

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y computación.

Diseño y construcción de un sistema de control de temperatura y flujo de refrigerante para intercambiador de calor, mediante el uso de celdas Peltier y bomba peristáltica

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y automatización

Presentado por:

Luis Efrén Herrera Baños

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este trabajo final de mi vida universitaria se lo dedico a mis padres y hermano. ¡Gracias por existir!

Luis Efrén Herrera Baños

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Mónica Baños y Efrén Herrera por todo su amor, tiempo, consejos, enseñanzas y su confianza a lo largo de mi vida. También a los profesores que creyeron en mí y me motivaron a seguir adelante, especialmente al Mr. Miguel Armijos.

Luis Efrén Herrera Baños

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Luis Efrén Herrera Baños* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Luis Efrén Herrera Baños', written over two horizontal lines.

Autor 1

EVALUADORES

M. Sc. Dennys Dick Cortez Alvarez

PROFESOR DE LA MATERIA

Ph. D. Ricardo Alfredo Cajo Diaz

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El proyecto trata sobre la construcción y el diseño de un sistema de control de temperatura en Matlab-Simulink a fin de aplicarlo en un intercambiador de temperatura mediante el uso de celdas Peltier. Lo que implica que se desea desarrollar un sistema experimental de transferencia de calor corporal focalizado para la disminución de la sensación térmica con el objetivo de minimizar consumos energéticos por climatización ambiental.

Para lograr ejecutar el proyecto de manera correcta lo primordial era entender el funcionamiento de las celdas Peltier y en particular el kit de refrigeración doble de celda Peltier, luego se construyeron posibles actuadores basados en moduladores de ancho de pulso y se usó una fuente DC de mayor potencia para alimentar las celdas Peltier. Los modelos construidos en Simulink a partir de las ecuaciones que relacionan la dinámica de las celdas Peltier, tanto para los módulos de enfriadores termoeléctricos (TEC) como para los módulos de generadores termoeléctricos (TEG) cumplieron con las expectativas de la determinación de sus parámetros.

Palabras Clave: Celdas Peltier, enfriadores termoeléctricos, generadores termoeléctricos.

ABSTRACT

The project consist in the construction and design of a temperature control system un Matlab-Simulink in order to use it on a temperature exchanger that use Peltier cells. This implies that it is desired to develop an experimental system for the transfer of body heat focused on the reduction of thermal sensation with the aim of minimizing energy consumption due to environmental air conditioning.

To execute the project correctly, the main thing was to understand the operation of Peltier cells and in particular the double Peltier cell refrigeration kit, then possible actuators based on wavelength modulation pulse were built and a higher power DC source was used to feed the cells.

The models built in Simulink from the equations that relate the dynamics of the Peltier cells, both for the thermoelectric coolers (TEC) modules and for the thermoelectric generators (TEG), met the expectations of the determination of their parameters.

Keywords: Peltier cells, thermoelectric coolers, thermoelectric generators.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Celdas Peltier.....	2
1.4.2 Principio del funcionamiento de la celda Peltier.	3
1.4.3 Modelo matemático para la celda Peltier.	5
1.4.4 Bomba peristáltica.....	7
1.4.5 Intercambiador de calor.....	8
1.4.6 Control PID.....	9
1.4.7 Control en espacio de estados mediante reubicación de polos	12
CAPÍTULO 2.....	14
2. Metodología	14

2.1	Kit de enfriamiento de la celda Peltier.....	14
2.2	Construcción del modelo de una celda Peltier usando Matlab/Simulink.....	16
2.3	Modulación por ancho de pulso (PWM).....	18
2.4	Control PID	22
2.5	Sintonización de un controlador PID mediante prueba de ensayo y error. ...	23
2.6	Controlador por reubicación de polos	23
CAPÍTULO 3.....		25
3.	Resultados Y ANÁLISIS.....	25
3.1	Caracterización del sistema de ventiladores.....	25
3.2	Determinación de parámetros de un módulo de enfriamiento termoeléctrico (TEC).26	
3.3	Determinación de parámetros de un módulo de generador termoeléctrico (TEG).28	
3.4	PWM implementado.....	30
3.5	Resultados del Control PI	31
3.6	Resultados del control en espacio de estados por reubicación de polos.....	34
CAPÍTULO 4.....		37
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	37
	Conclusiones	37
	Recomendaciones	38
Bibliografía.....		39

ABREVIATURAS

PWM	Modulación por ancho de pulso.
Q_{PH}	Calor disipado por efecto Peltier en la cara caliente.
Q_{PC}	Calor absorbido por efecto Peltier en la cara fría.
Q_J	Calor generado por efecto Joule.
Q_{CT}	Calor producido como consecuencia de la conducción térmica entre las caras.
P_e	Potencia eléctrica suministrada a la celda.
TEC	Enfriadores Termoeléctricos.
TEG	Generadores Termoeléctricos.
TEM	Módulos Termoeléctricos.
FOM	Figura de mérito (figure-of-merit).
Kth	Conductividad Térmica.
PID	Control Proporcional, Integral, Derivativo.
DT	Diferencia de temperatura.
I _{max}	Corriente de entrada a través de un enfriador termoeléctrico que resulta en el mayor DT.
DT _{max}	Disparidad de temperatura máxima alcanzable en medio de la cara fría y la caliente.
Q _{max}	Capacidad frigorífica máxima de un enfriador termoeléctrico.
U _{max}	Voltaje en los contactos de un enfriador termoeléctrico en DT _{max} .
T _H	Temperatura de la cara caliente de la celda Peltier.
T _C	Temperatura de la cara fría de la celda Peltier.

SIMBOLOGÍA

mV	Milivoltio
V	Voltios
A	Amperios
Ohm	Ohmios
F	Faradios
°K	Grados Kelvin
°C	Grados Celsius

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Estructura de una celda Peltier	3
Figura 1. 2 Bomba Peristáltica	8
Figura 1. 3 Intercambiador de calor	9
Figura 1. 4 Sistema de control en lazo cerrado con control PID	9
Figura 1. 5 Interpretación geométrica de la acción derivativa	11
Figura 1. 6 Planta representada en espacio de estados	12
Figura 1. 7 Planta en lazo cerrado con realimentación de estados.....	13
Figura 2. 1 Kit de celda Peltier visto desde un lateral	15
Figura 2. 2 Kit de celda Peltier visto desde arriba.....	15
Figura 2. 3 Kit de celda Peltier visto frontalmente.....	16
Figura 2. 4 Sentido de la circulación del flujo del aire producto de los ventiladores usados para el enfriamiento.....	16
Figura 2. 5 Módulo TEC.....	17
Figura 2. 6 Subsistema del Módulo TEC	17
Figura 2. 7 Módulo TEG.....	18
Figura 2. 8 Esquemático del generador de pulso.....	18
Figura 2. 9 Señales cuadrada y triangular del generador de pulso.....	19
Figura 2. 10 Generador de pulsos en físico	19
Figura 2. 11 Esquemático del generador de pulsos usando un NE 555	20
Figura 2. 12 Señales generadas por el modulador de ancho de pulso	21
Figura 2. 13 Señal cuadra y diente de sierra obtenidas en osciloscopio	21
Figura 2. 14 Diagrama de bloques del sistema.....	22
Figura 2. 15 Estrategia de diseño para control clásico PI	22
Figura 2. 16 Estrategia de diseño para control moderno basado en realimentación de estados utilizando reubicación de polos.	24
Figura 3. 1 Corriente vs voltaje del sistema de ventiladores	26
Figura 3. 2 Modulo_Peltier_TEC.m.....	27
Figura 3. 3 Curvas características del modelo I-Tc y V-Tc	28

Figura 3. 4 Modulo_Peltier_TEG.m.....	28
Figura 3. 5 Características de salida a $DT=Cte$	29
Figura 3. 6 Señal diente de sierra y señal de control.	30
Figura 3. 7 Señal PWM implementada.	30
Figura 3. 8 Respuesta del sistema en lazo abierto	31
Figura 3. 9 Respuesta del sistema en lazo cerrado sin controlador.....	31
Figura 3. 10 Respuesta del sistema en lazo cerrado con controlador	32
Figura 3. 11 Respuesta utilizando PID Tuner de MatLab	32
Figura 3. 12 Parámetros del controlador PI y especificaciones de la respuesta del sistema	33
Figura 3. 13 Bloque de parámetros del controlador PI.....	33
Figura 3. 14 Esfuerzo del controlador	34
Figura 3. 15 Respuesta del sistema en lazo abierto	34
Figura 3. 16 Respuesta del sistema en lazo cerrado con realimentación de estados	35
Figura 3. 17 Respuesta del sistema en lazo cerrado con realimentación de estados incluyendo integradores para error cero en estado estacionario	35
Figura 3. 18 Respuesta del esfuerzo del controlador.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Voltaje aplicado y corriente de consumo del sistema de ventiladores.	25
Tabla 3. 2 Datos del fabricante para TEC1-12710.....	27
Tabla 3. 3 Parámetros obtenidos a partir del modelo para la TEC1-12710	27
Tabla 3. 4 Dato del fabricante para HZ-20.....	29
Tabla 3. 5 Parámetros obtenidos a partir del modelo para la TEC1-12710	29

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como finalidad realizar el diseño y construcción de un sistema de control de temperatura y flujo de refrigerante para un intercambiador de calor basado en celdas Peltier y bomba peristáltica motivada por el deseo de desarrollar un sistema experimental de transferencia de calor corporal focalizado para la disminución de la sensación térmica, con el objeto de minimizar consumos energéticos por climatización ambiental. Se aplicó la epistemología pertinente.

1.1 Descripción del problema

¿Qué se puede realizar para el desarrollo de un sistema experimental de transferencia de calor corporal focalizado para la disminución de la sensación térmica, con el objeto de minimizar consumos energéticos por climatización ambiental?

Como solución a esta interrogante se construirá en primera instancia un prototipo de intercambiador de calor basado en celdas de Peltier y bomba peristáltica según las especificaciones requeridas como el tiempo de estabilización y el porcentaje de sobre impulso.

En forma paralela se necesita que el controlador sea capaz de manejar las variables de interés, es decir la temperatura y flujo de refrigerante, por lo que se requiere su diseño y posterior integración al prototipo.

