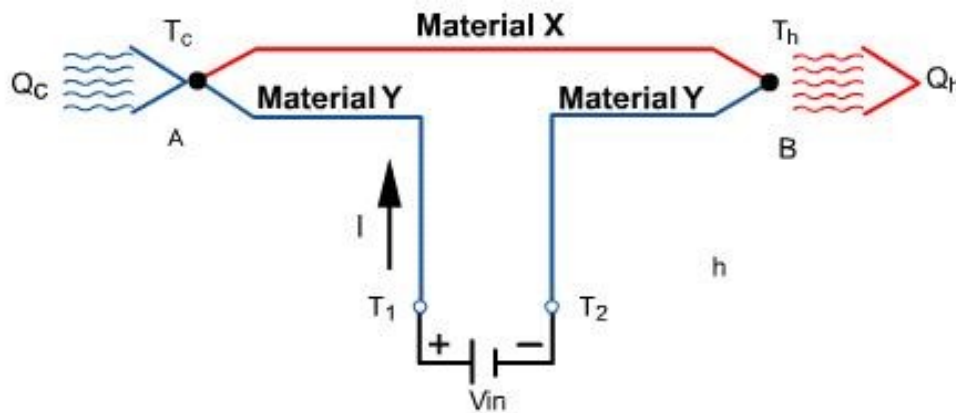
Por lo tanto una propiedad que debe ser controlada es la temperatura dado que esta variable afecta la respuesta que entrega el SiPM y por tanto su confiabilidad al momento de usarlos en diversas aplicaciones.

## 1.2 Actuador, sensor y disipador

### 1.2.1 Actuador (Celda de Peltier)

Para poder hacer un control de temperatura se integró un dispositivo Peltier en la planta de manera que mantenga la temperatura de forma estable en un rango determinado de tiempo. Son muchas las aplicaciones prácticas que se le han dado a este efecto, pero la aplicación más importante es las celdas de Peltier, la cual mueve energía calorífica desde la placa fría a la placa caliente a través del control de la energía eléctrica proporcionada por una fuente de alimentación (Rubio Ramírez et al., 2017).

Figura 1-3 Esquema efecto Peltier



Fuente:(Patterson & Sobral, 2007)

- **Efecto Peltier**

Llamado efecto Peltier consiste en el enfriamiento o calentamiento de una unión entre dos conductores distintos al pasar una corriente eléctrica por ella y que depende

exclusivamente de la composición y temperatura de la unión. En la Figura 1-3 se observa el esquema del circuito.

Por lo general, una celda Peltier está conformada por dos materiales semiconductores, uno tipo P y otro tipo N, como lo muestra la Figura 1-4. Las células que se comercializan en el mercado esencialmente están compuestas por dos tipos de elementos semiconductores: telurio de bismuto y seleniuro de antimonio (Patterson & Sobral, 2007).

**Figura 1-4** Celda de Peltier



Fuente:(Rubio Ramírez et al., 2017)

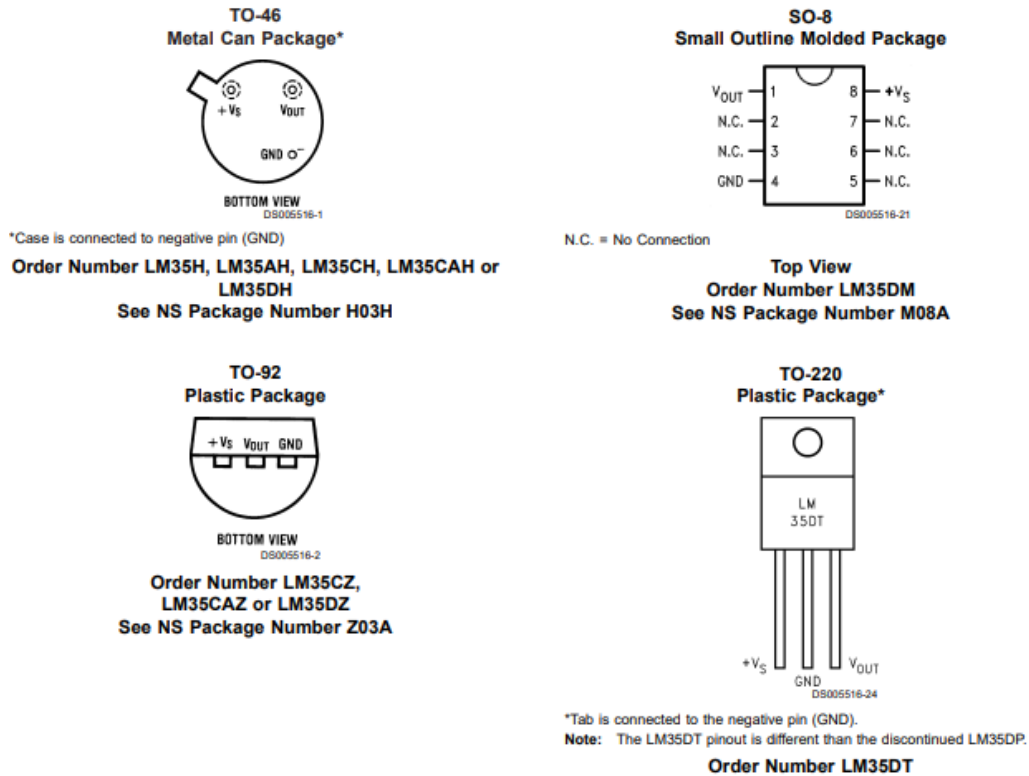
### 1.2.2 Sensores de temperatura integrados

E cuyo comportamiento depende de las variaciones de la temperatura, a estos dispositivos se les llama sensores de temperatura. Esta medida se puede establecer gracias a diferentes fenómenos: dilatación de cuerpos sólidos, líquidos o gaseosos, cambio de resistencia o de la conductividad eléctrica, cambio de la diferencia de potencial expresado en tensión eléctrica, emisión y absorción de rayos infrarrojos, etc. (Self-heating & Output, 2013).

## • Sensores analógicos LM35

Es un sensor de temperatura con una precisión calibrada de  $1^{\circ}\text{C}$ . Su rango de medición abarca desde  $-55^{\circ}\text{C}$  hasta  $150^{\circ}\text{C}$ . La salida es lineal y cada grado Celsius equivale a  $10\text{mV}$ . Se presenta en diferentes encapsulados como se observa en la Figura 1-5 pero el más común en el mercado es el plástico TO-92.

**Figura 1-5 Encapsulado LM35**



Fuente:(Self-heating & Output, 2013)

Las características más relevantes son:

- Calibrado directamente en grados Celsius.
- La tensión de salida es proporcional a la temperatura.
- Tiene una precisión garantizada de  $0,5^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ .
- Baja impedancia de salida.
- Baja corriente de alimentación ( $60\mu\text{A}$ ).
- Bajo costo



### 1.2.3 Disipador de temperatura

Es un instrumento que se utiliza para bajar la temperatura de algunos componentes electrónicos. Su funcionamiento se basa en la ley cero de la termodinámica, transfiriendo el calor de la parte caliente en el aire. Este proceso se lleva a cabo aumentando la superficie de contacto con el aire, permitiendo una eliminación más rápida del calor excedente (Córdoba, 2016). Para este trabajo se utilizó el Cooler master como se observa en la Figura 1-6 el cual estará en contacto con la celda de Peltier para de esta manera garantizar su buen funcionamiento.

**Figura 1-6** Disipador Cooler master



Fuente:(Córdoba, 2016)

## 1.3 Métodos de caracterización de los dispositivos

La caracterización de un dispositivo (sensores, actuadores, plantas) consiste en el cálculo de la ecuación que representa su comportamiento. Esto se refiere a la ecuación que determina la razón de cambio en la variable de salida, con relación a la variable de entrada, lo cual puede ser eléctrico o físico; o viceversa. La caracterización de los dispositivos resulta esencial para la interpolación de valores. Una buena caracterización genera mediciones con un buen nivel de exactitud.

### 1.3.1 Ajuste de curvas

El ajuste de curvas es un proceso mediante el cual, dado un conjunto de N pares de puntos  $\{x_i, y_i\}$  (siendo x la variable independiente, y la dependiente), se determina una función matemática  $f(x)$  de tal manera que la suma de los cuadrados de la diferencia entre la imagen real y la correspondiente obtenida mediante la función ajustada en cada punto sea mínima:

$$\varepsilon = \min \left( \sum_{i=0}^N (y_i - f(x_i))^2 \right) \quad (1.2)$$

Generalmente, se escoge una función genérica  $f(x)$  en función de uno o más parámetros y se ajusta el valor de estos parámetros de la manera que se minimice el error cuadrático,  $\varepsilon$ . La forma más típica de esta función ajustada es la de un polinomio de grado M; obteniéndose para M = 1 un ajuste lineal (o regresión lineal), (Walpole et al., 2012)

$$f(x) = a_0 + a_1x + \varepsilon \quad (1.3)$$

$a_0$  = Es la ordenada en el origen, es decir, el valor que toma Y cuando X=0

$a_1$  = Es la pendiente de la recta

$\varepsilon$  = Error

y para M = 2 un ajuste parabólico,

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (1.4)$$

#### ▪ Ajuste polinómico por mínimos cuadrados

De manera análoga al caso lineal, el objetivo es determinar la ecuación del polinomio de grado M que minimiza el error cuadrático (Salvador, 2008).

$$\varepsilon = \min \left( \sum_{i=0}^N (y_i - f(x_i))^2 \right) = \min \left( \sum_{i=0}^N (y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 \dots \quad '))^2 \right) \quad (1.5)$$

respecto a los parámetros M +1 parámetros  $a_0, a_1, \dots, a_M$ .

Por ejemplo, para un ajuste parabólico (M = 2), la condición de mínimo del error cuadrático lleva a las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_0} &= 2 \sum_{i=0}^N \left[ y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2) \right] = 0 \\
\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_1} &= 2 \sum_{i=0}^N x_i \left[ y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2) \right] = 0 \\
\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_2} &= 2 \sum_{i=0}^N x_i^2 \left[ y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2) \right] = 0
\end{aligned} \tag{1.6}$$

Procediendo de manera análoga al caso lineal llegamos a que la determinación de los parámetros del polinomio pasa por la resolución de un sistema de ecuaciones de la forma

$$\begin{bmatrix}
n+1 & \sum_{i=0}^N x_i & \sum_{i=0}^N x_i^2 \\
\sum_{i=0}^N x_i & \sum_{i=0}^N x_i^2 & \sum_{i=0}^N x_i^3 \\
\sum_{i=0}^N x_i^2 & \sum_{i=0}^N x_i^3 & \sum_{i=0}^N x_i^4
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
a_0 \\
a_1 \\
a_2
\end{Bmatrix}
=
\begin{Bmatrix}
\sum_{i=0}^N y_i \\
\sum_{i=0}^N x_i y_i \\
\sum_{i=0}^N x_i^2 y_i
\end{Bmatrix} \tag{1.7}$$

Para el caso general de un polinomio de grado M ya podemos intuir que la solución vendrá dada por un sistema de ecuaciones lineales de dimensión  $(M+1) \times (M+1)$  de la forma

$$\begin{bmatrix}
n+1 & \sum_{i=0}^N x_i & \sum_{i=0}^N x_i^2 & \vdots & \sum_{i=0}^N x_i^M \\
\sum_{i=0}^N x_i & \sum_{i=0}^N x_i^2 & \sum_{i=0}^N x_i^3 & \vdots & \sum_{i=0}^N x_i^{M+1} \\
\sum_{i=0}^N x_i^2 & \sum_{i=0}^N x_i^3 & \sum_{i=0}^N x_i^4 & \vdots & \sum_{i=0}^N x_i^{M+2} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\sum_{i=0}^N x_i^M & \dots & \dots & \dots & \sum_{i=0}^N x_i^{M+M}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
a_0 \\
a_1 \\
a_2 \\
\vdots \\
a_M
\end{Bmatrix}
=
\begin{Bmatrix}
\sum_{i=0}^N y_i \\
\sum_{i=0}^N x_i y_i \\
\sum_{i=0}^N x_i^2 y_i \\
\vdots \\
\sum_{i=0}^N x_i^M y_i
\end{Bmatrix} \tag{1.8}$$

Finalmente para determinar los coeficientes se utiliza la siguiente forma.

$$[C]\{a\} = \{B\} \rightarrow \{a\} = [C]^{-1} \{B\} \tag{1.9}$$

### 1.3.2 Función de transferencia del sistema

Para el desarrollo de esto se consideró un sistema de primer orden cuya relación entrada-salida se obtiene mediante

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts+1} \quad (1.10)$$

Luego se analizan las respuestas del sistema a entradas como la función escalón unitario, rampa e impulso unitario. Se supone que las condiciones iniciales son cero (Ogata, 2018).

Para el caso de la respuesta del sistema con un escalón unitario. Como la transformada de Laplace de la función escalón unitario es  $1/s$ , se sustituye  $R(s) = 1/s$  en la ecuación (1.10), se obtiene

$$C(s) = \frac{1}{Ts+1} \frac{1}{s} \quad (1.11)$$

Si se desarrolla  $C(s)$  en fracciones simples se obtiene

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts+1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s+(1/T)} \quad (1.12)$$

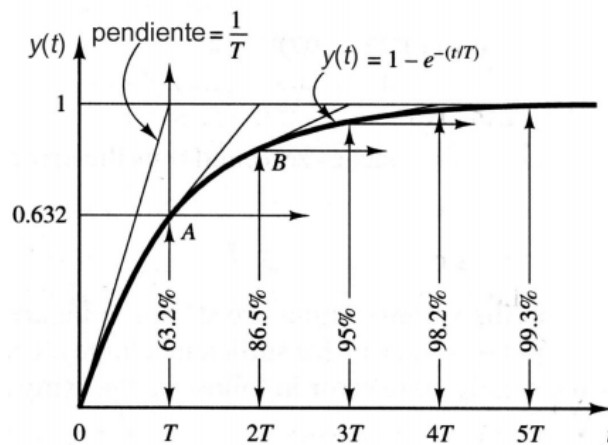
Si se aplica la transformada inversa de Laplace de la ecuación (1.12), se obtiene

$$c(t) = 1 - e^{-t/T} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (1.13)$$

La ecuación (1.13) plantea que la salida  $c(t)$  es inicialmente cero y al final se vuelve unitaria. Una característica importante de tal curva de respuesta exponencial  $c(t)$  es que, para  $t = T$ , el valor de  $c(t)$  es 0.632, o que la respuesta  $c(t)$  alcanzó 63.2% de su cambio total. Esto se aprecia con facilidad sustituyendo  $t = T$  en  $c(t)$ . Es decir (Córdoba, 2016),

$$c(T) = 1 - e^{-1} = 0.632 \quad (1.14)$$

**Figura 1-7** Curva de respuesta en forma exponencial (Identificación de Sistemas de Primer Orden)



Fuente:(Ogata, 2018)

Obsérvese que, conforme más pequeña es la constante de tiempo  $T$ , más rápida es la respuesta del sistema. Otra característica importante de la curva de respuesta exponencial es que la pendiente de la línea de tangente en  $t=0$  es  $1/T$ , ya que

$$\left. \frac{dc}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{1}{T} e^{-t/T} \right|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (1.15)$$

Debido a que la respuesta del sistema,  $y(t)$ , es obtenida a partir de su función de transferencia, su valor inicial es cero,  $y(0) = 0$ ; lo cual en situaciones reales no siempre es cierto, ya que las condiciones iniciales pudieran ser diferentes a cero, es decir,  $y(t) = y_0 \neq 0$ . En tal caso la respuesta del sistema se debe calcular usando la ecuación más general

$$c(t) = y_0 + (yf_{,ss} - y_0) \left( 1 - e^{-\frac{t-t_0}{T}} \right) \quad (1.16)$$

Dónde:

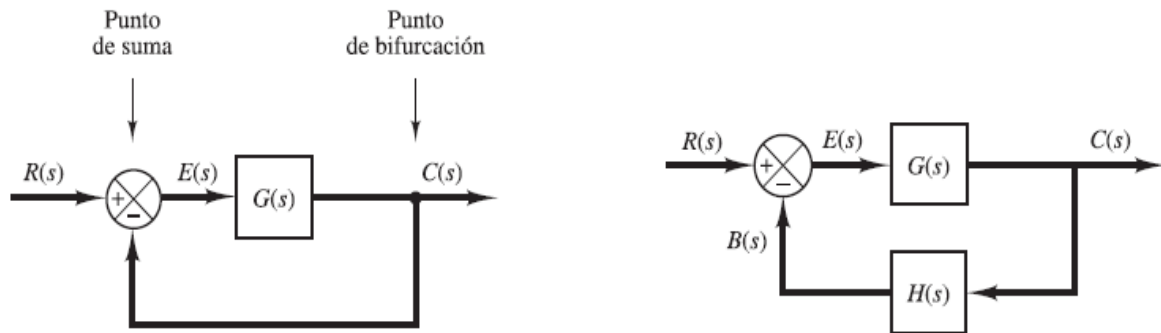
$y_0$  = Valor de la salida del sistema para el tiempo  $t_0$ .