1.2 Justificación del problema

Se trata de suplir la necesidad que tiene el proyecto de contar con un prototipo de intercambiador de calor y además el respectivo controlador que permitirán medir y analizar las respuestas del sistema considerando como variables de interés la temperatura y el flujo del refrigerante.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y construir un modelo para el sistema de control de temperatura del sistema basado en celdas Peltier mediante la variación del flujo de calor en la cara caliente.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Formar un modelo de la celda Peltier usando MatLab-Simulink para validar su operación en modo TEC.
2. Construir un modelo de la celda Peltier usando MatLab-Simulink para validar su operación en modo TEG.
3. Emplear el modelo de la planta de laboratorio para aplicar el control clásico PID.
4. Utilizar el modelo de la planta de laboratorio aplicando el monitoreo actual en espacio de estados a partir de la ubicación de polos.
5. Evaluar el controlador diseñado en el modelo de la planta para corroborar las especificaciones de diseño tales como tiempo de estabilización y/o porcentaje de sobre impulso.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Celdas Peltier.

Es una bomba de calor activa de estado sólido que transfiere calor de un lado del dispositivo al otro, con consumo de energía eléctrica, dependiendo de la dirección de la corriente. Se la usa principalmente como método de enfriamiento. Las ventajas de usar celdas Peltier es que usan menos partes móviles, por ende, no emplean líquido circulante, poseen una vida útil muy larga, presentan una invulnerabilidad a las fugas, su tamaño es pequeño y tienen una forma flexible. Las desventajas que presenta esta celda son su alto costo y una eficiencia energética pobre. La celda al momento de ser usada como un enfriador muestra un voltaje a través del dispositivo lo cual provoca una diferencia de temperatura entre los dos lados. (Gomar, 2018, p.1)

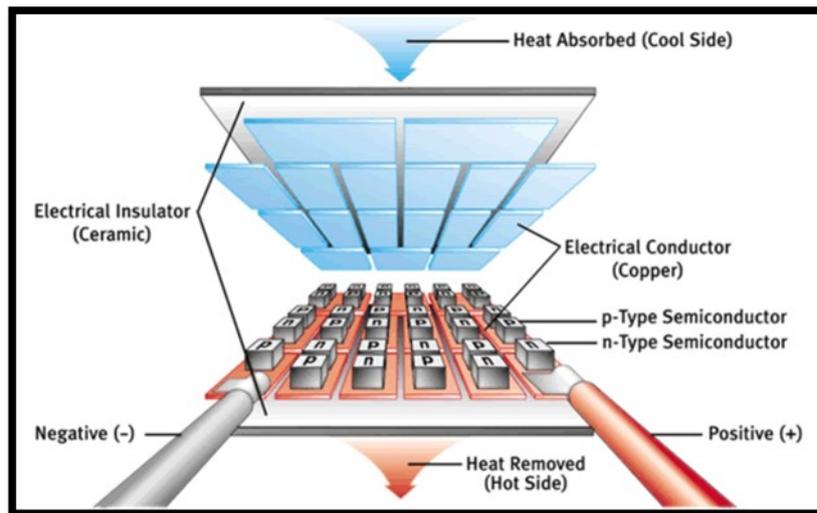


Figura 1. 1 Estructura de una celda Peltier

Tomada y adaptada de *Como funciona la célula Peltier y qué ventajas tiene* [Ilustración], Juan Gomar, 16 octubre 2018, www.profesionalreview.com

1.4.2 Principio del funcionamiento de la celda Peltier.

Independiente de los diversos fenómenos que implica el uso de celdas de Peltier y de las características intrínsecas de la transmisión de calor se puede decir que todos estos procesos no presentan una misma magnitud e importancia, por ende se puede despreciar el flujo calorífico producido por la circulación de corriente con variación de temperatura (efecto Thomson), con esto en mente al aplicar una diferencia de potencial sobre las celdas estas tendrán una cesión de calor por unidad de tiempo en la cara caliente igual a:

$$Q_{PH} = ST_H I \quad (1)$$

Donde T_H es la temperatura de la cara caliente, S es el coeficiente Seebeck de la corriente a través del circuito. Debido a este mismo efecto, en la cara fría la absorción de calor por unidad de tiempo será: (Madrid, E. U. (s.f.). Modelado de una célula de Peltier. Madrid)

$$Q_{PC} = ST_C I \quad (2)$$

Siendo T_C la temperatura de la cara fría. Considerando las pérdidas por unidad de tiempo por efecto Joule, éstas quedarán expresadas por: (Madrid, E. U. (s.f.). Modelado de una célula de Peltier. Madrid)

$$Q_J = \frac{1}{2} I^2 R \quad (3)$$

Donde R es la resistencia eléctrica de la celda Peltier. Debido a la disparidad de temperaturas entre las caras se producirá un efecto de conducción térmica entre la cara caliente y la fría la cual se representará como: (Madrid, E. U. (s.f.). Modelado de una célula de Peltier. Madrid)

$$Q_{CT} = \frac{T_H - T_C}{R_{TH}} \quad (4)$$

En donde R_{TH} representa la resistencia térmica entre la cara caliente y la fría. Para obtener el flujo neto calórico que es absorbido por la cara fría se empleara un balance energético: (Madrid, E. U. (s.f.). Modelado de una célula de Peltier. Madrid)

$$Q_C = Q_{PC} - Q_J - Q_{CT} = ST_C I - \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_H - T_C}{R_{TH}} \quad (5)$$

El calor cedido y que luego se tendrá que disipar por medio de la cara caliente será expresado de la siguiente manera: (Madrid, E. U. (s.f.). Modelado de una célula de Peltier. Madrid)

$$Q_H = Q_{PH} + Q_J - Q_{CT} = ST_H I + \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_H - T_C}{R_{TH}} \quad (6)$$

Usando el primer principio de termodinámica: indica que la potencia eléctrica dada será la diferencia entre los flujos calóricos de disipación y absorción dando como resultado: (Madrid, E. U. (s.f.). Modelado de una célula de Peltier. Madrid)

$$P_e = Q_H - Q_C = S(T_H - T_C)I + I^2 R = S\Delta T I + I^2 R \quad (7)$$

Teniendo como condición el hecho de que el efecto Thomson puede ser despreciable y solo se consideran los valores medios de las propiedades de transporte de calor. Varían con respecto a la temperatura la resistividad, la conductividad térmica y el coeficiente de Seebeck. (Madrid, E. U. (s.f.). Modelado de una célula de Peltier. Madrid)

1.4.3 Modelo matemático para la celda Peltier.

La simbología utilizada en las fórmulas está directamente tomada de la utilizada en los bloques de funciones dentro del modelo que se implementó en Simulink, logrando de esta manera una mejor interpretación.

Módulo TEC

Coeficiente Seebeck

El efecto Seebeck consiste en transformar un gradiente de temperatura térmica a energía eléctrica. (Huan-Liang Tsai y Jium-Ming Lin, 2014)

$$S = V_{max}/T_H \quad (8)$$

Función de la resistencia

$$R = V_{max}(1 - \frac{\Delta T_{max}}{T_H})/I_{max} \quad (9)$$

Función de la conductividad térmica

La conductividad térmica trata sobre el traspaso de energía en forma de calor a través de un cuerpo con masa como resultado de una variación de temperatura. (Huan-Liang Tsai y Jium-Ming Lin, 2014)

$$K_{th} = ((I_{max} * V_{max}) * (T_H - \Delta T_{max}))/ (2 * \Delta T_{max} * T_H) \quad (10)$$

Función FOM

El parámetro FOM se obtiene mediante la combinación de un gran coeficiente Seebeck con una resistencia eléctrica y una conductividad térmica baja.

$$Z = S^2/(R * K_{th}) \quad (11)$$

Función de la corriente

$$I = ((S * (T_H - DT)) - S * ((T_H - DT)^2 - (2 * DT/Z))^{(0.5)})/R \quad (12)$$

Función del voltaje

$$V = Vmax - S * ((T_H - DT)^2 - (2 * DT/Z))^{0.5} \quad (13)$$

Módulo TEG

Coeficiente Seebeck

El efecto Seebeck consiste en transformar un gradiente de temperatura térmica a energía eléctrica. (Huan-Liang Tsai y Jium-Ming Lin, 2014)

$$S = 2 * Vm/DT \quad (14)$$

Función de la resistencia

$$R = Vm^2/Wm \quad (15)$$

Función de la corriente

$$I = S * DT/[(1 + m) * R] \quad (16)$$

Función del voltaje

$$V = I * R \quad (17)$$

Función de la conductividad térmica

La conductividad térmica trata sobre el traspaso de energía en forma de calor a través de un cuerpo con masa como resultado de una variación de temperatura. (Huan-Liang Tsai y Jium-Ming Lin, 2014)

$$K_{th} = S^2/(R * Z) \quad (18)$$

Función de la resistencia óptima

$$m_{opt} = (DT + (Nth_{max} * T_C))/(DT - (Nth_{max} * T_H)) \quad (19)$$

Función FOM

El parámetro FOM o figura de mérito se obtiene mediante la combinación de un gran coeficiente Seebeck con una resistencia eléctrica y una conductividad térmica baja.

$$Z = (((m_{opt})^2) - 1)/((T_H + T_C)/2); \quad (20)$$

1.4.4 Bomba peristáltica.

Acorde a la teoría lo que se puede decir de la bomba peristáltica es lo siguiente:

Es un elemento hidráulico que permite el desplazamiento de varios tipos de fluidos. Los fluidos están dentro de un tubo flexible con forma de C que se encuentran en el interior de la cubierta, una pareja de rodillos aprieta el tubo flexible y mediante un movimiento de rotación van trasegando el fluido del interior del tubo.

Cada tipo de bomba peristáltica permite una adaptación determinante a ciertos tipos de fluidos por lo que se debe tener en cuenta el caudal y presión de las bombas para estimar cuál sería la más adecuada.

Existen dos tipos de bombas peristálticas, las de alta presión y las de baja presión siendo la primera capaz de operar hasta con 16 bar las de baja presión utilizan rodillos y no tienen tubos reforzados.

Las ventajas de estas bombas es que permiten manejar fluidos abrasivos, no permiten fugas de fluidos corrosivos, sirven para trasegar fluidos contaminantes y requieren poco mantenimiento. (Fluideco, 2019, p.1)



Figura 1. 2 Bomba Peristáltica

Tomada y adaptada de *Tipos de bombas peristálticas* [Ilustración], Fluideco, 03 diciembre 2019, www.fluideco.com.

1.4.5 Intercambiador de calor.

Es un equipo que transfiere calor continuamente de un medio a otro; existen dos tipos de intercambiadores de calor principales: el directo e indirecto. El factor decisivo para la eficiencia energética del intercambiador de calor de placas es la eficiencia térmica o la eficiencia del proceso. El intercambiador directo es donde ambos medios están en contacto directo entre sí, en este caso los medios no se mezclan. Una aplicación de este intercambiador son las torres de enfriamiento. El intercambiador indirecto es donde ambos medios están separados por una pared a través de la cual se transfiere calor.

Los intercambiadores más usados en la industria son los de calor soldadas, de placas de acero inoxidable y de placas juntas. (Alfa Laval, 2022)

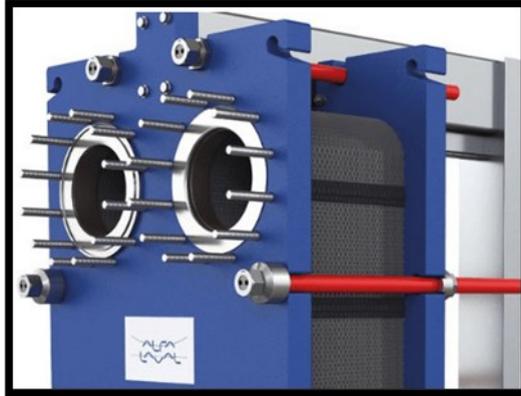


Figura 1. 3 Intercambiador de calor

Tomada y adaptada de *Intercambiador de calor: ¿Qué es y para qué sirve?* [Ilustración], Alfa Laval, 15 mayo 2022, www.alfalaval.es

1.4.6 Control PID

Un controlador PID es un dispositivo que se emplea para controlar un sistema en lazo cerrado logrando de esta manera alcanzar la salida deseada. Este se conforma de tres partes la primera la acción proporcional, la segunda la acción integral y finalmente la acción derivativa. (Carlos Martín, 2022, p.1)

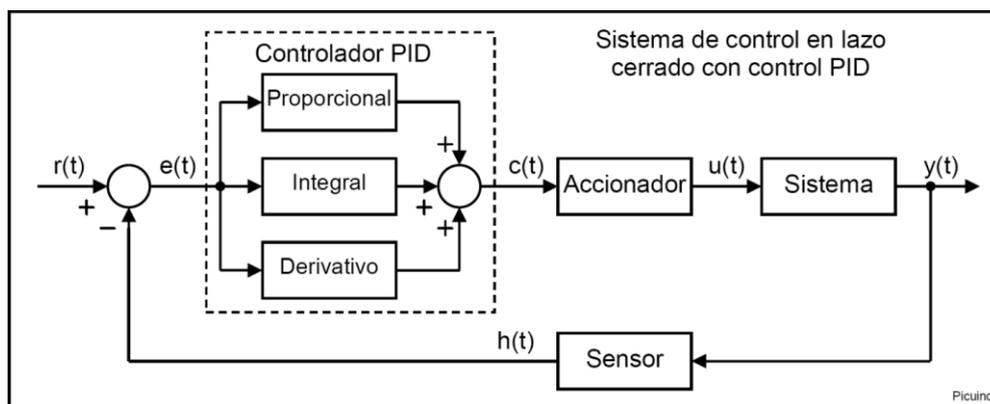


Figura 1. 4 Sistema de control en lazo cerrado con control PID

Tomada de *Controlador PID*[Ilustración], Carlos Martín, 15 mayo 2022, www.picuino.com

Señal de referencia y señal de error

En los controladores la señal de referencia $r(t)$ indica el estado que se requiere en la salida del sistema $y(t)$, cuando se emplea un sistema de control de temperatura la referencia será la que se desea y la de salida será la real del sistema que se está controlando.

Ya que se toma como base la Figura 1.4 en esta se aprecia que la entrada es la señal de error. Siendo la que indica la diferencia entre el estado de referencia y el real el cual es medido por el sensor $h(t)$.

Cuando se obtiene un error grande el sistema está lejos de su estado deseado el caso contrario implica que se logró llegar al estado deseado. (Carlos Martin, 2022, p.1)

- **Acción proporcional**

La ley de control proporcional puro nos indica que:

$$u(t) = K_e(t) + U_b \quad (21)$$

Esto implica que la acción de control es proporcional al error de control y la variable U_b es una señal de reinicio. Al no existir un error, es decir cuando es cero $u(t)=U_b$. Siendo U_b la polarización se suele fijar en $(u_{\max} + u_{\min}) / 2$, también puede ser ajustada de forma manual haciendo que el error de control en estado estacionario sea cero en alguna referencia seleccionada. (Mauricio Améstegui, 2021)

- **Acción integral**

La función principal de esta acción es que la salida del proceso sea igual a la de referencia en estado estacionario, con la acción integral un error pequeño positivo producirá un incremento en la señal de control y uno que sea negativo producirá una

señal que disminuya indiferentemente de cuan pequeño sea dicho error. (Mauricio Améstegui, 2021)

- **Acción derivativa**

La acción derivativa cumple con la función de mejorar la estabilidad del lazo cerrado. El comportamiento de inestabilidad sigue la dinámica del proceso por lo que se toma un tiempo antes de que la variable de control se aprecie en la salida de este, dando como resultado que el sistema de control se demore en corregir el error. Teniendo esto en mente se puede decir que la acción proporcional y derivativa predicen la salida del proceso mediante la extrapolación del error de control con respecto a la tangente a su curva respectiva como muestra en la Figura 1.5. (Mauricio Améstegui, 2021)

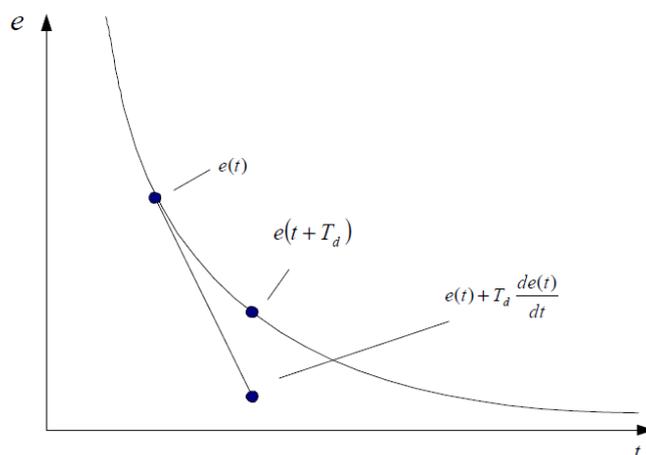


Figura 1. 5 Interpretación geométrica de la acción derivativa

Tomada de *Interpretación geométrica de la acción derivativa como un control predictivo, donde la predicción se obtiene mediante extrapolación lineal* [Gráfica], Mauricio Améstegui, enero 2021, APUNTES DE CONTROL PID.

1.4.7 Control en espacio de estados mediante reubicación de polos

Para realizar el control en espacio de estados se debe considerar que el sistema este representado, utilizando espacio de estados. Hay que considerar que el estado de un sistema se define como la mínima cantidad de información necesaria en un instante de tiempo para que, conociendo la entrada a partir de ese instante, se pueda determinar cualquier variable del sistema en cualquier instante posterior. El vector de estado se define sobre el denominado espacio de estado que es el espacio vectorial en el cual el vector de estado toma valores, teniendo por lo tanto la misma dimensión que el número de elementos de dicho vector. (Sergio D et al., 2006):

- **Modelo de estado**

Las ecuaciones del modelo de estado pueden ser expresadas en forma matricial como se muestra en las siguientes ecuaciones: (Sergio D et al., 2006):

$$\dot{x}(t) = A(t) * x(t) + B(t) * u(t) \quad (22)$$

$$y(t) = C(t) * x(t) + D(t) * u(t) \quad (23)$$

Donde:

$x(t)$ es el vector de estado de dimensión n .

$u(t)$ es el vector de entradas de dimensión m .

$y(t)$ es el vector de salida de dimensión p .

$A(t)$ es la matriz del sistema de dimensiones $n * n$.

$B(t)$ es la matriz de entradas de dimensiones $n * m$.

$C(t)$ es la matriz de salida de dimensiones $p * n$.

$D(t)$ tiene dimensiones $p * m$ (en la mayoría de los sistemas es nulo).

En la Figura 1.6 se aprecia el modelo representado en espacio de estados.

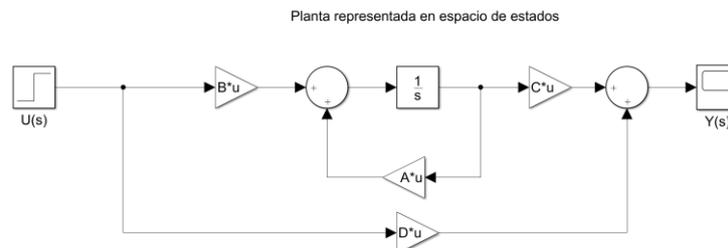


Figura 1. 6 Planta representada en espacio de estados

- **Realimentación de estados**

El modelo para un sistema con realimentación de estados Figura 1.7 cumplirá con las siguientes ecuaciones: (Sergio D et al., 2006):

$$\dot{x} = Ax + B(r - Kx) = [A - BK]x + Br; u = r - w \quad (24)$$

$$y = Cx + D(r - Kx) = [C - DK]x + Dr = Cx; D = 0 \quad (25)$$

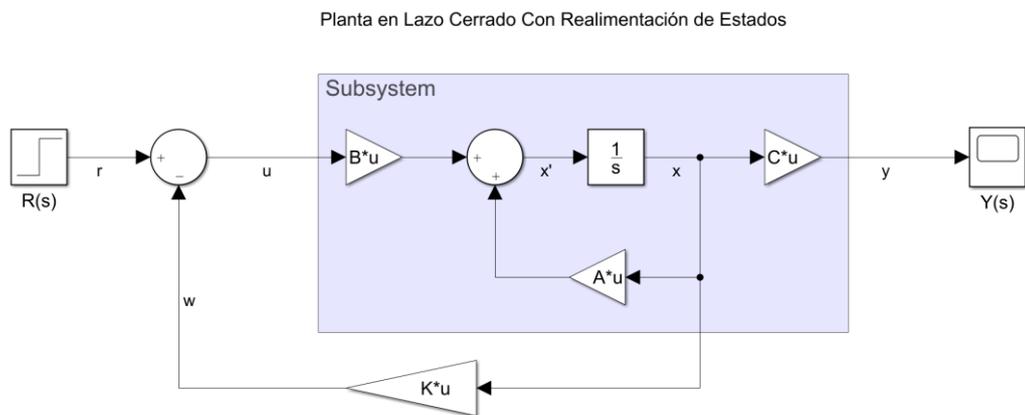


Figura 1. 7 Planta en lazo cerrado con realimentación de estados.