$yf_{,ss}$  = Valor final de la salida del sistema en estado estable.

## 1.4 Controladores

Un sistema de control mantiene un proceso en condiciones específicas de operación, esas condiciones son valores en los que debe permanecer las variables de dicho proceso (Ogata, 2018).

Figura 1-8 Sistema de control



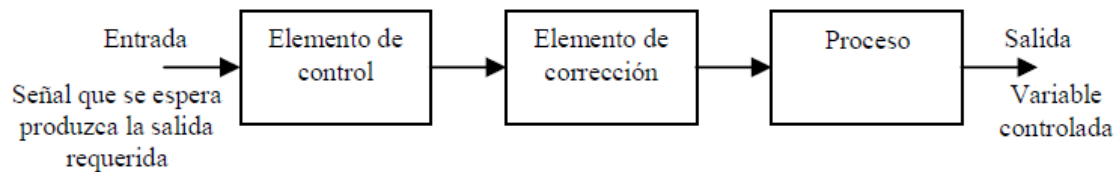
Fuente: (Ogata, 2018)

Los componentes que describen un sistema de control son los siguientes: objetivos, sistema de control y resultados. Es decir, los objetivos se pueden identificar como las entradas, o señales actuantes, y los resultados se identifican como las salidas, o variables controladas. Por lo tanto, el objetivo de un sistema de control es controlar las salidas de alguna forma mediante las entradas a través de los elementos del sistema de control.

### 1.4.1 Clasificación de los sistemas de control

- **Sistema de lazo abierto**

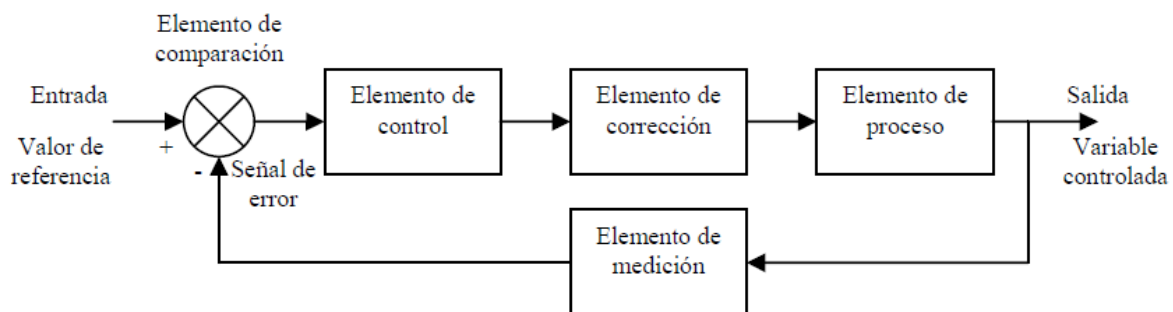
Es aquel sistema donde la entrada es independiente de la salida, por lo tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija. La capacidad que tales sistemas tienen para ejecutar una acción con exactitud depende de su calibración como se observa en la Figura 1-9. En general, los sistemas de lazo abierto están regulados por base de tiempo (Perez et al., 2008).

**Figura 1-9** Sistema de lazo abierto

Fuente:(Perez et al., 2008)

- **Sistema de lazo cerrado**

En los sistemas de control de lazo cerrado, la salida o señal controlada, debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, y se debe enviar una señal actuante o acción de control, proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida a través del sistema, para disminuir el error y corregir la salida (Perez et al., 2008).

**Figura 1-10** Sistema de lazo cerrado

Fuente:(Perez et al., 2008)

La diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida se le denomina señal de error del sistema; esta señal es la que actúa sobre el sistema de modo de llevar la salida a un valor deseado. En otras palabras, el término lazo cerrado implica el uso de acción de realimentación negativa para reducir el error del sistema como se observa en la Figura 1-10.

### 1.4.2 Tipos de sistemas de control

- **Sistema de control ON-OFF**

Es un sistema de control de dos posiciones: encendido (100%) y apagado (0%), el funcionamiento de este controlador se basa en tener un punto de referencia, si la variable

es mayor el actuador asume una de las posiciones y si es menor asume la otra posición. Tiene un simple mecanismo de construcción, por eso este tipo de controladores es de amplio uso (Ogata, 2018).

- **Sistema de control proporcional (P)**

Para un controlador proporcional, la relación de salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1.17)$$

donde  $K_p$  se considera la ganancia proporcional. Por tanto el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable (Ogata, 2018).

- **Sistema de control integral (I)**

Para un controlador integral, el valor de salida del controlador  $u(t)$  se cambia a una razón proporcional a la señal de error  $e(t)$  es:

$$\begin{aligned} \frac{du(t)}{dt} &= K_I e(t) \\ u(t) &= K_I \int_0^t e(t) dt \end{aligned} \quad (1.18)$$

donde  $K_I$  es una constante ajustable. La función de transferencia del controlador integral es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \quad (1.19)$$

- **Sistema de control proporcional integral (PI)**

El control PI se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (1.20)$$

O la función de transferencia del controlador es



$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (1.21)$$

Donde  $T_I$  se denomina tiempo integral. (Ogata, 2018).

- **Sistema de control proporcional derivativo (PD)**

El control PD se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.22)$$

o la función de transferencia es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (1.23)$$

Donde  $T_d$  es el tiempo derivativo. (Ogata, 2018)

- **Sistema de control proporcional integral derivativo (PID)**

Este control combinación las ventajas de cada una de las tres acciones de control individual. La ecuación de este controlador está dada por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_I} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.24)$$

o la función de transferencia es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_d s \right) \quad (1.25)$$

## 1.5 Método del lugar de las raíces

El diseño por el método del lugar de las raíces se basa en redibujar el lugar de las raíces del sistema añadiendo polos y ceros a la función de transferencia en lazo abierto del sistema y hacer que el lugar de las raíces pase por los polos en lazo cerrado deseados en el plano  $s$ . La característica del diseño del lugar de las raíces es que se basa en la

hipótesis de que el sistema en lazo cerrado tiene un par de polos dominantes. Esto significa que los efectos de los ceros y polos adicionales no afectan mucho a las características de la respuesta.

Cuando se diseña un sistema de control, si se requiere un ajuste de la ganancia (o de cualquier otro parámetro), se deben modificar los lugares de las raíces originales introduciendo un compensador adecuado. Una vez comprendidos los efectos de la adición de los polos y/o ceros sobre el lugar de las raíces, se pueden determinar con facilidad las localizaciones de los polos y los ceros del compensador para volver a construir el lugar de las raíces como se desee (Ogata, 2018).

### **1.5.1 Efecto de la adición de polos y ceros**

- **Adición de polos**

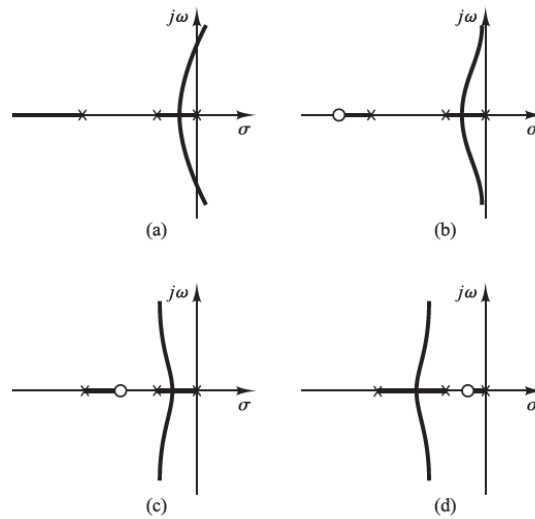
La adición de un polo a la función de transferencia en lazo abierto tiene el efecto de desplazar el lugar de las raíces a la derecha, lo cual tiende a disminuir la estabilidad relativa del sistema y el tiempo de asentamiento de la respuesta. La Figura 1-11 muestra ejemplos de los lugares de las raíces que presentan el efecto de la adición de uno o dos polos a un sistema de un único polo (Ogata, 2018).

- **Adición de ceros**

La adición de un cero a la función de transferencia en lazo abierto tiene el efecto de desplazar el lugar de las raíces hacia la izquierda, lo cual tiende a hacer el sistema más estable, y se acelera el tiempo de asentamiento de la respuesta.

La Figura 1-11(a) muestra los lugares de las raíces para un sistema estable con una ganancia pequeña, pero inestable con una ganancia grande. Las Figuras 1-11(b), (c) y (d) muestran las gráficas del lugar de las raíces para el sistema cuando se añade un cero a la función de transferencia en lazo abierto (Ogata, 2018).

**Figura 1-11** (a) Gráfica del lugar de las raíces de un sistema con tres polos; (b), (c) y (d) gráfica del lugar de las raíces que muestra el efecto de la adición de un cero al sistema.

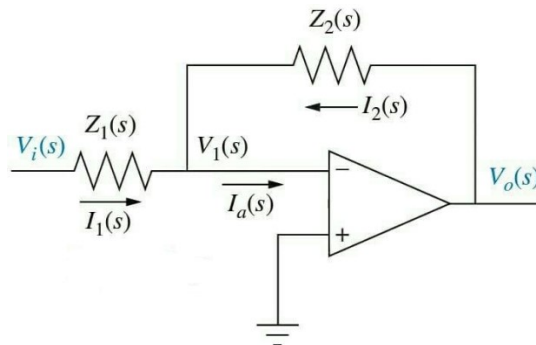


Fuente:(Ogata, 2018)

### 1.6 Diseño de circuito de control activo

Para realizar este diseño se parte de un amplificador operacional inversor configurado para realizar funciones de transferencia, este amplificador cuenta con una entrada  $V_i(s)$  la cual se une con una impedancia  $Z_1(s)$  que va a la terminal negativa del amplificador operaciones, la cual se realimenta mediante la impedancia  $Z_2(s)$  que va a la salida del amplificador donde se genera  $V_o(s)$ . En cuanto a la terminal positiva del amplificador, se pone a tierra ya que el operacional se configuro como inversor, lo cual se evidencia en la Figura 1-12.

**Figura 1-12** Amplificador operacional configurado para realizar función de transferencia










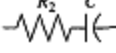
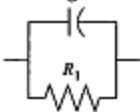

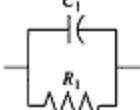
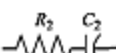
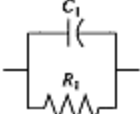
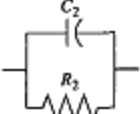
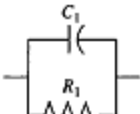
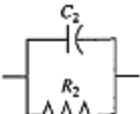
Fuente: (Nise, 2011)

La función de transferencia del circuito de la Figura 1-12 se representa por medio de la siguiente ecuación (1.26)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} \quad (1.26)$$

Permitiendo que mediante la elección de  $Z_1(s)$  y  $Z_2(s)$ , este circuito se pueda utilizar como un bloque de construcción para implementar los compensadores y controladores PI, PD, PID, entre otros como se observa en la Tabla 1-1. (Nise, 2011)

**Tabla 1-1** Diseño de circuitos de control usando amplificadores operacionales

Function	$Z_1(s)$	$Z_2(s)$	$G_r(s) = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$
Gain			$-\frac{R_2}{R_1}$
Integration			$-\frac{1}{RCs}$
Differentiation			$-RCs$
PI controller			$-\frac{R_2}{R_1} \left( s + \frac{1}{R_2 C} \right)$
PD controller			$-R_2 C \left( s + \frac{1}{R_1 C} \right)$
PID controller			$-\left[ \left( \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \right) + R_2 C_1 s + \frac{1}{R_1 C_2} \right]$
Lag compensation			$-\frac{C_1}{C_2} \left( \frac{s + \frac{1}{R_1 C_1}}{s + \frac{1}{R_2 C_2}} \right)$ where $R_2 C_2 > R_1 C_1$
Lead compensation			$-\frac{C_1}{C_2} \left( \frac{s + \frac{1}{R_1 C_1}}{s + \frac{1}{R_2 C_2}} \right)$ where $R_1 C_1 > R_2 C_2$

Fuente: (Nise, 2011)

## **2. Metodología**

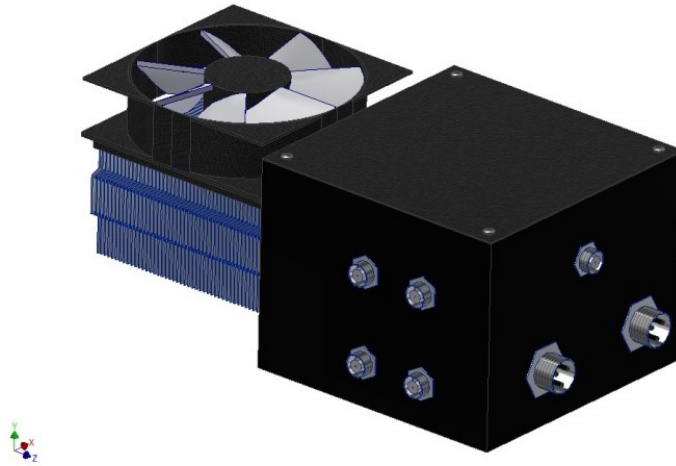
### **2.1 Diseño, implementación y adecuación de la estructura física de la planta**

El proyecto desarrollado consiste en la construcción de una planta de caracterización de SiPM con control de temperatura. Para lo cual se determinaron los siguientes partes que componen la planta.

- Caja oscura
- Optical signal
- SiPM case
- Celda de Peltier case
- Sensores de temperatura case
- SiPM output
- Sensores de temperatura output
- Conector blazing

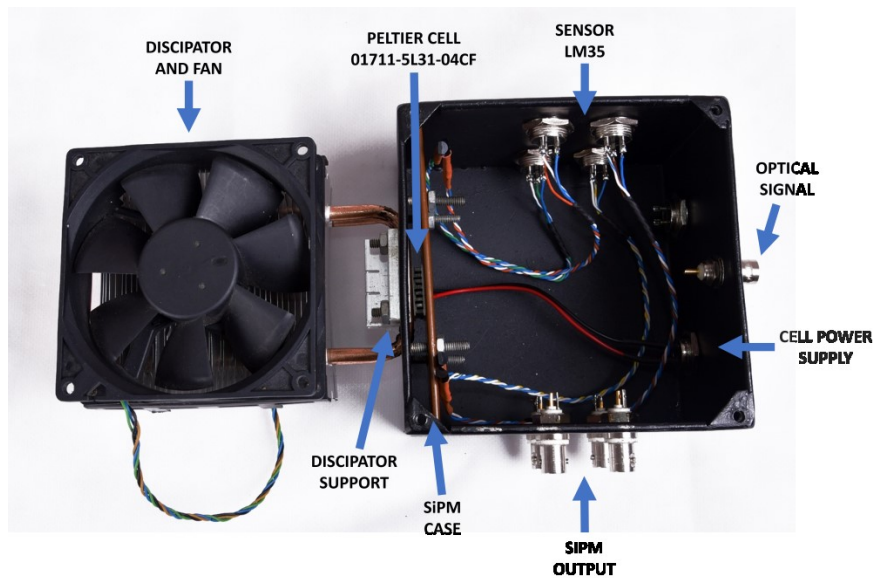
#### **2.1.1 Diseño CAD de la planta**

Con base, a los componentes de la planta se realizó el diseño. La estructura planteada fue diseñada pensando poder controlar la fuente de luz incidente y la temperatura en dos puntos distantes. Otro aspecto que se tuvo en cuenta fue diseñar una planta que permitiera reemplazar cualquier elemento o dispositivo con facilidad por lo cual para la instalación del disipador y los elementos de anclaje internos se ubicaron tornillos fijos y para los dispositivos electrónicos conectores de chasis. Los planos de este diseño se pueden ver en el Anexo 1.

**Figura 2-1** Diseño CAD de la planta de caracterización

Fuente: Imagen propia

## 2.1.2 Elementos que componen la planta

**Figura 2-2** Elementos que componen la planta

Fuente: Imagen propia

- Caja de aislamiento de 12 x 12 x 9.2 cm
- Actuador (celda de Peltier 1711-5L31-04CF)
- Disipador y ventilador Cooler master T2
- 4 Sensores de temperatura (LM35)
- Lámina de cobre de 0.3mm y 0.5mm de espesor y de 11.57 x 5cm

- 5 Conectores BNC hembra aislados de masa
- 4 Conectores de panel hembra de tres pines (conectores tipo blazing)
- 2 Conector de panel hembra de dos pines (conectores tipo blazing)
- Elementos de anclaje(Tornillos y Tuercas)

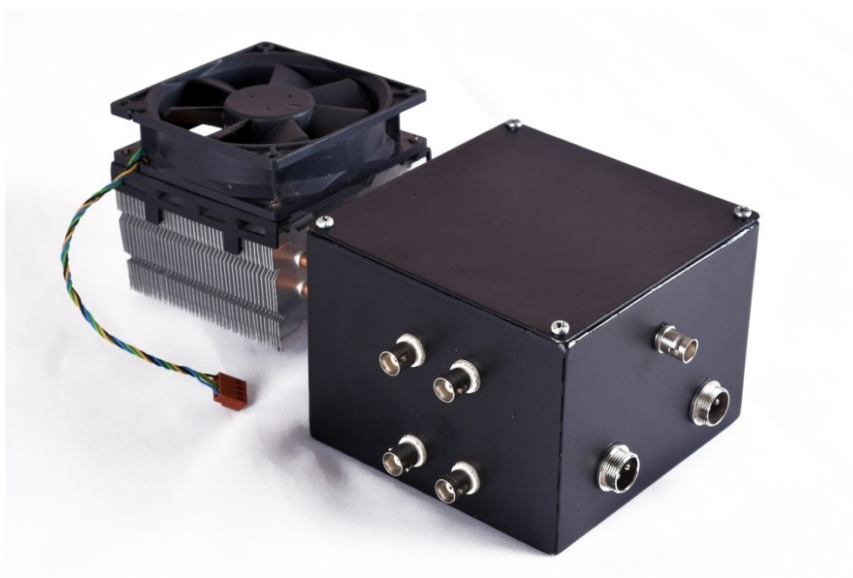
### 2.1.3 Implementación de la planta

El desarrollo de la planta se realizó en tres etapas. La primera fue el proceso de elaboración de la caja con las dimensiones y las características establecidas en el diseño, esta caja se hizo con láminas galvanizadas la cual permitía ser doblada, soldada y pintada de tal forma que quedara completamente sellada y oscura en el interior.

La segunda etapa consistió en la ubicación de los elementos de anclaje para lo cual se ubicaron cuatro tornillos tanto para el disipador como para la lámina de cobre, dado que se buscaba que cualquier pieza de la plataforma pudiera ser cambiada con facilidad se soldaron los tornillos y se cubrieron los puntos de soldadura con masilla para tener un mejor acabado.

En la tercera etapa se abrieron los huecos para los conectores que permitirían la comunicación de los dispositivos ubicados dentro de la caja con los de afuera permitiendo dejar la planta completamente aislada del exterior.

**Figura 2-3** Planta de caracterización



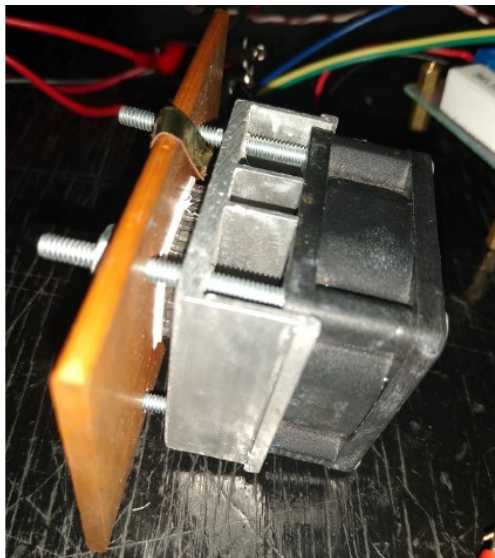
Fuente: Imagen propia

## 2.2 Caracterización de componentes electrónicos

### 2.2.1 Adquisición de datos

Inicialmente se planteó realizar una caracterización individual de los elementos, es decir, caracterizar inicialmente los sensores LM35 exponiéndolos a variaciones de temperatura donde se mediría la tensión de salida y se determinaría la ecuación de relación, para posteriormente hacer el mismo procedimiento con la celda de Peltier, pero en este caso se expondría la celda de Peltier a variaciones de tensión y se mediría la corriente y la temperatura utilizando los sensores LM35 previamente caracterizados y determinar la ecuación de relación. Sin embargo al momento de realizar las pruebas se determinó que no se contaba con el material necesario por lo cual se decidió caracterizar inicialmente la celda Peltier utilizando cinco multímetros diferentes con su respectiva termocupla, para lo cual se desarrolló una plataforma adicional la cual está compuesta por un ventilador, un disipador, una celda de Peltier y una lámina de cobre como se observa en la Figura 2-4. Se realizaron variaciones de tensión partiendo de 0.07 V hasta 3.5 V con incrementos de 0.07V con un ambiente controlado a 23°C dado que las condiciones del laboratorio no permitió tener una temperatura ambiente inferior.

**Figura 2-4** Plataforma experimental

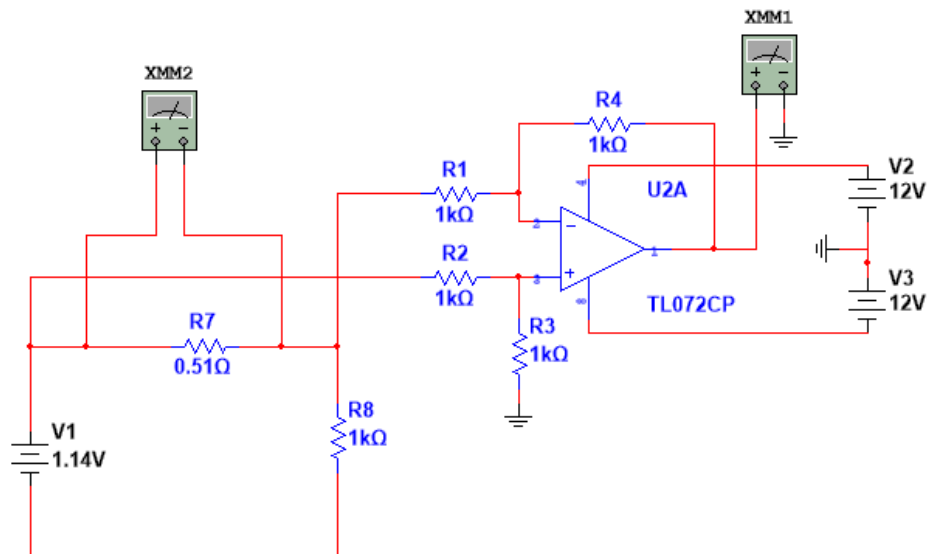


Fuente: Imagen propia



Luego de este proceso se buscó corroborar la información obtenida mediante la digitalización de las variables para esto se colocó una resistencia de shunt  $0,51\ \Omega$  en serie con la celda de Peltier logrando de esta manera medir la tensión que llega a la celda de Peltier. En cuanto a la corriente se utilizó un amplificador operacional (op-amp), en este caso el TL072 como se observa en la Figura 2-5 al que entra la tensión de cada pin de la resistencia y se realizaba un divisor de voltaje con ganancia unitaria para determinar la tensión que cae en la resistencia y de esta manera la corriente de sistema que será equivalente a la división de la tensión y el valor de la resistencia, adicionalmente se midió la tensión de salida de los sensores LM35.

**Figura 2-5** Circuito resistencia de shunt



El valor entregado por el Op-amp, la tensión que llega a la celda de Peltier y la tensión entregada por los LM35 se envía por medio de un ADC ADS1115, el cual toma los valores y los convierte en valores digitales que pueden ser leídos por la Raspberry Pi 3 mediante un código en Python que convierte los valores digitales en decimales y permite observar la corriente y tensión de la celda de Peltier junto con la tensión del sensor. Estas pruebas fueron realizadas dos veces en temperaturas controladas, inicialmente con una temperatura ambiente de  $23^\circ$  y posteriormente con temperatura ambiente de  $27^\circ\text{C}$  dado que al momento de realizar la caracterización de la planta la temperatura ambiente en Villavicencio oscilaba en  $32^\circ\text{C}$  y era difícil llegar a  $23^\circ\text{C}$ , motivo por el cual fue necesario repetir las pruebas de la caracterización de la celda con el fin de tener la misma temperatura de caracterización.

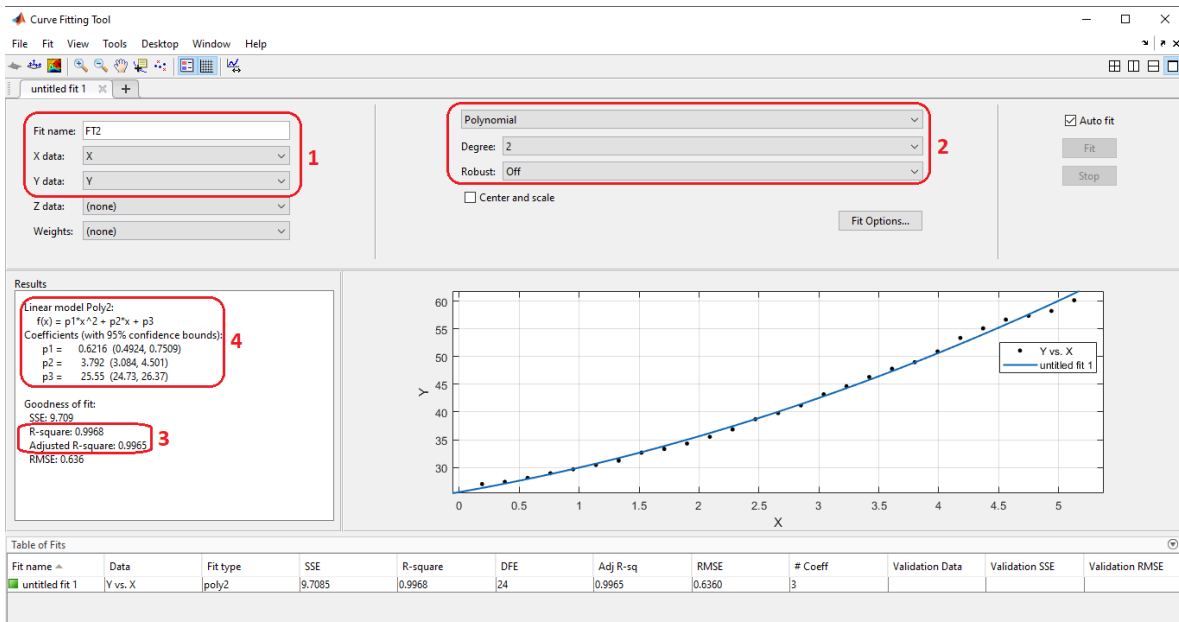
## 2.2.2 Análisis de resultados

Se observó que las gráficas presentaban comportamiento cuadrático por lo cual se utilizó un ajuste polinómico de segundo orden de mínimos cuadrados el cual permite determinar los coeficientes de la ecuación (1.4).

Para realizar esto se determinó el promedio de la temperatura, tensión de la celda, tensión de la fuente (tensión con que se alimentó la celda) y corriente de la celda, obtenidas en cada muestra con el fin de conocer las siguientes relaciones: tensión de la celda-temperatura, corriente de la celda-temperatura y tensión de la fuente-temperatura. Con esta información se determinaron las matrices correspondientes a cada ecuación de relación mediante la ecuación (1.7).

Para corroborar que los datos y el modelo obtenido son correctos, se utilizó la herramienta Curve Fitting Toolbox™ (cftool) que proporciona MATLAB la cual, permite encontrar funciones para ajustar curvas y superficies a los datos. Puede, realizar un análisis de regresión utilizando la biblioteca de modelos lineales y no lineales que se proporcionan o especificar sus propias ecuaciones personalizadas. La biblioteca proporciona parámetros de resolución optimizados y condiciones de inicio para mejorar la calidad de sus ajustes.

**Figura 2-6** Curve Fitting Tool



Fuente: Imagen propia

Se cargan las variables a las cuales se les quiere determinar la ecuación de relación en el numeral uno y en el numeral dos se elige el tipo de ecuación que se desea, el sistema automáticamente ajusta la ecuación y muestra la curva de ajuste junto a los coeficientes en el numeral cuatro y el porcentaje de efectividad del ajuste realizado que se muestra en el numeral tres.

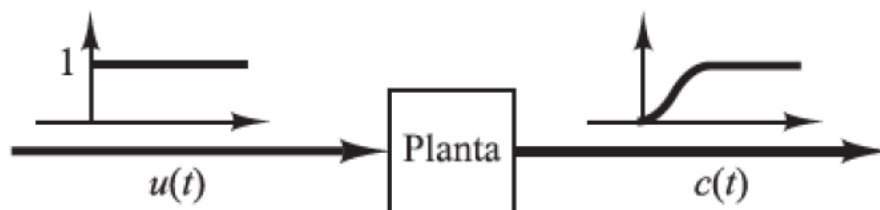
## 2.3 Caracterización y modelización de la planta

### 2.3.1 Identificación de la planta

Esta fase es una de las más importantes, ya que se tiene el objetivo de obtener un modelo matemático que represente con exactitud el comportamiento del sistema. Esta identificación se realizó aplicando varias señales de entrada para adquirir datos y realizar unas curvas de respuesta como se muestra en la Figura 2-7. También es importante tener en cuenta lo siguiente sobre la señal de entrada:

- La señal de entrada debe generar suficiente información para aportar un cambio a la salida.
- La entrada no debe estar al máximo, para no llevar el sistema a un punto de funcionamiento al límite.
- La relación que puede existir por el ruido ambiente generado.
- Tener en cuenta en este caso la temperatura ambiente

**Figura 2-7** Respuesta a un escalón unitario de una planta



Fuente: (Ogata, 2018)

### 2.3.2 Adquisición de datos

Después de tener en cuenta los parámetros anteriores, se ubicaron todos los conectores de la planta y se diseñó un circuito para unir todos los sensores y obtener la señal de cada uno de manera independiente. Para medir la tensión y corriente de la celda se utilizó el mismo circuito de la caracterización de la celda, adicionalmente se utilizó un divisor de

voltaje para determinar la tensión de la fuente de alimentación, ya que esta se requiere para la modelización de la planta.

Para la digitalización de los datos se utilizó la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments USB-6211 DAQ multifunción de 16 bits, con una tasa de muestreo de 250k muestras por segundo, a la que se conectaron todas las señales que posteriormente se almacenaron en Matlab con la aplicación Analog Input Recorder, ya que de esta manera se podía obtener una medida confiable del tiempo de muestreo.

### 2.3.3 Análisis de la respuesta presentada por la planta

Este método gráfico es un primer ejercicio de aproximación a los valores de un sistema de primer orden que se utiliza para comparar los valores de la herramienta IDENT de Matlab, por lo que se plantea como un simple ejercicio académico.

Como la respuesta de la planta fue una respuesta transitoria para un modelo de primer orden se pueden realizar simples cálculos para determinar la función de transferencia del sistema, como es parecido a un sistema de primer orden con retardo se puede utilizar el siguiente modelo (Alfaro et al., 2007)(Ogata, 2018):

$$G(s) = \left( \frac{K(e^{-Ls})}{1 + Ts} \right) \quad (2.1)$$

Después de identificar las constantes para este tipo de sistema, se hallaron mediante los cálculos descritos en las ecuaciones (2.2), (2.3) y (2.4). Para lo cual, se definieron la respuesta de entrada escalón como  $u(t)$ , y la salida que es la curva de respuesta como  $c(t)$  (Alfaro et al., 2007).