Donde:

$r(t)$ es la señal de referencia deseada.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para el presente trabajo se realizaron las respectivas indagaciones del estado del arte relacionadas con la temática, además se empleó información provista por el cliente.

Lo primero que se propuso es entender el funcionamiento de las celdas Peltier y en particular del kit de refrigeración de doble celda Peltier con ventiladores incluidos —se cuenta con el equipo —.

2.1 Kit de enfriamiento de la celda Peltier.

Se hacen pruebas tratando de replicar los resultados que dan los fabricantes respecto al comportamiento de las Celdas Peltier y en este caso en particular del kit.

Se proponen las siguientes estrategias:

Mantener constante la tensión que se aplica a los ventiladores ubicados sobre las Celdas Peltier y los del sistema de refrigeración. No se pudo avanzar mucho, ya que a medida que se aumentaba la tensión en las celdas esto demandaba mayor corriente. Se está buscando opciones para poder caracterizar este comportamiento.

Mantener constante la tensión que se aplica a los ventiladores ubicados sobre las celdas Peltier y del sistema de enfriamiento. Esto da la opción de poder actuar sobre los ventiladores del sistema de enfriamiento y para ello se realizan actuadores basados en lo que se conoce como moduladores de ancho de pulso (PWM). En este caso se consideró una fuente DC de mayor potencia para poder alimentar a las celdas Peltier. Esta es la ruta que se ha considerado como la mejor opción dadas las condiciones del sistema.

En la Figura 2.1 se observa todos los elementos descritos y sus opciones de conexión.

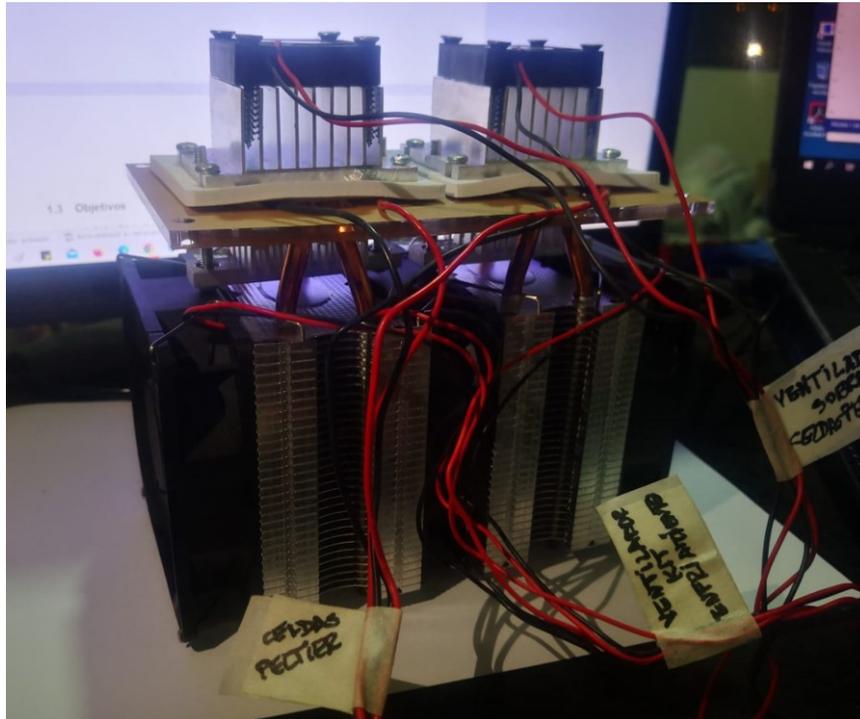


Figura 2. 1 Kit de celda Peltier visto desde un lateral

En la Figura 2.2 se aprecian los ventiladores que van sobre las celdas Peltier y que serán alimentados con una tensión constante de 12 voltios.

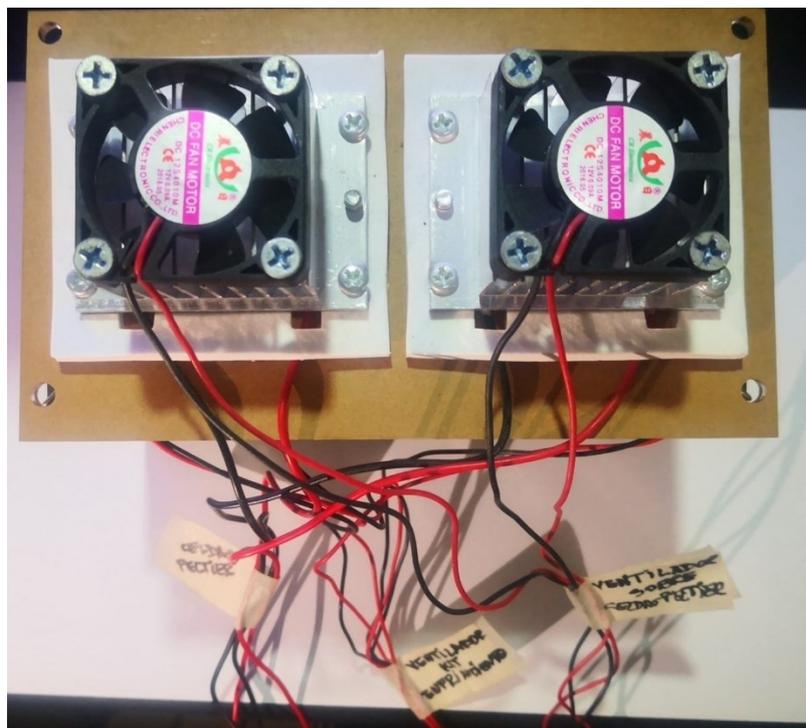


Figura 2. 2 Kit de celda Peltier visto desde arriba

En la Figura 2.3 se observa el kit completo de enfriamiento que va conectado a la cara de alta temperatura de la celda Peltier y que tiene un sistema tipo radiador junto a tres ventiladores que actuarán sobre este, desplazando el flujo de calor. Con la finalidad de controlar la temperatura de este lado de la cara.

Sobre estos tres ventiladores se aplicó la tensión de control generada en el PWM que permitirá variar la tensión de cero a doce voltios.

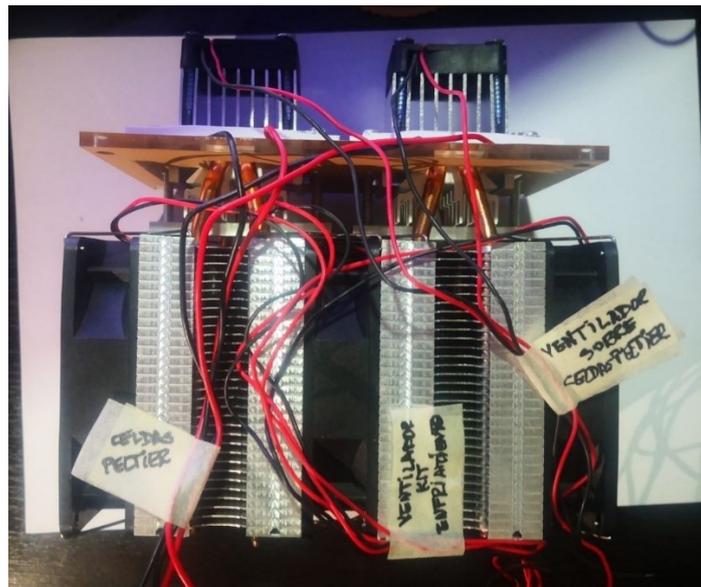


Figura 2. 3 Kit de celda Peltier visto frontalmente

En la Figura 2.4 se muestra el flujo del aire producto de los ventiladores mediante el uso de una veleta casera.

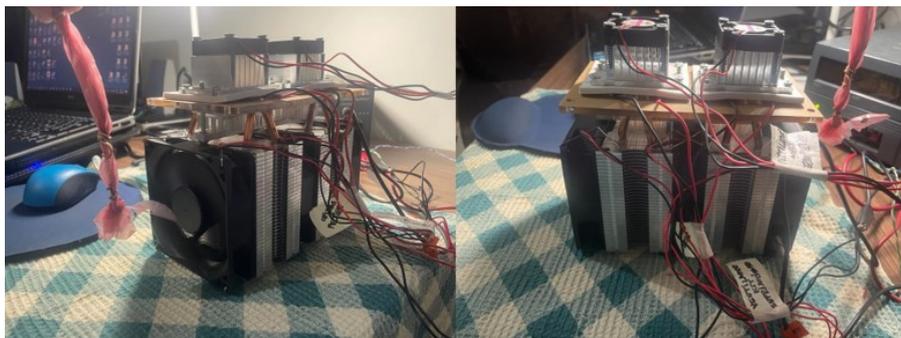


Figura 2. 4 Sentido de la circulación del flujo del aire producto de los ventiladores usados para el enfriamiento

2.2 Construcción del modelo de una celda Peltier usando Matlab/Simulink

Utilizando las ecuaciones descritas en el capítulo anterior se procedió a la construcción del modelo correspondiente a un módulo termoeléctrico (TEM - Thermoelectric Module) en sus dos variantes.