Ahora respecto a cada una de las gráficas se van a hallar los valores de las constantes de Ganancia, Tiempo y Retardo:

$$K = \frac{c(t)}{u(t)} \quad (2.2)$$

T corresponde al punto del 63.2% de la señal que es igual a:

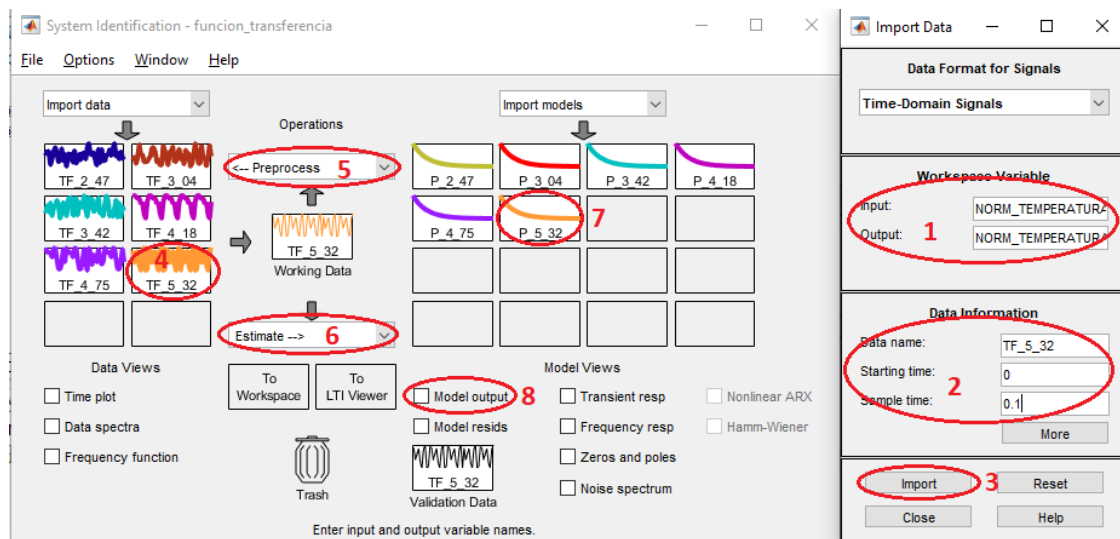
$$\Delta c(t) * 63.2\% \quad (2.3)$$

L corresponde al punto del 10% de la señal de salida que es igual a:

$$\Delta c(t) * 10\% \quad (2.4)$$

Para corroborar que los datos y el modelo obtenido son correctos, se utilizó la herramienta System Identification Toolbox™ (ident) que proporciona MATLAB que sirve para la identificación de sistemas por medio del procesamiento de datos y entrega las mismas constantes.

**Figura 2-8** System identification (IDENT)



Fuente: Imagen propia

En la Figura 2-8 observa el proceso que se realizó para agregar cada una de las señales a IDENT con su respectiva entrada escalón luego se hizo la estimación donde entregaba los valores para la función de transferencia, y por medio de model output se verifica su efectividad. En la Figura 2-9 se verifica que la función de transferencia sea adecuada a un sistema de primer orden con retardo, después se le da click al botón Estimate, finalmente muestra los valores de K (Constante Proporcional), Tp1 (Constante de Tiempo) y Td (Constante de Retardo) (The MathWorks, 2019).

**Figura 2-9** Process Model de IDENT

The screenshot shows the 'Process Models' window in the IDENT software. The interface is divided into several sections:

- Transfer Function:** Displays the equation  $\frac{K \exp(-T_d s)}{(1 + T_p1 s)}$ . A red circle labeled '2' highlights this equation.
- Poles:** Includes a dropdown menu set to '1' and 'All real'. A red circle labeled '1' highlights the 'Delay' checkbox, which is checked.
- Parameters Table:**

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	0.99515	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	339.0321	Auto	[0 291740.9]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	3	Auto	[0 3]
- Disturbance Model:** Set to 'Order 1'. A red circle labeled '3' highlights this dropdown.
- Initial condition:** Set to 'Auto'.
- Covariance:** Set to 'Estimate'.
- Buttons:** 'Estimate' (highlighted with a red circle labeled '4'), 'Continue', 'Close', and 'Help'.

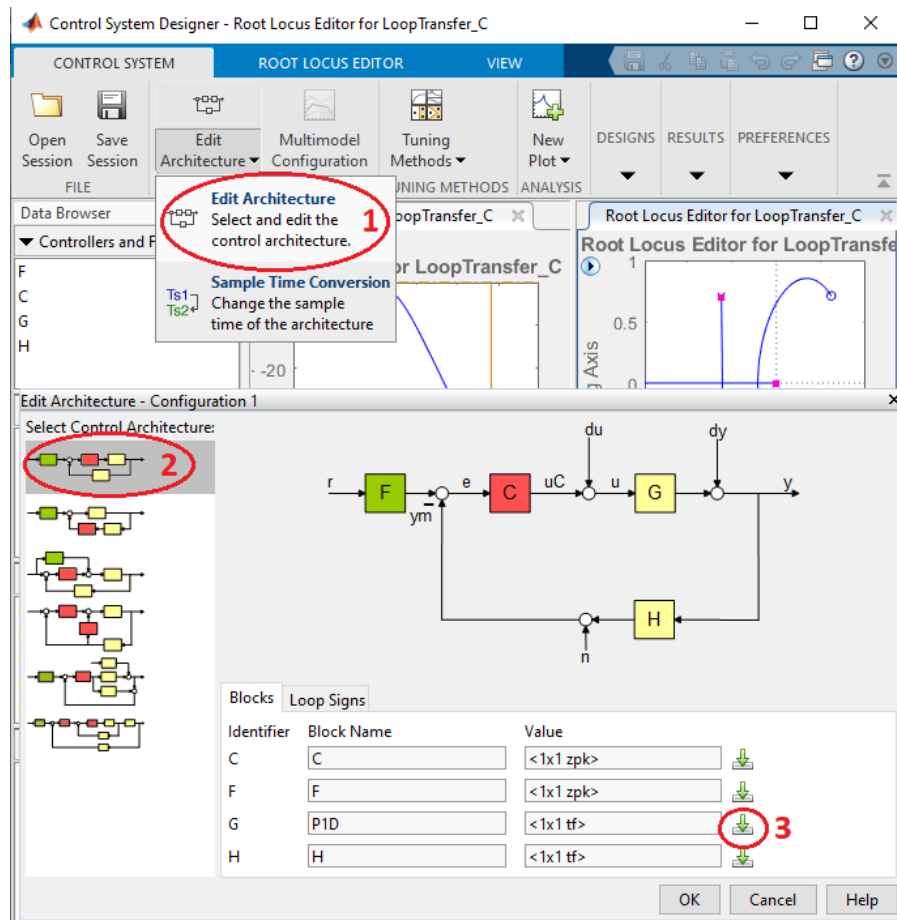
Fuente: Imagen propia

En el próximo capítulo se presenta la tabla con cada uno de los valores obtenidos tanto del proceso realizado manualmente y con IDENT donde se hizo un promedio para calcular los valores finales.

## 2.4 Diseño e implementación de un sistema de control automático

El diseño del sistema de control se realizó por medio de la herramienta Control system designer (SISOTOOL) la cual se le cargo la función de transferencia de la planta como se observa en la Figura 2-10, posteriormente se diseñó el control agregando al sistema la cantidad necesaria de polos y ceros según el tipo de sistema que se deseaba realizar (The MathWorks, 2019).

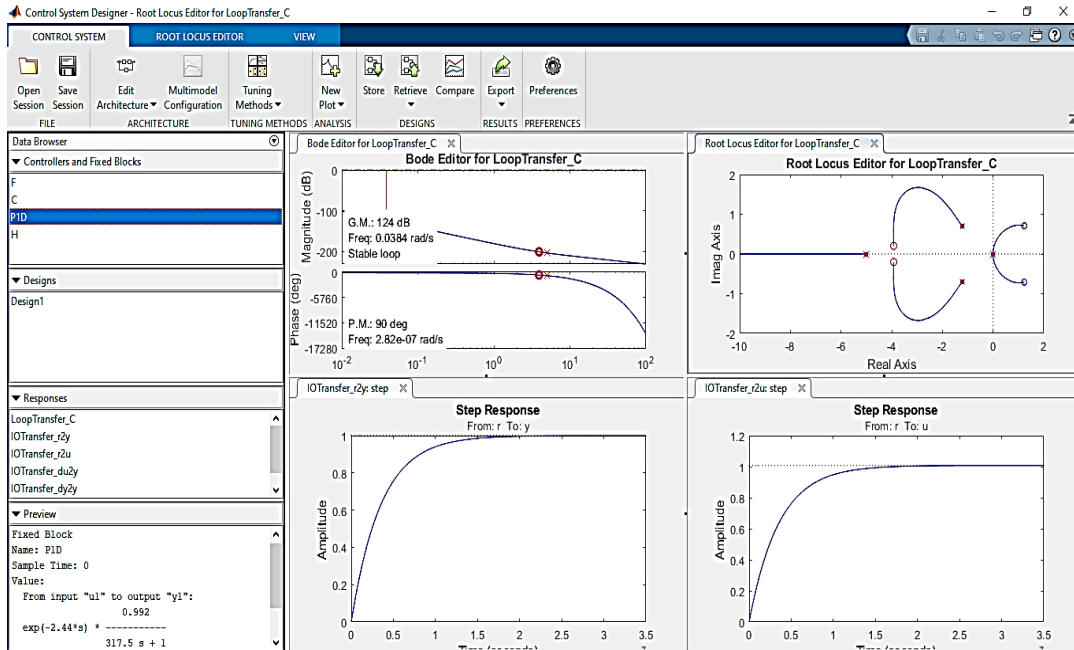
**Figura 2-10** Control system designer (SISOTOOL)



Fuente: Imagen propia

Cómo se observa en Figura 2-11, se generan unas ventanas donde se muestra la respuesta en frecuencia de la planta, la respuesta al paso escalón y el lugar de las raíces en el cual se realiza el diseño del control donde se agregan los valores requeridos y se mueven según convenga en la respuesta del sistema. Adicionalmente se puede agregar una nueva gráfica según se requiera; en el caso de este trabajo se agregó una gráfica, dónde se observa la relación entre la entrada del sistema y salida del controlador lo cual permite saber cómo será el comportamiento del control y qué valores llegaran a la planta, con base, a los límites de alimentación de la celda de Peltier.

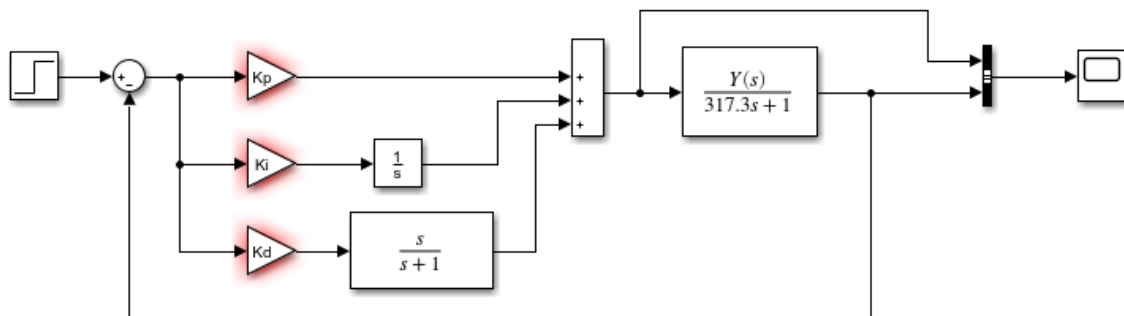
Figura 2-11 Diseño sistema de control PID



Fuente: Imagen propia

Luego se simuló el control diseñado por medio de Simulink para conocer su funcionamiento y las respuesta del sistema como se observa en la Figura 2-12, al cual se le ingresan los valores de  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  generados por el control, los cuales se suman y entregan la acción de control que pasa a la función de transferencia de la planta. Por medio, de un osciloscopio se mide la respuesta del control y la respuesta del sistema lo cual permite verificar cual es el valor de la acción de control y cuál es el valor final del sistema confirmando que llegue al valor ingresado.

Figura 2-12 Simulación del control en Simulink

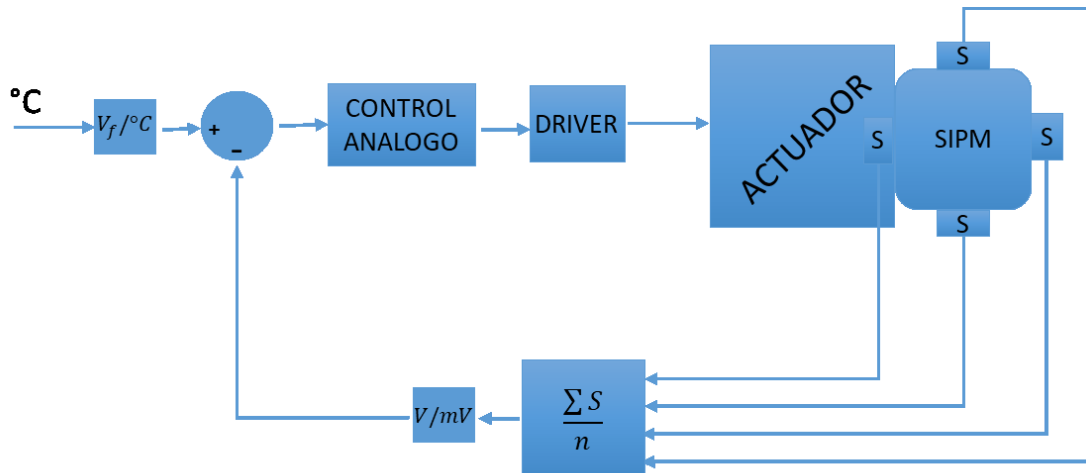


Fuente: Imagen propia



La implementación del control se realizó con base en el diagrama de bloques del sistema de control que se muestra en la Figura 2-13.

**Figura 2-13** Diagrama de bloques del sistema de control automático



Fuente: Imagen propia

Donde el usuario ingresa el valor de la temperatura deseada y se convierte ese valor de  $^{\circ}\text{C}$  a  $\text{V}$ , para luego realizar la diferencia con el valor correspondiente al promedio de los sensores encargados de medir la temperatura que llega a los SiPM. Los sensores entregan un valor en milivoltios, el cual también se convierte en voltios para de esta manera garantizar que la diferencia se realice en las mismas unidades y proporciones. De esta manera se garantiza que el error que ingresa al control sea en voltios. El control analógico se desarrolló por medio de un amplificador operacional configurado para el tipo de control diseñado con base a los criterios de la Tabla 1-1, y las condiciones de diseño; la respuesta de control pasa por el driver el cual se encarga de garantizar que al actuador llegue tanto la tensión como la corriente requerida para que finalmente, este entregue la temperatura deseada por el usuario.



## 3.Resultados

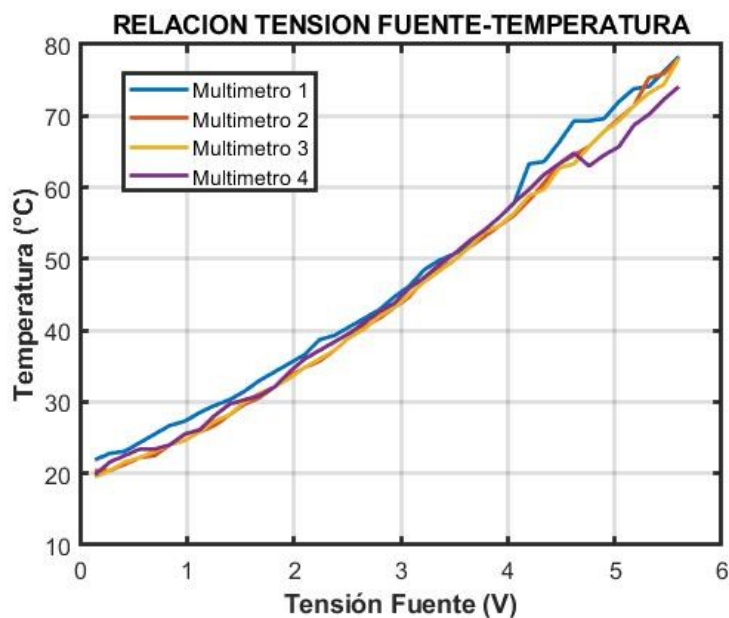
En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en cada sección del capítulo anterior llevadas a cabo durante el desarrollo del proyecto.