En primer lugar, se construyó el modelo correspondiente a su operación en modo enfriador termoeléctrico (TEC - Thermoelectric Cooler) Figura 2.5.

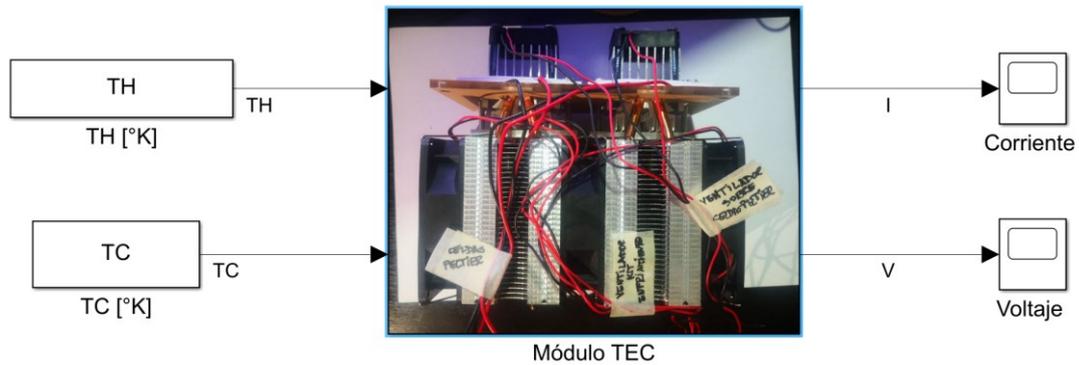


Figura 2. 5 Módulo TEC

En la Figura 2.6 se aprecia la construcción del subsistema perteneciente al modelo del módulo TEC.

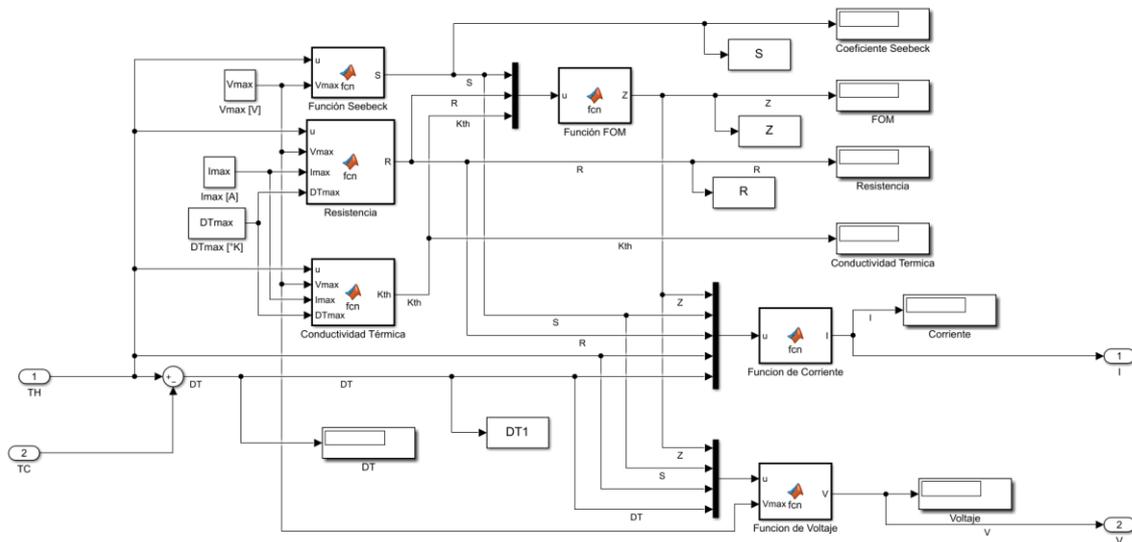


Figura 2. 6 Subsistema del Módulo TEC

Luego se construyó el modelo correspondiente a su operación en modo generador termoeléctrico (TEG - Thermoelectric Generator) Figura 2.7.

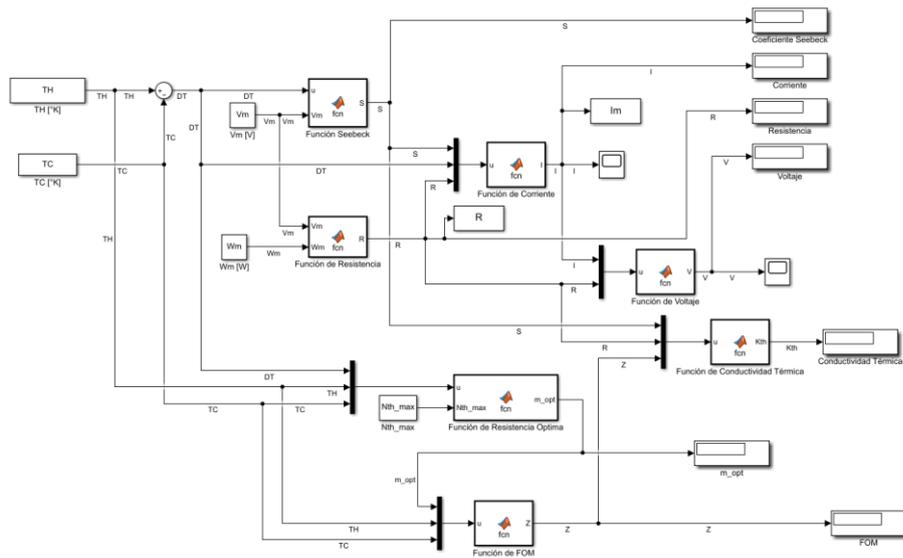


Figura 2. 7 Módulo TEG

A partir de estos modelos se pueden determinar parámetros y características de los módulos termoeléctricos operando en modo TEC o modo TEG.

2.3 Modulación por ancho de pulso (PWM).

Para construir el PWM se realizaron varios diseños. El primero se lo basó en amplificadores operacionales lográndose obtener un control tanto para valores positivos como negativos de salida. El diagrama esquemático que lo apreciamos en la Figura 2.8, se basó en el diseño y construcción de osciladores basados en la histéresis.

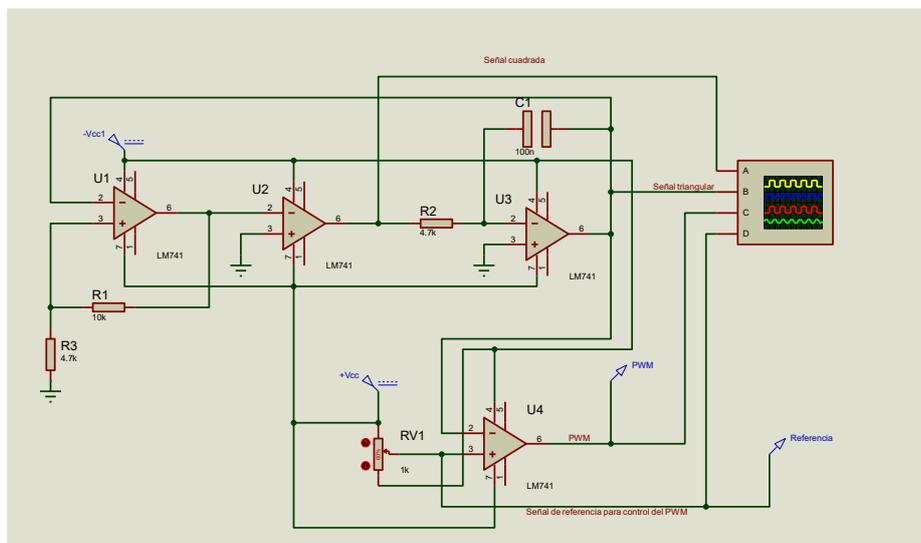


Figura 2. 8 Esquemático del generador de pulso

Este generador permitió generar una señal cuadrada y una señal triangular. A continuación, la señal triangular fue aprovechada para ser comparada con una señal de referencia que tomaba valores en el rango comprendido entre el valor pico positivo y el valor pico negativo. Los resultados fueron simulados y respondieron según lo esperado. Habiéndose asegurado el funcionamiento a partir de la simulación de este en Proteus Figura 2.9.

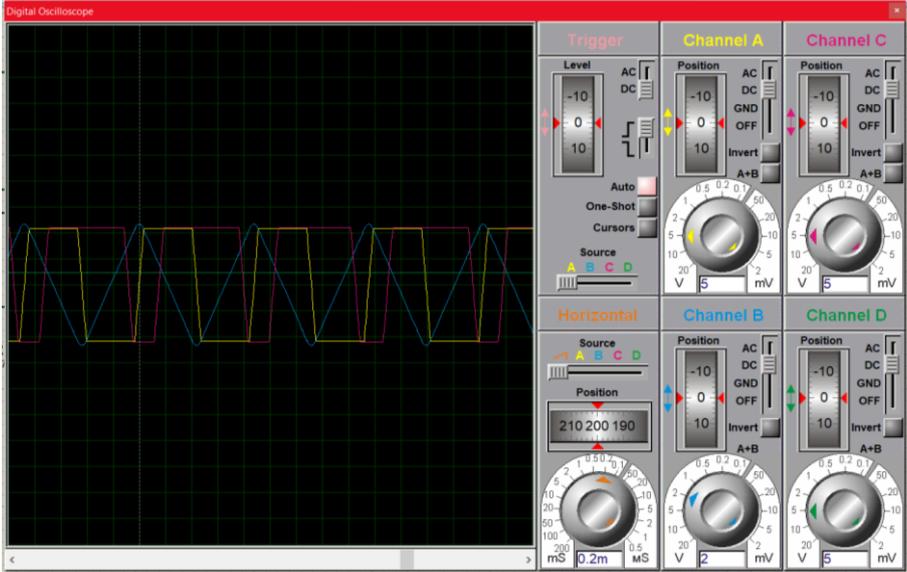


Figura 2. 9 Señales cuadrada y triangular del generador de pulso

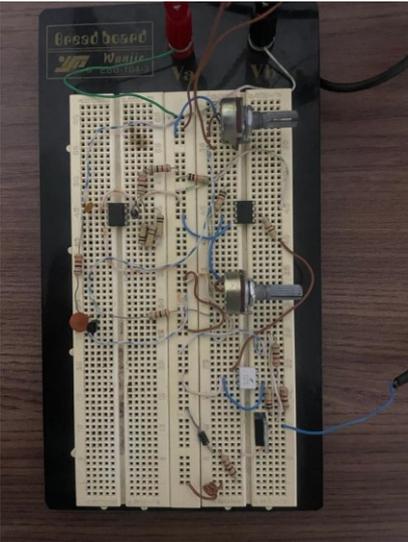


Figura 2. 10 Generador de pulsos en físico

Para el diseño anterior se consideró que los ventiladores podrían meter o sacar calor. Después de leer información relacionada al proyecto se estableció que esto no era necesario y por ello se procedió a realizar un nuevo diseño.

El nuevo diseño se lo hizo a partir del circuito integrado NE555 en una configuración que permitía generar una señal cuadrada como se ve en la Figura 2.10.

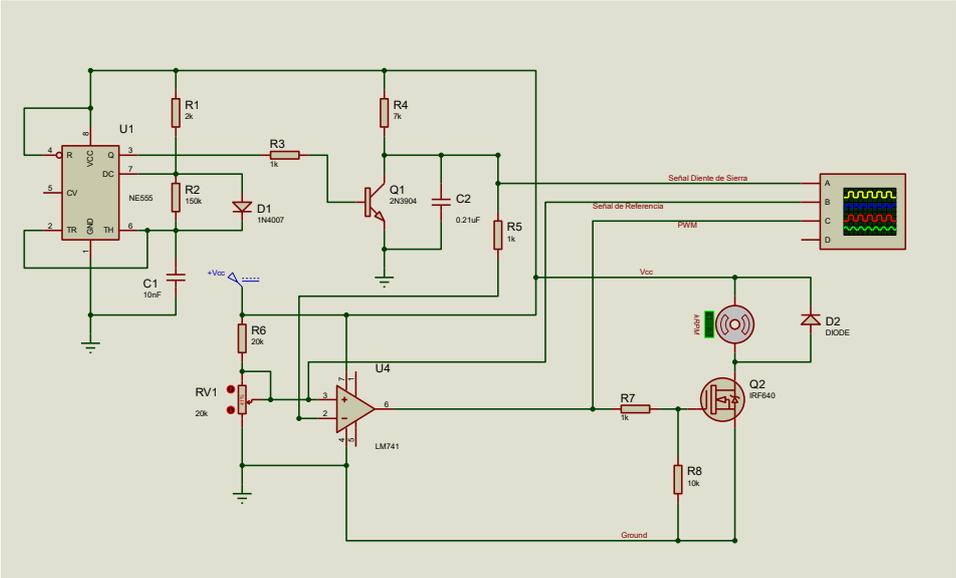


Figura 2. 11 Esquemático del generador de pulsos usando un NE 555

Este circuito también se lo simuló con Proteus Figura 2.11 y nos permitió generar una señal diente de sierra. Esta señal se la comparó con una señal referencial cuyo valor oscila en el rango comprendido entre los valores máximos y mínimo de dicha señal Figura 2.12

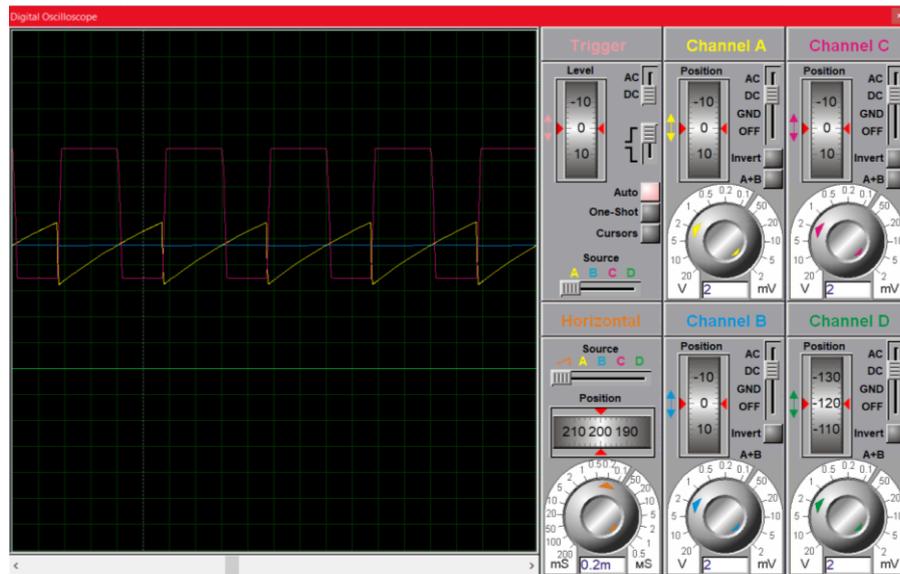


Figura 2. 12 Señales generadas por el modulador de ancho de pulso

Todo esto sería aprovechado para controlar un transistor que funcionaría como un interruptor electrónico actuando entre las zonas de corte y saturación Figura 2.13

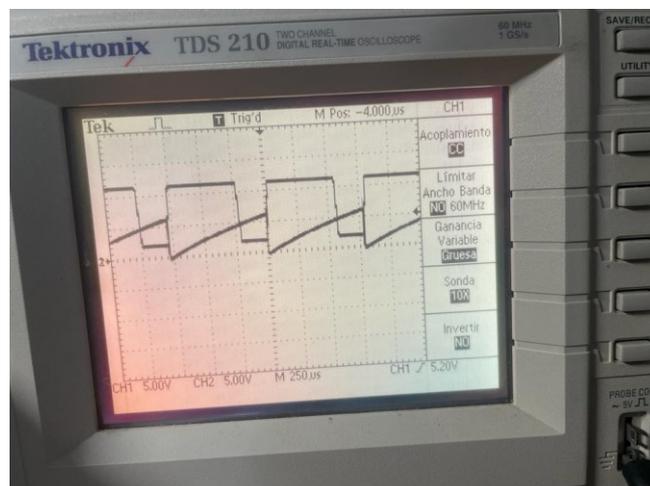


Figura 2. 13 Señal cuadra y diente de sierra obtenidas en osciloscopio

La estrategia que se planteó a utilizar se la representa como un diagrama de bloques Figura 2.14.

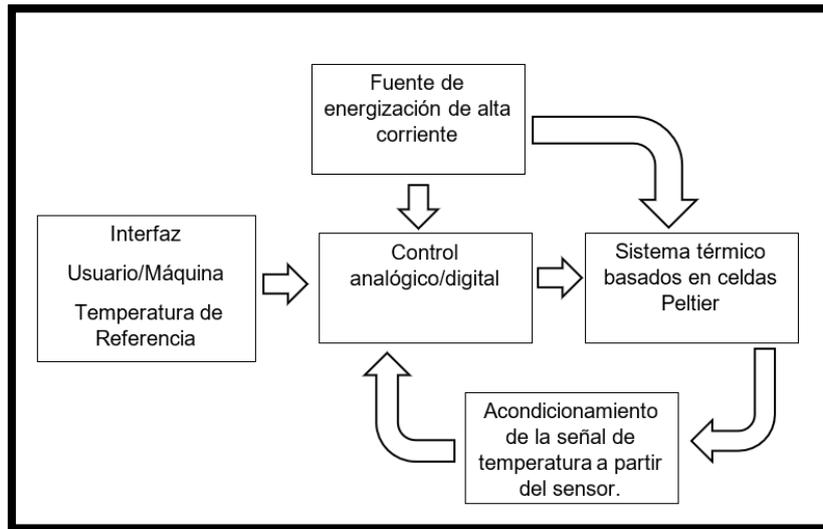


Figura 2. 14 Diagrama de bloques del sistema

2.4 Control PID

Como técnica de control se empleará la técnica tradicional PID donde se puede interactuar con los parámetros proporcionales, integrales y derivativos según lo demande la respuesta deseada del sistema.

Finalmente se hizo un controlador PI utilizando la estrategia utilizada en la Figura 2.15

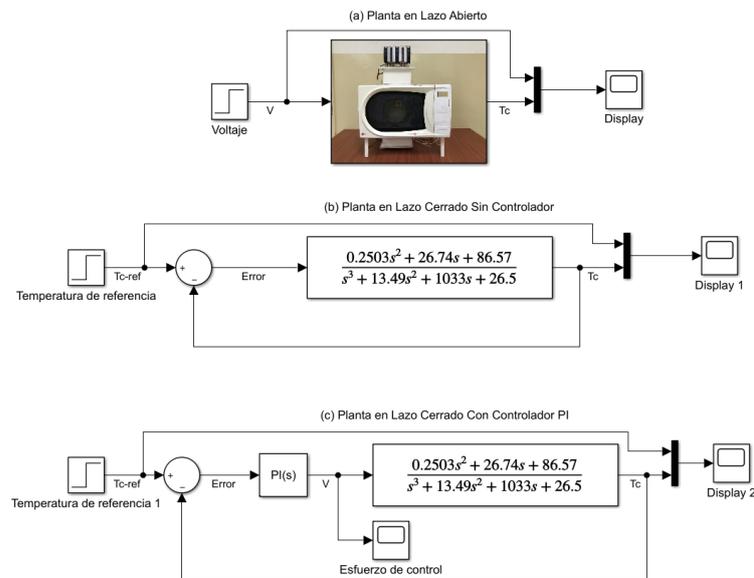


Figura 2. 15 Estrategia de diseño para control clásico PI

2.5 Sintonización de un controlador PID mediante prueba de ensayo y error.

Se debe ajustar las ganancias realizando pruebas para que se obtenga el comportamiento requerido de esta manera se sintoniza el controlador, se puede seguir el proceso a continuación.

- **Acción Proporcional**

Se debe aumentar la acción proporcional para que el error baje poco a poco y que su velocidad de respuesta aumente, una vez obtenida la respuesta requerida tanto en velocidad como el error se puede decir que el PID se sintonizo. Cuando esto no sucede se aumenta la acción derivativa.