### 3.1 Caracterización de los sensores LM35 y el actuador

#### 3.1.1 Muestras tomadas con multímetros

En la Figura 3-1 se observan los datos obtenidos de cada multímetro respecto a la relación tensión de la fuente-temperatura. En el Anexo 2 y 3 se presenta la relación de tensión de celda-temperatura y corriente-temperatura.

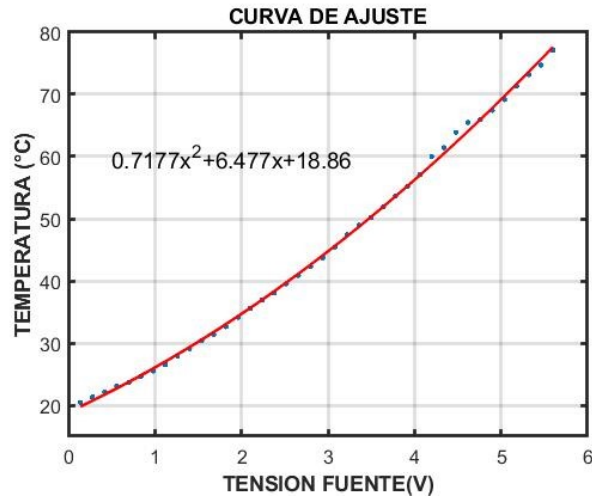
**Figura 3-1** Relación tensión de la fuente con la temperatura medida multímetros



Fuente: Imagen propia

En la Figura 3-1 se observa un comportamiento cuadrático, por lo cual se aplica un ajuste polinómico de segundo orden con la regla de mínimos cuadrados, obteniendo la curva de ajuste y la ecuación que se observa en la Figura 3-2.

**Figura 3-2** Curva de ajuste relación tensión de la fuente con la temperatura medida con multímetros.

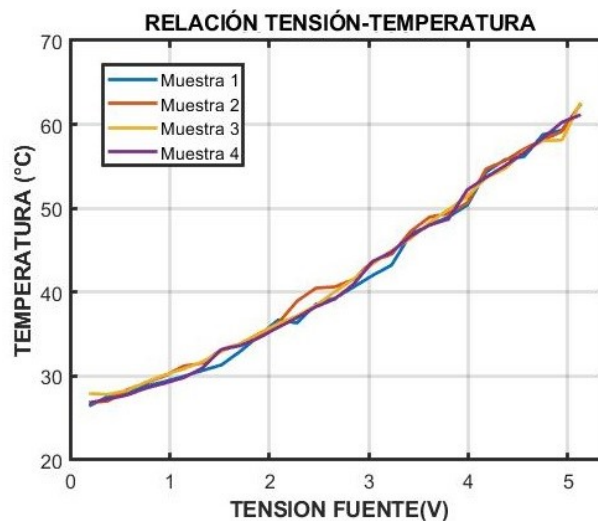


Fuente: Imagen propia

### 3.1.2 Muestras tomadas digitalmente

En la Figura 3-3 se observan los datos obtenidos de cada muestra respecto a la relación tensión de la fuente-temperatura. En los anexos se presenta la relación de tensión de celda-temperatura y corriente-temperatura.

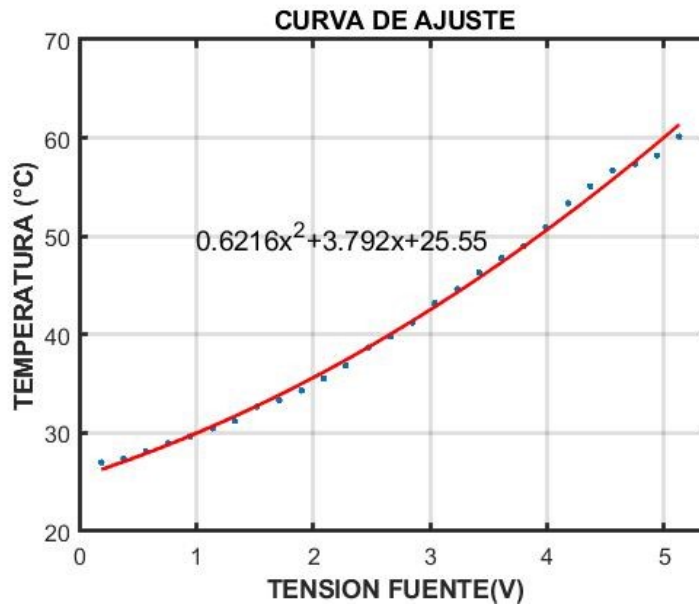
**Figura 3-3** Relación tensión de la fuente con la temperatura medida digitalmente



Fuente: Imagen propia

De igual forma, como se presentó en las muestras tomadas con los multímetros se observa un comportamiento cuadrático, por lo cual se aplica un ajuste polinómico de segundo orden el cual nos permite obtener la curva de ajuste y la ecuación que se observa en la Figura 3-4.

**Figura 3-4** Curva de ajuste de la relación tensión de la fuente con la temperatura medida digitalmente



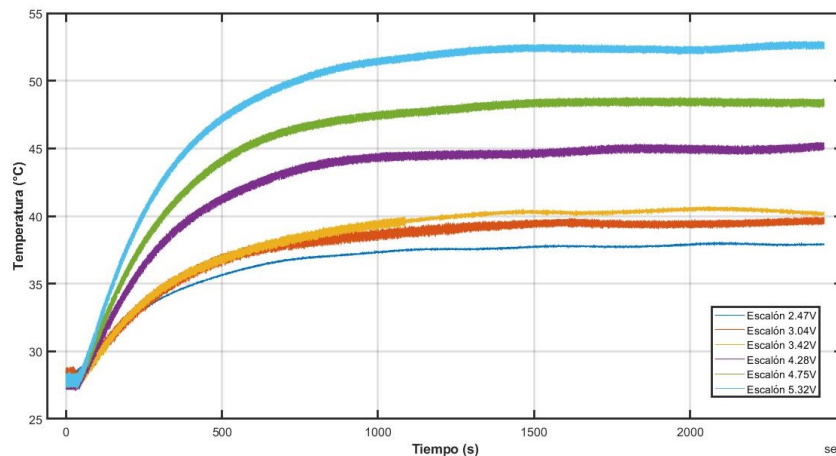
Fuente: Imagen propia

Al realizar una comparación entre la ecuación obtenida de las dos muestras; se observa que son muy similares, ya que la variación de los coeficientes es pequeña y se le puede atribuir a la temperatura ambiente, las muestras tomadas con multímetros solo presentan dos decimales al realizar las medidas, mientras que las pruebas digitales presentan hasta 6 decimales (la precisión del LM35 es de  $\pm \frac{1}{4}$  en temperatura ambiente y  $\pm \frac{3}{4}$  en el rango de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ ), esto último deja entrever un posible error de medida atribuido al sistema de conversión análogo a digital o al proceso de conversión binario a decimal. Con estos últimos se tomaron 500 muestras con cada variación de tensión mientras que con los multímetros solo se tomó una muestra.

## 3.2 Caracterización y modelización de la planta

Ahora para poder analizar mejor los datos y poder trabajar por medio de Matlab, se representaron todas las curvas a diferentes entradas escalón, tomadas en la identificación experimental, estas curvas se muestran en la siguiente Figura 3-5.

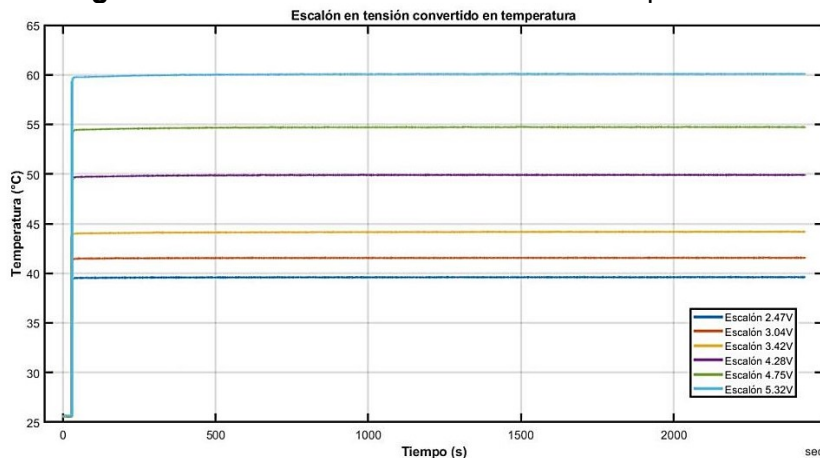
**Figura 3-5** Datos tomados en el laboratorio, para la identificación experimental del modelo de la planta



Fuente: Imagen propia

Como sabemos que los datos obtenidos son por un LM 35 se encuentran en mV por lo cual este valor se convirtió en °C y de igual manera se hizo con los valores del escalón, por medio de la curva de ajuste obtenida en la caracterización como se observa en la Figura 3-6.

**Figura 3-6** Función escalón en razón de temperatura

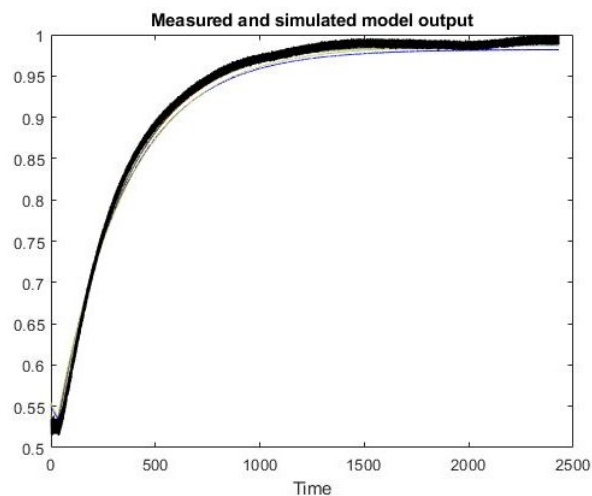


Fuente: Imagen propia

Ahora respecto a cada gráfica se determinaron los valores de las constantes de ganancia, tiempo y retardo, teniendo en cuenta las ecuaciones descritas en 2.3.3. Con estos valores se hizo una tabla presente en el Anexo 4, donde se calculó el promedio para los datos obtenidos por medio de la ecuación ya mencionada y utilizando IDENT.

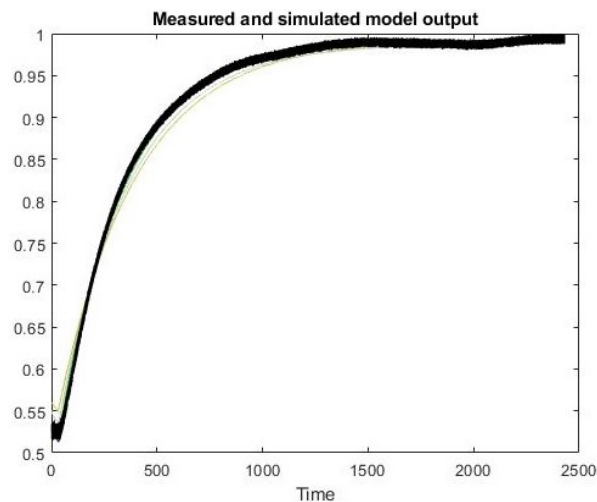
En la Figura 3-7 y Figura 3-8 se observan la respuesta normalizada de la planta para un escalón de 5.32 V con relación al modelo obtenido por medio de cálculos y con IDENT para cada uno de las entradas escalón presentes en la Figura 3-5.

**Figura 3-7** Respuestas obtenidas en la modelización de la planta con valores calculados



Fuente: Imagen propia

**Figura 3-8** Respuestas obtenidas en la modelización de la planta IDENT



Fuente: Imagen propia

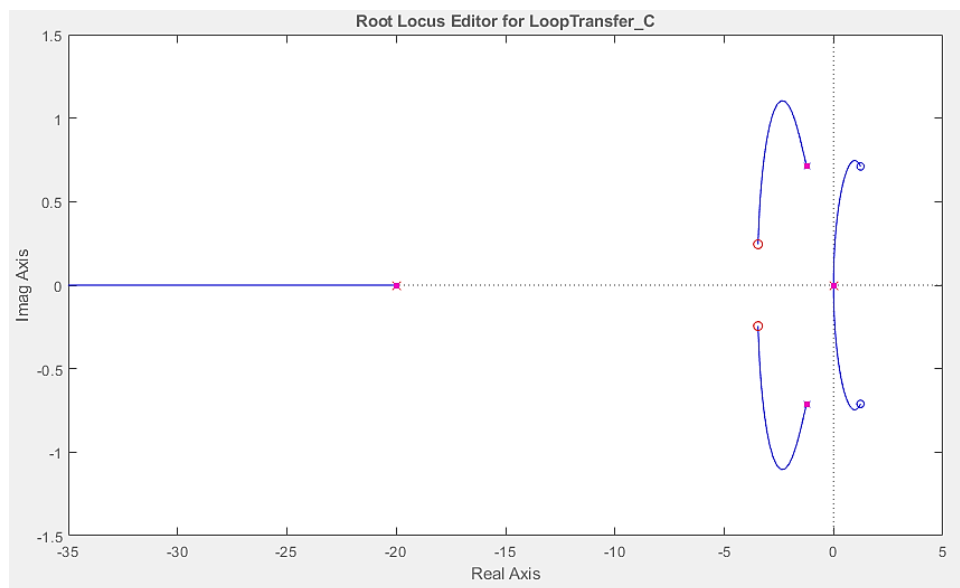
Con valores promedio se hace una respectiva formulación del modelo matemático que es la siguiente: los valores calculados a la izquierda y los valores estimados a la derecha:

$$G(s) = \left( \frac{0.988(e^{-3s})}{1+316.6s} \right) \quad G(s) = \left( \frac{0.992(e^{-2.44s})}{1+317.5s} \right) \quad (3.1)$$

Finalmente haciendo la comparación entre la función de transferencia hallada con los valores calculados, y la función de transferencia estimada por la herramienta IDENT, los valores de constantes muy similares. Sin embargo, se tomó la decisión de utilizar la función obtenida por medio de IDENT. Después se hicieron varias simulaciones de prueba para ver como reaccionaba el sistemas sin controlador en SIMULINK, esto se encuentra en el Anexo 5.

### 3.3 Diseño e implementación del sistema de control automático

**Figura 3-9** Ubicación de los polos y ceros para el diseño de un control PI pseudo D



Fuente: Imagen propia

Para esto se propuso realizar un control PID el cual se realizó por medio de Sisotool para lo cual se agregó un polo en el origen y dos ceros complejos, con base, en la escritura establecida para un PID puro, sin embargo, al realizar esto se observó que no se



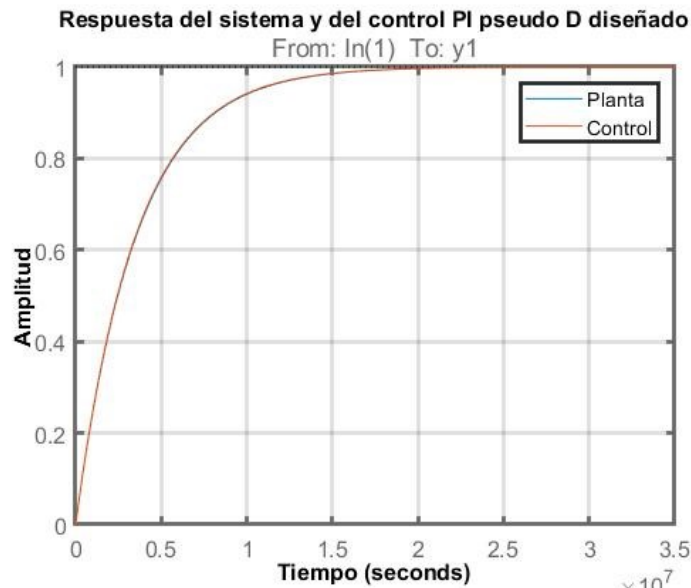
mostraba respuesta en el sistema ni en el control por lo cual se determinó diseñar un control PI pseudo D cuya estructura esta descrita por la siguiente ecuación.

$$\frac{(aK_d + K_p)s^2 + (aK_p + K_I)s + aK_I}{s(s+a)} \quad (3.2)$$

En la que se tienen dos ceros complejos, un polo en el origen y un cero real, el cual se encuentra, lejos del origen como se observa en la Figura 3-9.