- **Acción Integral**

Cuando el error dentro del sistema es más grande que el requerido se debe incrementar la constante integral hasta que disminuya con la rapidez deseada. Puede darse el caso de que el sistema sea inestable antes de conseguir la respuesta necesaria si esto es así se incrementa la acción derivativa.

2.6 Controlador por reubicación de polos

Se emplea la reubicación de polos para conseguir un comportamiento en el sistema basándose en la localización de polos que este tiene y luego reubicándolos en la posición deseada, de esta manera se logra que siga las especificaciones del diseño.

Para realizar el diseño de un controlador por medio de la reubicación de polos se requiere conocer la dinámica del sistema, de esta forma se conoce los polos originales y luego se procede a manipular su localización a lazo cerrado, obteniendo de esta forma una respuesta específica.

De acuerdo con la teoría de control la asignación de polos sigue una estructura de seguidor de referencia.

Utilizando el modelo —obtenido en formato de función de transferencia a partir de la identificación de la planta de laboratorio— realizado por el grupo de investigación de Herrera, se procedió a representarlo en espacio de estado empleando la función de Matlab `tf2ss`, obteniéndose las matrices A, B, C, D siendo $D=0$.

Teniendo el sistema en este nuevo formato se comprobó la controlabilidad y la observabilidad utilizando los criterios correspondientes. Para obtener la matriz de controlabilidad entre el par A, B se utilizó el comando `ctrb` y para la matriz de

observabilidad entre el par A, C se usó el comando *obsv*. Para ambos casos se determinó el rango y resultaron igual al orden del sistema, por lo tanto, el sistema es totalmente controlable y observable.

A partir de este punto se aplican las operaciones correspondientes acorde al nuevo sistema para determinar el controlador Kt , necesitándose las condiciones del polo deseado para armar el polinomio característico y se lo complementa con polos alejados para que no afecten la dinámica del sistema, es decir se complete el nuevo orden.

Una vez establecido los polos deseados se proceder a ejecutar en Matlab el comando *acker* que nos da como resultado Kt , a partir de éste obtenemos K y Ki que se aplicarán en el modelo representado en Simulink Figura 2.16.

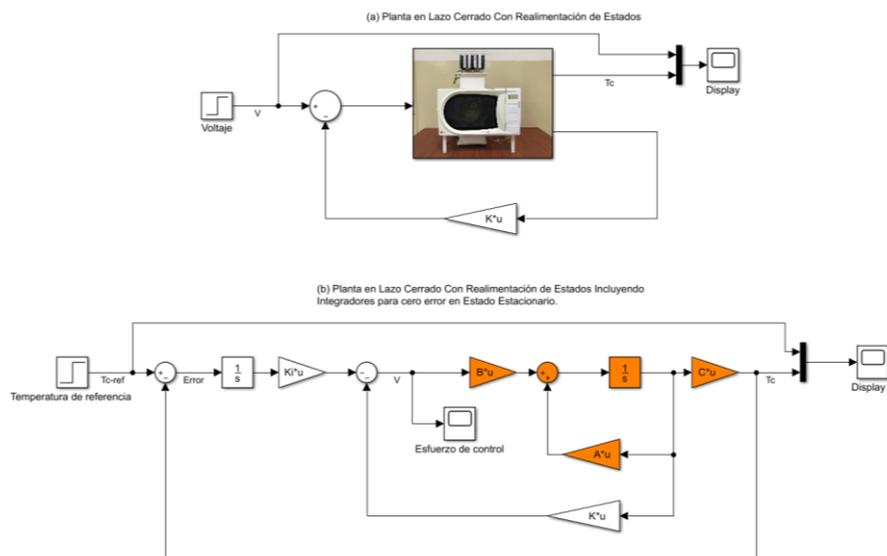


Figura 2. 16 Estrategia de diseño para control moderno basado en realimentación de estados utilizando reubicación de polos.

Para comprobar la técnica partiremos de las siguientes especificaciones deseadas: Se desea un sobre impulso menor al 10% y tiempo de estabilización de 1 segundo. Conociendo la respuesta de un sistema subamortiguado ante una entrada escalón unitario se procedió a determinar los polos deseados. Estos correspondieron a un ξ igual a 0.59116 y a un w_n igual a 6.7664 es decir que los polos deseados son los mostrados en (26).

$$s_{1,2} = -4 \pm 5.46j \quad (26)$$

El procedimiento se puede apreciar en el Anexo 3.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización del sistema de ventiladores

Debido a que el kit de refrigeración está basado en un sistema de dos celdas Peltier se desea controlar la temperatura del lado caliente por medio del sistema conformado por tres ventiladores, se procedió a analizar su comportamiento y se aprecia los valores correspondientes a la corriente haciendo un barrido de voltaje. En la Tabla 3.1 se tiene los valores de voltaje aplicado y corriente de consumo correspondiente.

Tabla 3. 1 Voltaje aplicado y corriente de consumo del sistema de ventiladores.

Voltaje [V]	Corriente [A]
11.9	0.62
11	0.57
10	0.52
8.9	0.47
8	0.42
7	0.37
6	0.33
4.9	0.28
4	0.23
3	0.17
2.2	0.10
2.1	0
1	0

A partir de los datos se procede a graficar la respuesta del consumo de corriente del sistema de ventiladores al aplicar una determinada tensión. Esta relación se muestra en la Figura 3.1. A partir de la tensión aplicada mayor a 2.1 voltios se tiene respuesta del sistema de ventiladores, antes de este valor el sistema no funciona.

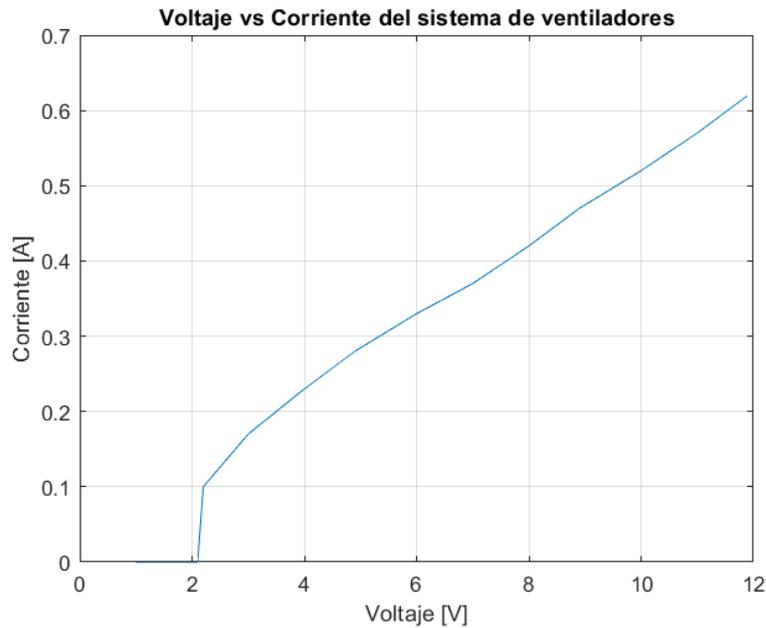


Figura 3. 1 Corriente vs voltaje del sistema de ventiladores

Conociendo como actúa el sistema de ventiladores se consideró que el PWM diseñado tendría una variación en este rango de voltaje.

3.2 Determinación de parámetros de un módulo de enfriamiento termoeléctrico (TEC).

Tomando como referencia los datos del fabricante del módulo de enfriamiento TEC1-12710 se ingresaron al modelo construido y se procedió a la simulación obteniendo todos los parámetros que fueron contrastados con los del fabricante para validar el modelo del módulo TEC mostrado en la Figura 3.2.

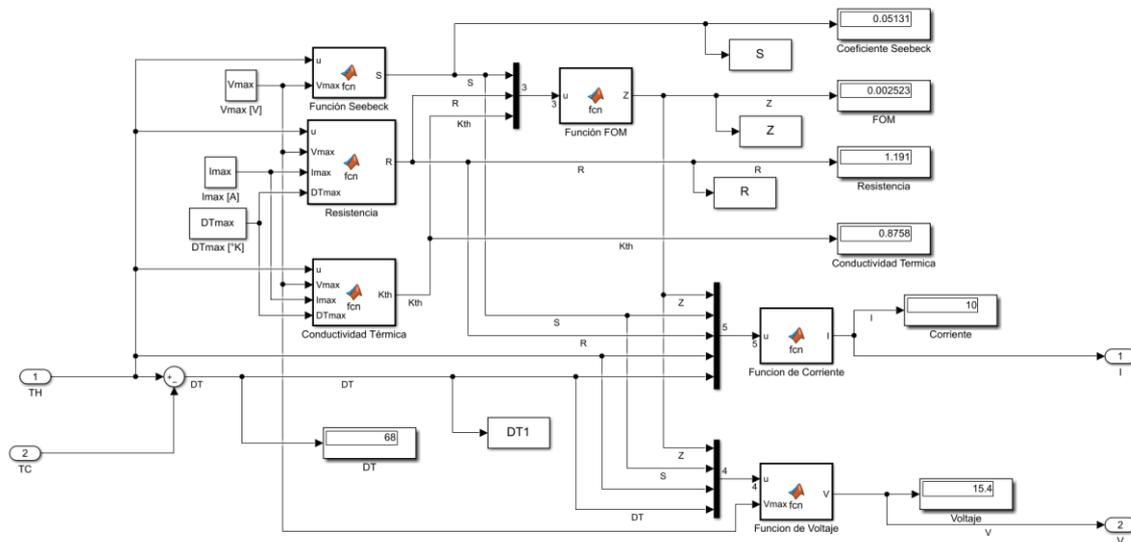


Figura 3. 2 Modulo_Peltier_TEC.m

En la Tabla 3.2 están los datos del fabricante usados para ejecutar la simulación, que serán ingresados en el archivo “Modulo_Peltier_TEC.m”, el cual fue desarrollado para este fin.