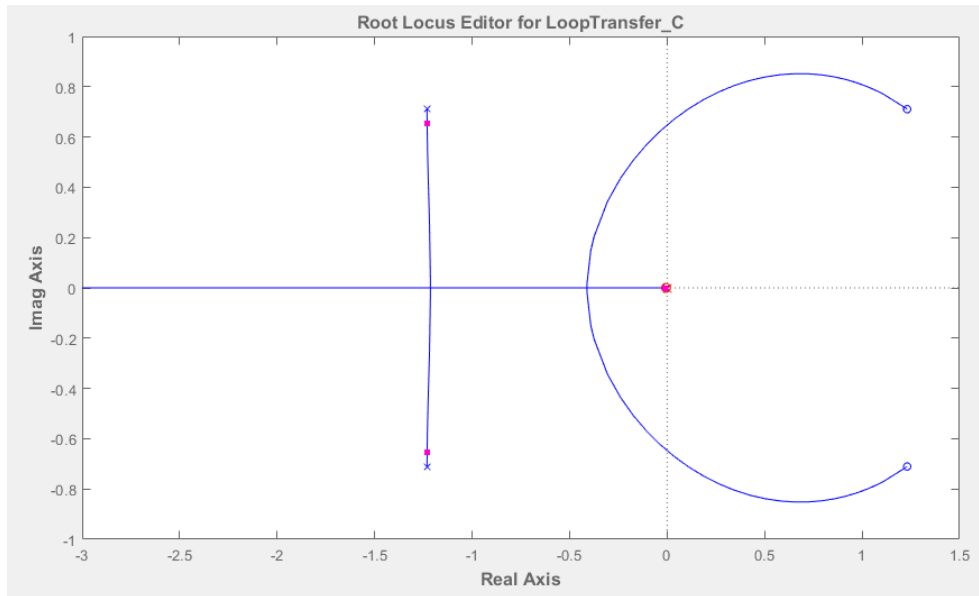
Al agregar estos parámetros en el control se observa en la Figura 3-10, que si bien logra estabilizarse y tener una salida considerable en la acción de control, se demora más tiempo del que tarda con el sistema sin control.

**Figura 3-10** Respuesta del sistema y del control PI pseudo D diseñado



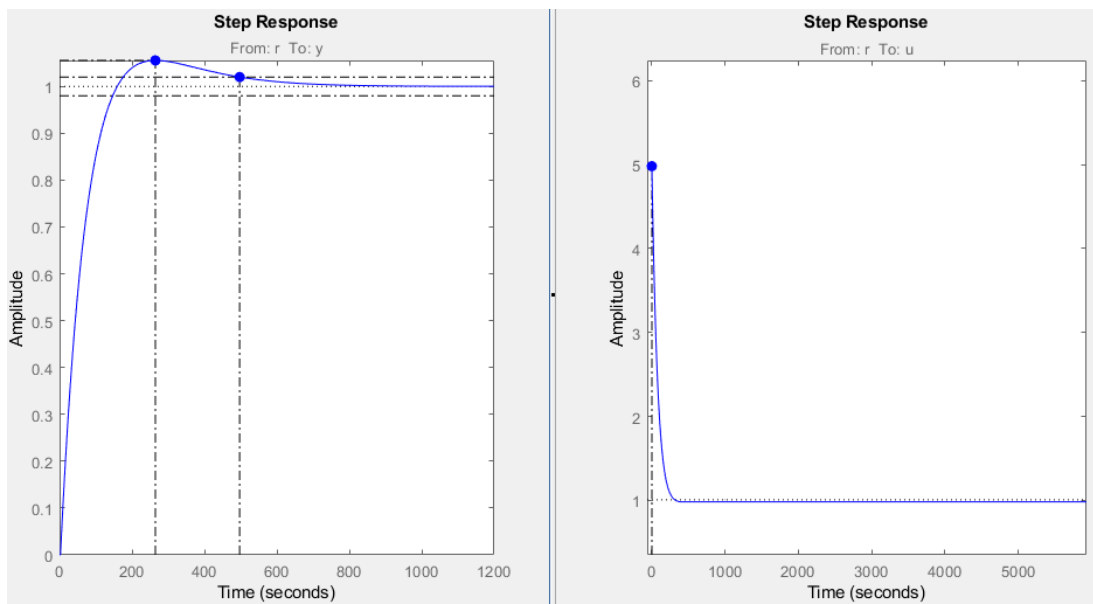
Fuente: Imagen propia

Por esta razón se diseñó un control PI ya que como se sabe este tipo de control minimiza el error y maximiza el tiempo de respuesta, permitiendo de esta manera controlar la respuesta del sistema haciendo que su respuesta sea más rápida y que se logre llegar a la temperatura deseada. El diseño de este tipo de control está compuesto por un polo en origen y un cero que se ubicó en  $-0.0055691$  en como se muestra la Figura 3-11.

**Figura 3-11** Ubicación de los polos y ceros para el diseño de un control PI

Fuente: Imagen propia

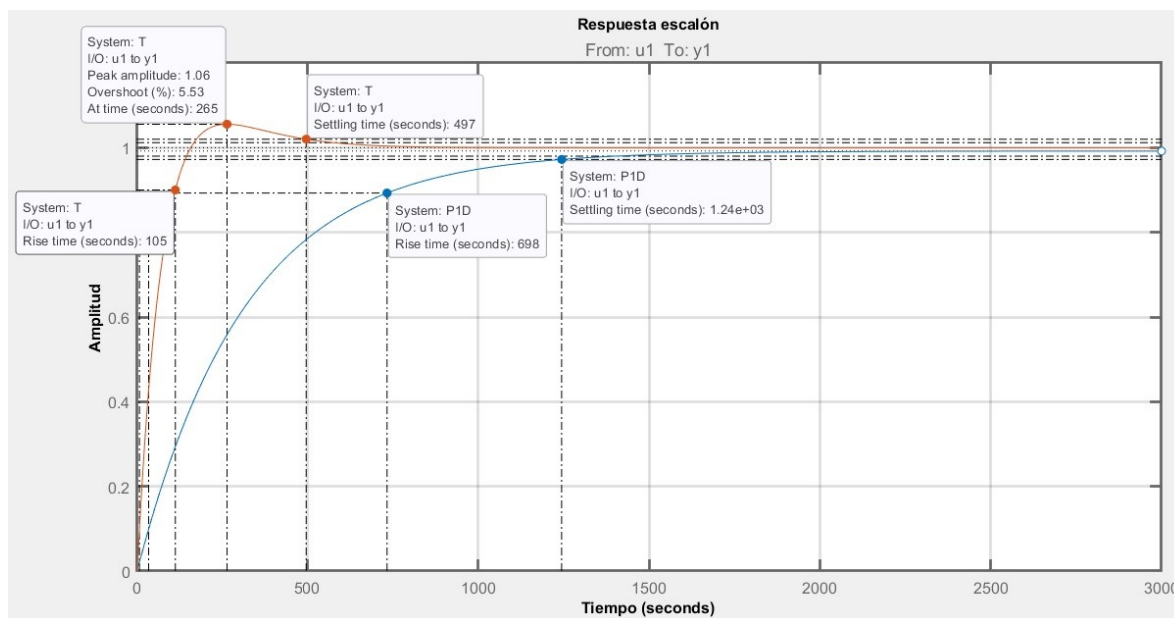
De esta manera se garantizó que la acción de control no sea mayor a 5 de tal manera que la celda no se vea afectada como se muestra en la Figura 3-12

**Figura 3-12** Respuesta del sistema y del control PI con una entrada escalón

Fuente: Imagen propia

En la Figura 3-13 se presentan las mejoras obtenidas en el sistema normalizado ya que evidencia la diferencia entre el sistema expuesto a una entrada escalón sin control y con control, con este último se reduce el tiempo de 1240 segundos a 497 segundos, con un sobrepaso de 5.54%.

**Figura 3-13** Respuesta Escalón planta sin controlador (Azul) y con controlador (Naranja).



Fuente: Imagen propia

Finalmente se muestra la función de transferencia del controlador para poder verificar su estabilidad en lazo cerrado. Después de encontrada la función de transferencia, se hicieron diferentes simulaciones para comprobar el comportamiento de la planta que se presenta en el Anexo 5.

$$\frac{4.9142 (s+0.005569)}{s} \quad (3.3)$$

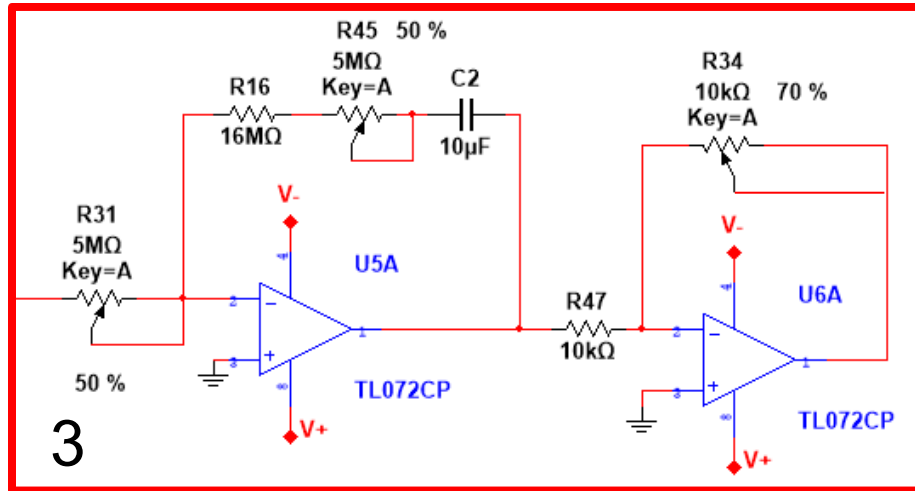
Con esto se procedió a diseñar el control analógico con base, en la información de la Tabla 1-1 y los materiales comerciales, dónde:

$$\frac{R_1}{R_2} = 4.9142$$

$$\frac{1}{R_2 C} = 0.005569 \quad (3.4)$$

Con un valor de capacitor de  $10\mu\text{F}$  se obtiene una  $R_2$  igual a  $17.957\text{M}\Omega$  y un  $R_1$  igual a  $3.654\text{M}\Omega$  por lo cual, se propone entonces el siguiente circuito de control PI Figura 3-14.

**Figura 3-14** Circuito analógico de un controlador PI



Fuente: Imagen propia

En este circuito se propone poner en  $R_1$  un potenciómetro de  $5\text{M}\Omega$  y en  $R_2$  poner una resistencia de  $16\text{M}\Omega$  en serie con un potenciómetro de  $5\text{M}\Omega$  permitiendo de esta manera ajustar el control PI al momento de ser implementador garantizando de esta forma su fidelidad.

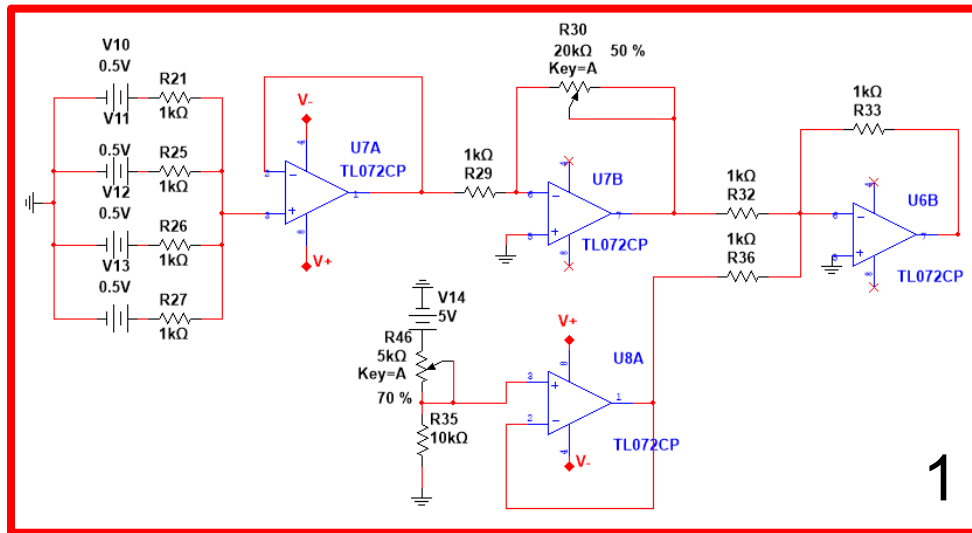
Para implementar el sistema de control analógico automático, se debe cumplir con todo el diagrama de bloques de la Figura 2-13, por lo que se dividió el sistema en 4 bloques entre los cuales se encuentra el control PI descrito en la Figura 3-14, siendo, este el tercer bloque. Como primer bloque tenemos el promedio de la temperatura medida por los sensores LM35; para representarlos se pusieron cuatro fuentes de tensión, cada una equivalente a un sensor, las cuales entran a un sumador no inversor con realimentación por el terminal negativo; el cual determina el promedio de estos. Sin embargo, como se sabe los sensores LM35 entregan su respuesta en mV y es necesario convertirla a V por lo cual se determinó la ecuación de relación entre los mV entregados por los sensores y la tensión de la fuente en el Anexo 6 obteniendo la ecuación (3.5).

$$17.77x - 3.86 \quad (3.5)$$

Dicha ecuación se representa de forma analógica con los Op-amp en paralelo (Oppenheim et al., 2009), la parte superior representa  $17.77x$  siendo  $x$  el promedio en mV

de los sensores y en la parte inferior los 3.86 que posteriormente ingresan a un sumador inversor con ganancia unitaria el cual entrega el valor en V de la medida entregada por los sensores Figura 3-15.

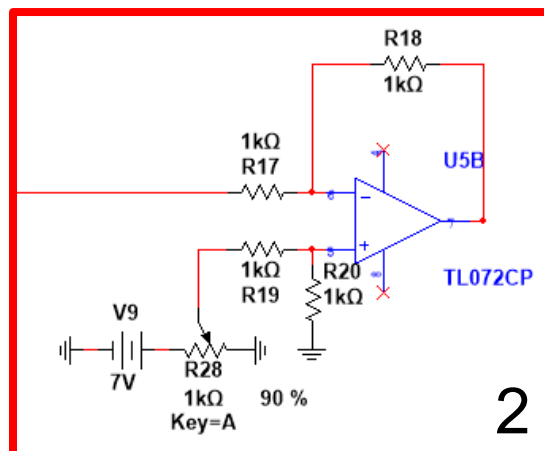
**Figura 3-15** Promedio y conversión a voltios de los sensores LM35



Fuente: Imagen propia

El segundo bloque determina la diferencia de la tensión obtenida de los sensores LM35 y el valor ingresado por el usuario el cual se representa con la fuente de tensión como se observa en la Figura 3-16 (Oppenheim et al., 2009).

**Figura 3-16** Diferencia entre la temperatura medida y la deseada



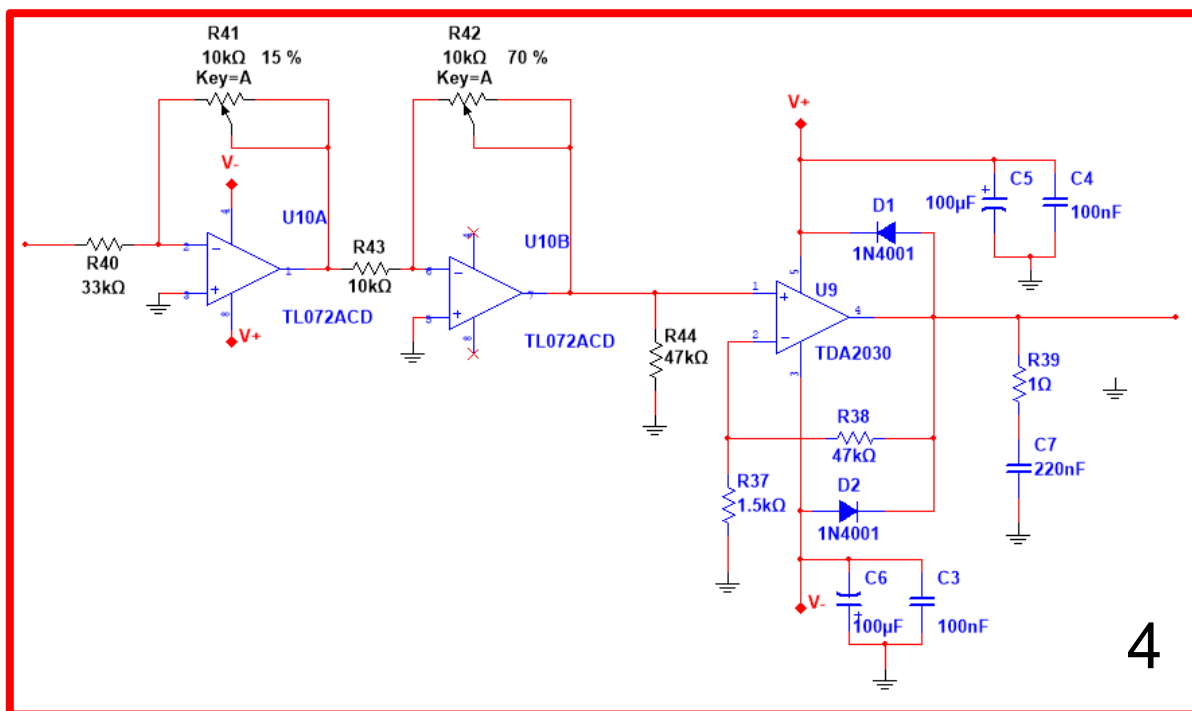
Fuente: Imagen propia

Para facilitar la interacción con el usuario, a futuro debe construirse una interfaz gráfica en la cual, la persona ingrese el valor de la temperatura que desea y por medio de Matlab se

convierta ese valor en tensión, por medio de la ecuación determinada en el Anexo 7 y que este valor se envíe al circuito por medio de la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments Ni USB (6211,6210 y 6215) con las cuales se cuenta en la universidad.

El cuarto bloque corresponde al driver de la celda, el cual está diseñado con un TDA2030 (Microelectronics, 1993) que se encarga de entregar la tensión y corriente requerida por el sistema; esto en cuanto a la simulación, sin embargo, se realizaron las pruebas y se observó que se debía realizar un ajuste al valor ingresado, para garantizar que saliera el mismo valor de tensión por lo cual se colocaron los Op-amp previos, los cuales amplifican o atenúan la señal ingresada según sea necesario, y se colocó un potenciómetro en cada Op-amp para ajustar la ganancia de cada uno como se observa en la Figura 3-17.

**Figura 3-17** Driver de la celda de Peltier



Fuente: Imagen propia

El circuito completo se encuentra en el Anexo 8.

## 4. Conclusiones y Recomendaciones.

La planta se diseñó buscando que la estructura quedara lo más pequeña posible, sin embargo, al momento de adecuar todos los componentes en el interior, se observó que esta contaba con un espacio muy reducido dificultando el proceso de acondicionamiento. Adicionalmente durante el proceso se observó que para tener mejor rendimiento de la planta se requería instalar más celdas de Peltier, Esto se veía limitado por el espacio reducido.

En cuanto a la caracterización de los dispositivos; cabe mencionar que no se pudo cumplir con la norma NTC 4476, que establece 20°C, como temperatura para calibrar termómetros. Por lo tanto, se caracterizaron los dispositivos y demás a la temperatura ambiente lograda en el laboratorio de detectores (LabDet) Villavicencio. Siendo esta la mejor opción existente.

Otra dificultad es que no se cuenta con termómetros calibrados, por lo que no se pudo realizar la calibración de sensores con dispositivo patrón. En cuanto a la caracterización de la celda se pudo realizar de la manera planteada permitiendo medir y analizar todas las variables propuestas sin embargo, se observó un posible error de medida atribuido al sistema de conversión análogo a digital o al proceso de conversión binario a decimal.

La caracterización de la planta presenta cierto ruido en las muestras, que se le atribuye a unas fallas eléctricas en el LabDet. Sin embargo, con estas pruebas fue posible tener un aproximado del modelo, para realizar el diseño del sistema de control que inicialmente se planteó: PID, pero que al momento de diseñarlo no cumplía con los requerimientos de diseño lo cual obligo a que se realizara un PI, con error actual igual a cero, tiempo de estabilización de 497 y sobrepaso de 5.55%, sin embargo, con este control los resultados que se obtuvieron son adecuados y suficientes para la caracterización de SiPM.

La pandemia que se produjo por el SARS-CoV -2 impidió el acceso a los laboratorios por lo cual fue necesario realizar modificaciones al trabajo para evitar toda actividad experimental, de implementación o trabajo con equipos o insumos de la universidad.

Se realizó la caracterización de la planta con las muestras que se alcanzaron a tomar, las cuales como ya se mencionó tenían ruido, ocasionando que el trabajo realizado no sea el apropiado.

En cuanto al diseño del controlador analógico se tuvo que realizar por medio de simulaciones, lo que al momento de ser implementado puede generar variaciones en su respuesta, sin embargo, se espera que con los potenciómetros propuestos se pueda ajustar la respuesta de este.

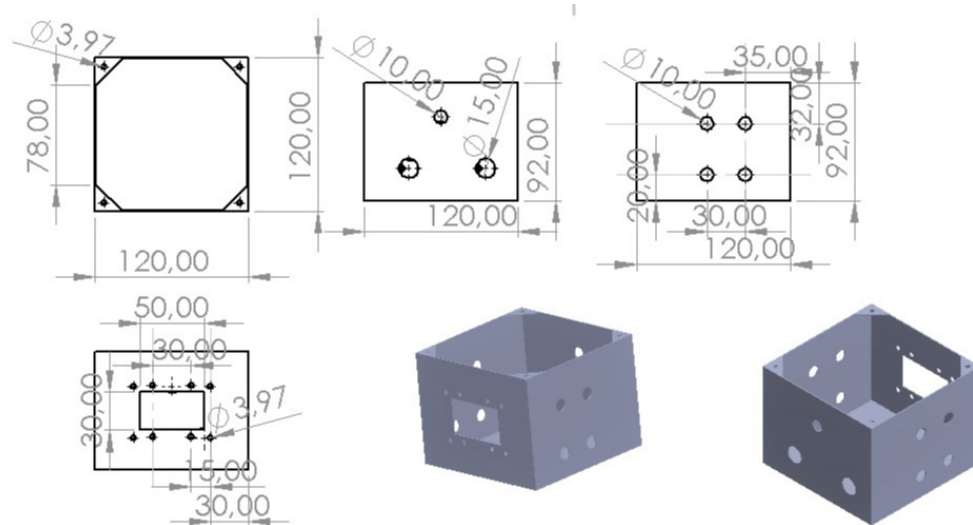
## 4.1 Recomendaciones

Se recomienda realizar una plataforma de control de temperatura con unas dimensiones mayores que permita instalar más de una celda de Peltier para de esta manera variar la temperatura en valores inferiores a la temperatura ambiente y realizar una mejor caracterización de los SiPM y un mejor rendimiento del control de temperatura por medio de la implementación de un control PID el cual garantizara su eficiencia. Además para mejorar la interacción con el usuario, se recomienda diseñar una interfaz gráfica que permita al usuario, editar, medir y observar diversos parámetros del SiPM, variables del proceso de caracterización, tales como: Referencia, Marca,  $V_{BIAS}$ , Temperatura deseada y gráfica de temperatura. De esta forma se mantendrá aislada la planta y se obtendrán mejores resultados.



# A. Anexo 1: Planos planta de temperatura

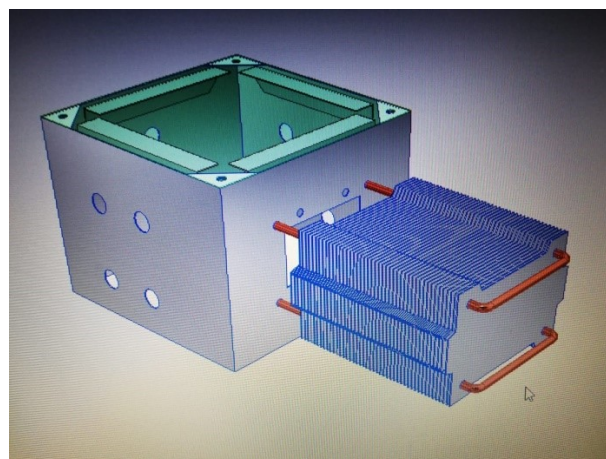
Figura A-1 Plano de la planta de temperatura



Fuente: Imagen propia

En la parte frontal de la planta están ubicados dos conectores de panel hembra y un conector BNC hembra aislado de masa por medio de los cuales se alimentará la celda de Peltier, los sensores de temperatura y el LED respectivamente. En el lateral derecho se encuentran ubicados cuatro conectores BNC hembra aislados de masa los cuales permiten recibir la señal de salida de los SiPM y en el lateral izquierdo se encuentran ubicados de igual forma cuatro conectores de panel los cuales permiten recibir la señal de salida de los sensores de temperatura.

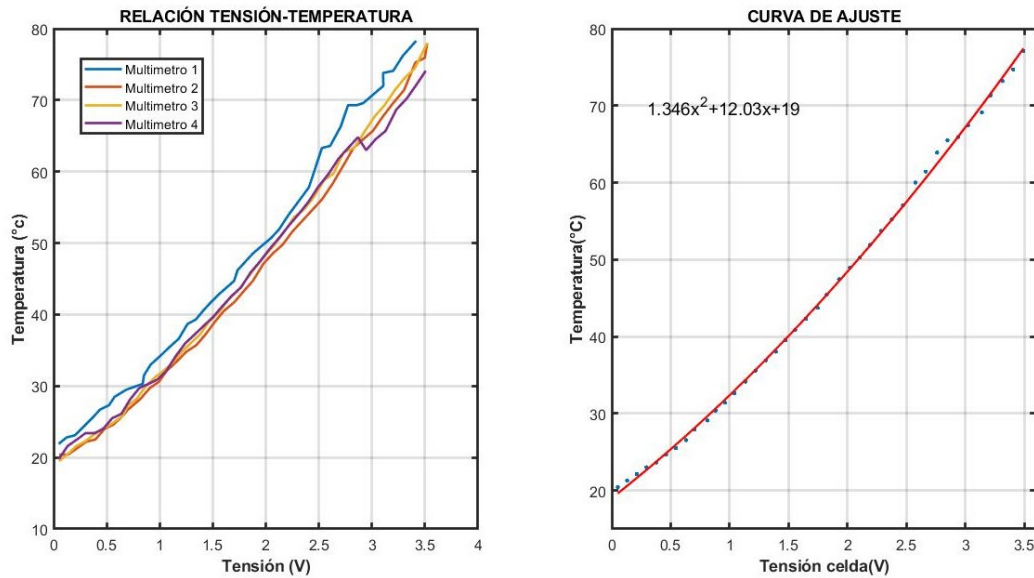
Figura A-2 Imagen 3D de la planta



Fuente: Imagen propia

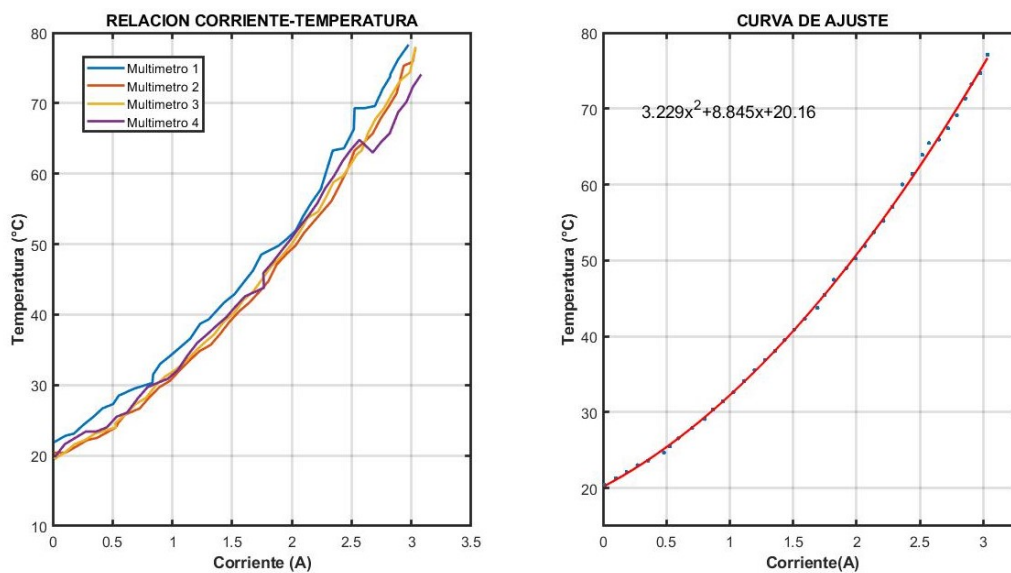
## B. Anexo 2: Relación de tensión de celda-temperatura y corriente-temperatura, medidas tomada con multímetros

Figura B-1 Relación tensión de la celda y temperatura muestras tomadas con multímetros



Fuente: Imagen propia

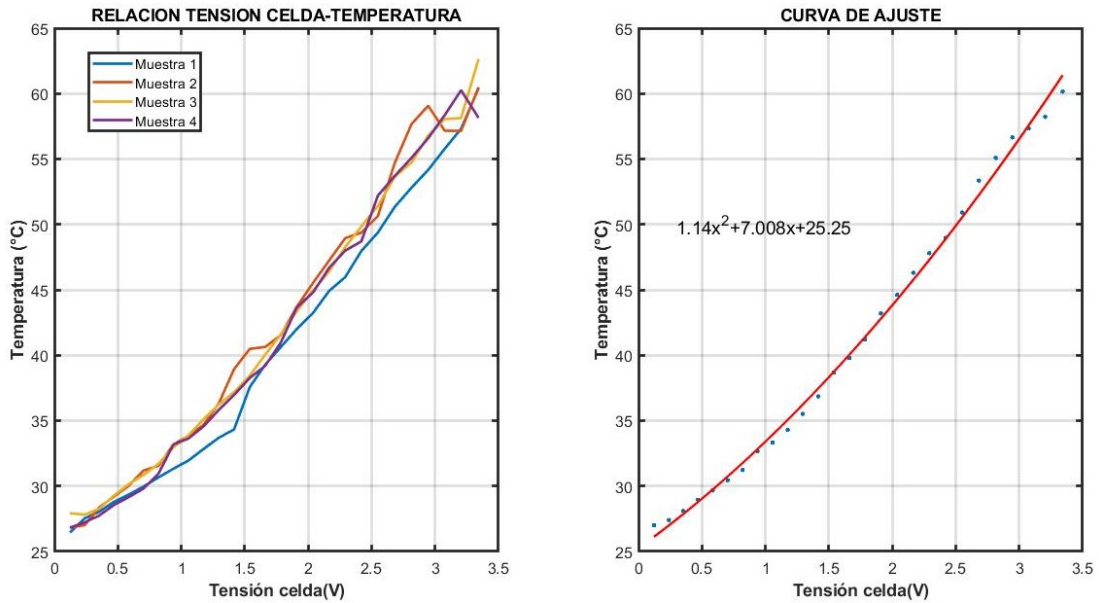
Figura B-2 Relación corriente y temperatura muestras tomadas con multímetros



Fuente: Imagen propia

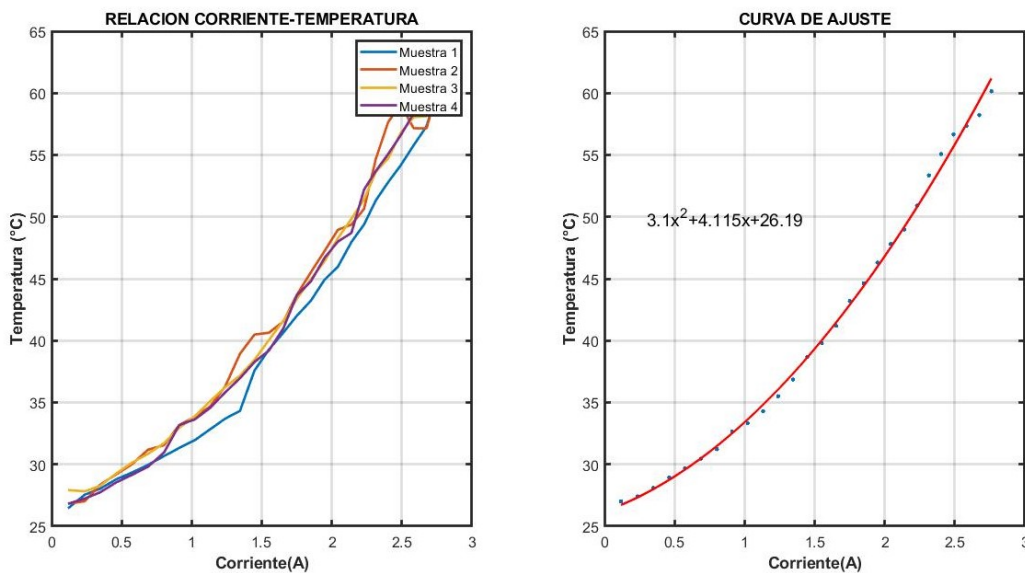
## C. Anexo 3: Relación de tensión de celda-temperatura y corriente-temperatura, medidas tomadas digitalmente

Figura C-1 Relación tensión de la celda y temperatura muestras tomadas digitalmente



Fuente: Imagen propia

Figura C-2 Relación corriente y temperatura muestras tomadas digitalmente



Fuente: Imagen propia

## D. Anexo 4: Resultados de la modelización de la planta, variables obtenidas calculando las constantes y utilizando IDENT

Tabla D-1 Tabla de valores de constantes calculadas

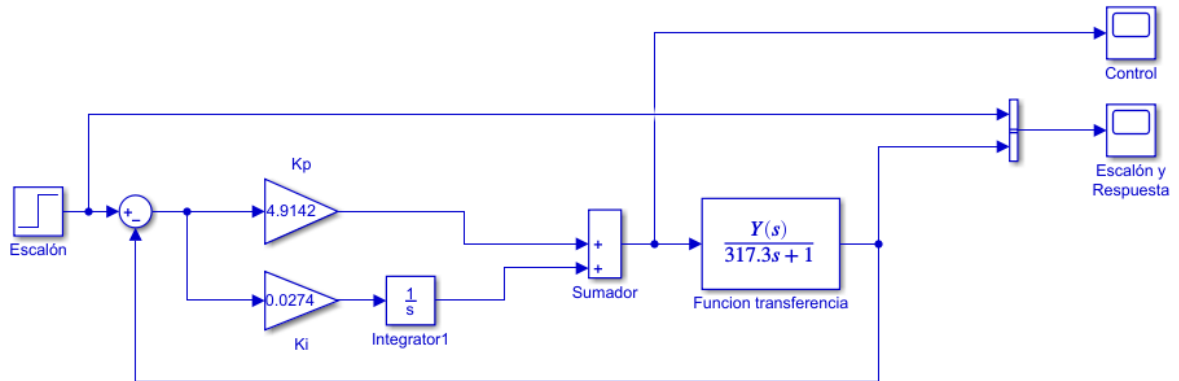
Escalón	Ganancia	Constante de tiempo	Tiempo de retardo
2.47	0.988	304.2	3
3.04	0.988	334.8	3
3.42	0.983	322.3	3
4.28	0.989	310.8	3
4.75	0.99	315.3	3
5.32	0.99	312.2	3
	0.988	316.6	3

Tabla D-2 Tabla de valores de contantes estimadas en IDENT

Escalón	Ganancia	Constante de tiempo	Tiempo de retardo
2.47	0.99361	312.84	2.623
3.04	0.9885	330.21	3
3.42	0.99355	365.64	0
4.28	0.98979	296.23	3
4.75	0.99346	300.46	3
5.32	0.99278	299.63	3
	0.99200667	317.5016667	2.43716667

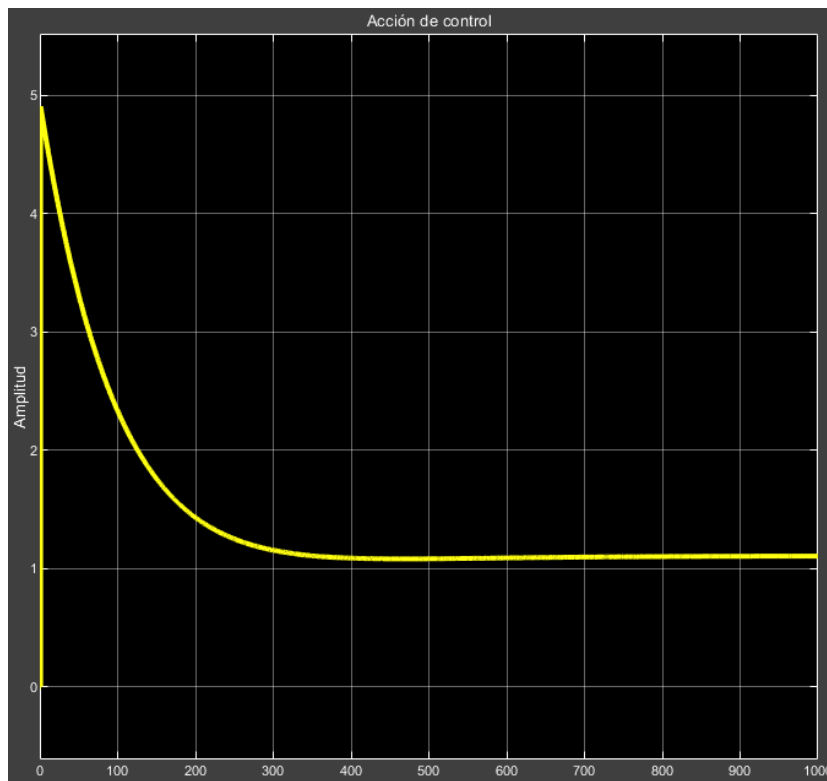
## E. Anexo 5: Respuesta del controlador Vs la planta

Figura E-1 Diagrama desarrollado en Simulink para controlador PI



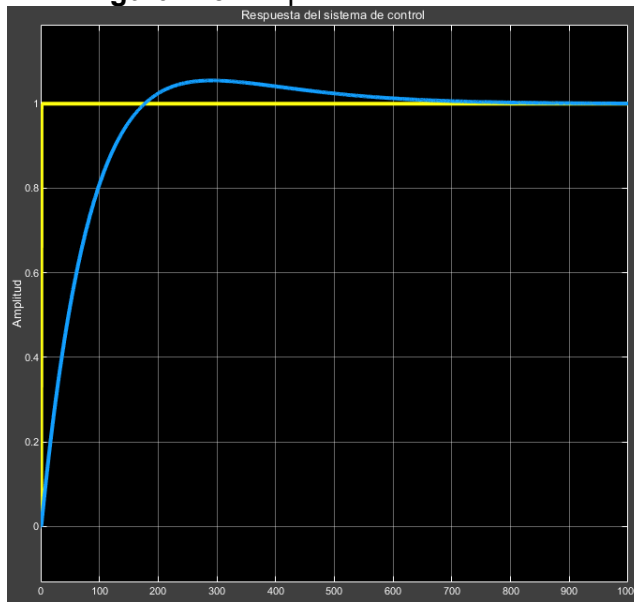
Fuente: Imagen propia

Figura E-2 Acción de control



Fuente: Imagen propia

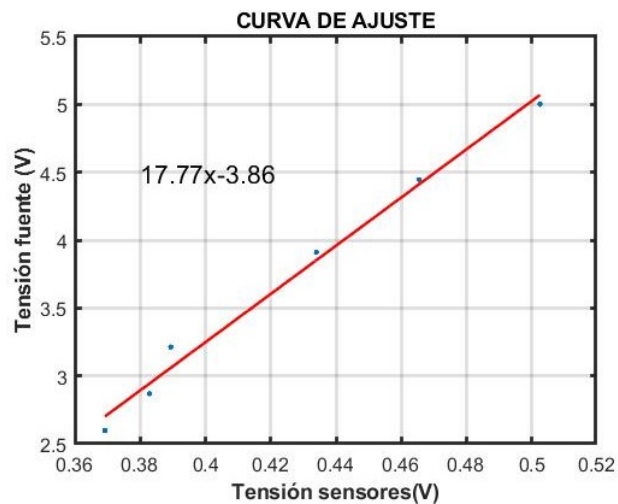
**Figura E-3** Respuesta escalón control PI



Fuente: Imagen propia

## F. Anexo 6: Relación entre los mV entregados por los sensores y la tensión de la fuente

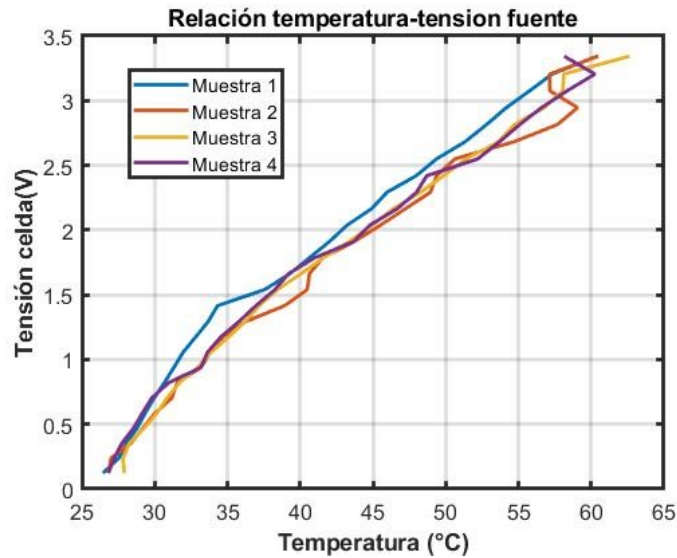
**Figura F-1** Curva de ajuste de la relación entre la tensión del sensor-tensión de la fuente



Fuente: Imagen propia

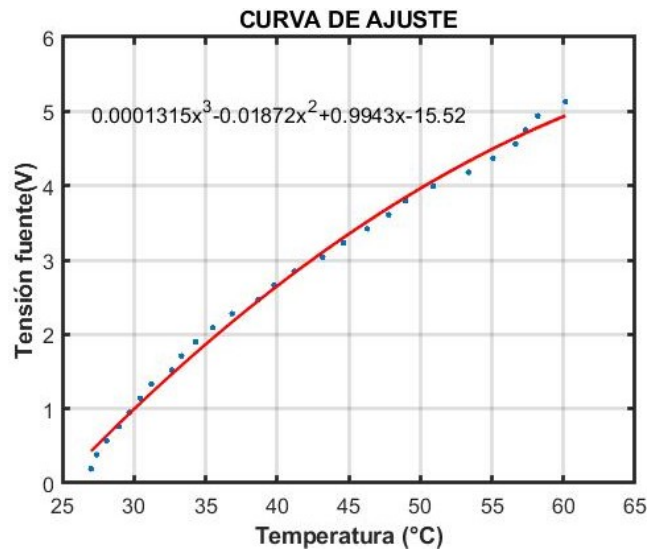
# G. Anexo 7: Relación entre la temperatura y la tensión de la fuente medidas tomadas digitalmente

Figura G-1 Gráfica de relación temperatura y tensión de la fuente



Fuente: Imagen propia

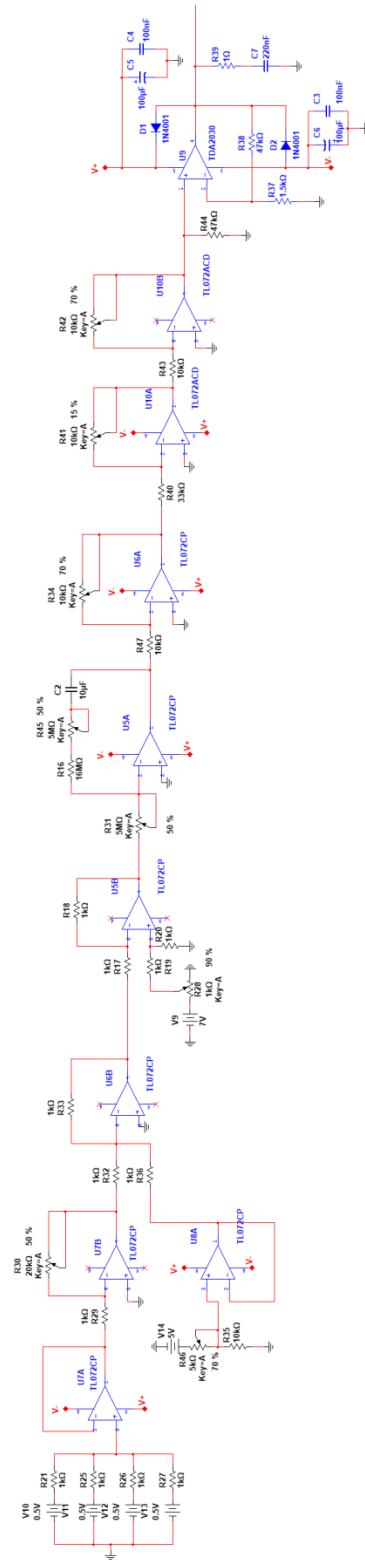
Figura G-2 Curva de ajuste de relación temperatura y tensión de la fuente



Fuente: Imagen propia

# H. Anexo 8: Sistema de control PI analógico

Figura H-1 Sistema de control automático





## Bibliografía

- Alfaro, V. M., Sc, M., & Rica, U. D. C. (2007). *Orden Reducido De Tres Puntos 123C. 1999*, 1–7.
- Arnaldi, T., & Bertou, H. (2017). *Requisitos y caracterización de un instrumento para muongrafía*. 1–15.
- Córdoba, J. S. C. (2016). Plataforma Experimental para Análisis de la Respuesta del Fotomultiplicador de Silicio en Presencia de Radiación de Fondo Ambiental y Artificial. *Revista Brasileira de Ergonomia*, 9(2), 10.  
<https://doi.org/10.5151/cidi2017-060>
- López, A. S. (2015). *Estudio de las propiedades de los fotomultiplicadores de silicio ( SiPM )*.
- Lorca Galindo, D. (2010). *Desarrollo y Caracterización de Fotomultiplicadores de Silicio para NEXT . Agradecimientos*. 1–47.
- Microelectronics, S. (1993). *TDA2030 14W Hi-Fi AUDIO AMPLIFIER*. March, 1–11.
- Nise, N. S. (2011). Control System Engineering\_Norman S. Nise\_6th Edition. In *John Wiley & Sons, Inc.* (Vol. 6th). <https://doi.org/10.1055/s-0035-1550061>
- Oda, Y. (2016). *basados en fotomultiplicadores con matriz de Silicio , con aplicaciones a muongrafías de volcanes .*
- Ogata, K. (2018). Ingeniería de control moderna. In *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún* (Vol. 5, Issue 10).  
<https://doi.org/10.29057/ess.v5i10.3323>
- Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., & Buck, J. R. (2009). Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. *Termodinamica*, 1001. <https://doi.org/10:0-8400-5444-0>
- Patterson, G., & Sobral, M. (2007). *Efecto peltier*. 2, 3.
- Perez, M., Perez H, A., & Perez B, E. (2008). Introducción a los sistemas de control. *Universidad Autónoma De Nuevo León - Facultad De Ingeniería Mecánica Y*

*Eléctrica*, 69.

- Rubio Ramírez, C., Lizarazo, G. M., & Vera Duarte, E. (2017). Termoelectricidad: uso de las celdas peltier en el campo de la refrigeración y sus principales aplicaciones. *Inventum*, 12(22), 9–16. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.12.22.2017.9-16>
- Salvador, P. (2008). 5.- *Ajuste de curvas*. x.
- Self-heating, L., & Output, L. I. (2013). *Datasheet Lm35*. November, 1–13.
- The MathWorks, I. (2019). *Matlab*. <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Vacheret, A., Barker, G. J., Dziewiecki, M., Guzowski, P., Haigh, M. D., Hartfiel, B., Izmaylov, A., Johnston, W., Khabibullin, M., Khotjantsev, A., Kudenko, Y., Kurjata, R., Kutter, T., Lindner, T., Masliah, P., Marzec, J., Mineev, O., Musienko, Y., Oser, S., ... Ziembicki, M. (2011). Characterization and simulation of the response of Multi-Pixel Photon Counters to low light levels. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 656(1), 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.07.022>
- Vacheret, A., & Ward, M. (2008). *Impact of pixel crosstalk , after-pulse and recovery time in Multi-Pixels Photon Counter<sup>TM</sup> ( MPPC ) response Impact of pixel crosstalk , after-pulse and recovery time in Multi-Pixels Photon Counter<sup>TM</sup> ( MPPC ) response*. 1–2.
- Walpole, R., Myers, R., & Mayers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*.