Tabla 3. 2 Datos del fabricante para TEC1-12710

Temperatura del lado caliente [°C]	27
Delta Tmax [°C]	68
I _{max} [A]	10
V _{max} [V]	15.4

Una vez ingresados los datos se procedió a la simulación del modelo “Modulo_Peltier_TEC_S.slx” dando como resultados los valores indicados en la Tabla 3.3

Tabla 3. 3 Parámetros obtenidos a partir del modelo para la TEC1-12710

Coeficiente Seebeck [V/°K]	0.05131
Resistencia Interna [Ohms]	1.191
Conductividad térmica [W/°K]	0.8758
Figure of merit (FOM) [°K ⁻¹]	0.002523

Los parámetros obtenidos a partir de la simulación corresponden con los que se encuentra en la hoja de datos del fabricante. Esto permitió validar el modelo desarrollado en Simulink como se aprecia en la Figura 3.3.

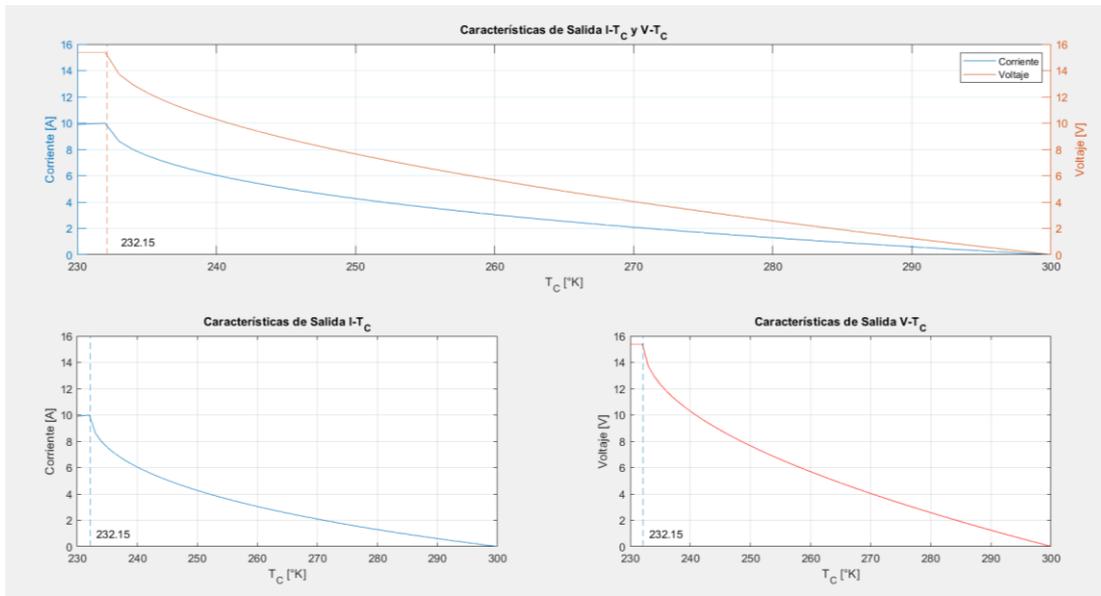


Figura 3. 3 Curvas características del modelo I-Tc y V-Tc

3.3 Determinación de parámetros de un módulo de generador termoeléctrico (TEG).

Tomando como referencia los datos del fabricante del módulo de generación y sus curvas características, éstos se ingresaron al modelo construido y se procedió a la simulación obteniendo todos los parámetros que fueron contrastados con los del fabricante para validar el modelo del módulo TEG mostrado en la Figura 3.4.

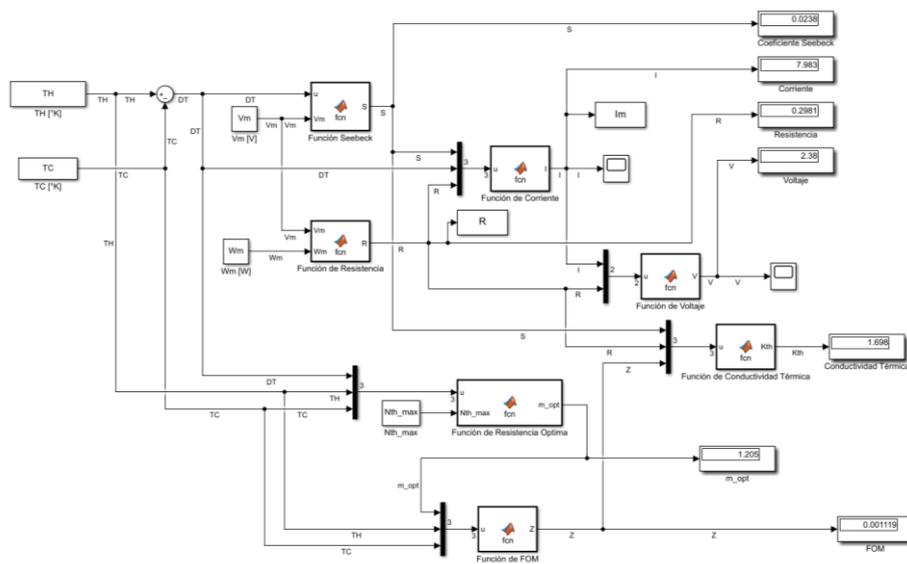


Figura 3. 4 Modulo_Peltier_TEG.m

En la Tabla 3.4 se aprecian los datos del fabricante necesarios para ejecutar la simulación, que serán ingresados en el archivo “Modulo_Peltier_TEG.m”, el cual fue desarrollado para este fin.

Tabla 3. 4 Dato del fabricante para HZ-20

Temperatura del lado caliente [°C]	230
Temperatura del lado frio [°C]	30
Voltaje igualado [V]	2.38
Potencia igualada [W]	19
Eficiencia optima [%]	4.5

Una vez ingresados los datos se procedió a la simulación dando como resultados los valores indicados en la Tabla 3.5

Tabla 3. 5 Parámetros obtenidos a partir del modelo para la TEC1-12710

Coefficiente Seebeck [V/°K]	0.0238
Resistencia Interna [Ohms]	0.2981
Conductividad térmica [W/°K]	1.698
Figure of merit (FOM) [°K ⁻¹]	0.001119

Los parámetros obtenidos a partir de la simulación corresponden con los de la hoja de datos del fabricante. Esto nos permitió validar el modelo desarrollado en Simulink como se muestra en la Figura 3.5.

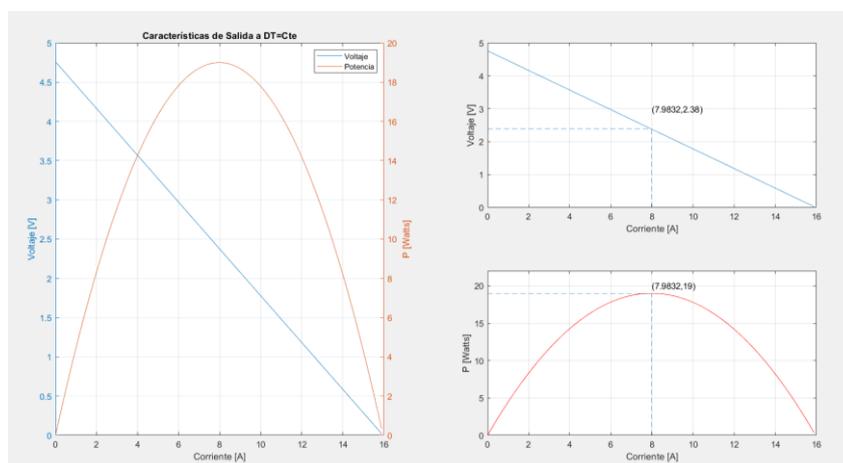


Figura 3. 5 Características de salida a DT=Cte

3.4 PWM implementado

A partir del circuito implementado se obtuvo una señal diente de sierra y una señal de control Figura 3.6.

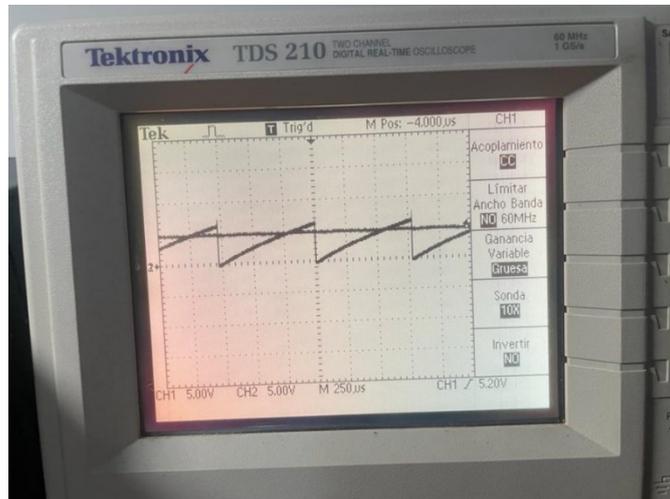


Figura 3. 6 Señal diente de sierra y señal de control.

Utilizando un comparador se logró obtener la señal PWM mostrada en la Figura 3.7 que será utilizada para aplicar al elemento actuador, en nuestro caso el sistema de ventiladores.

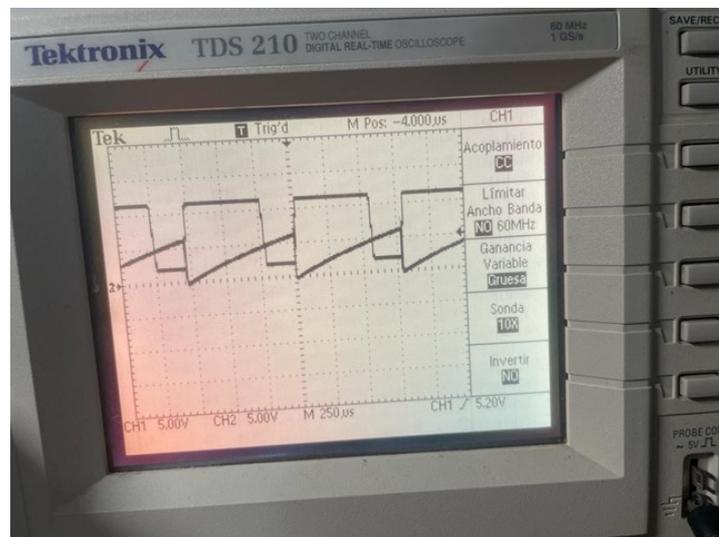


Figura 3. 7 Señal PWM implementada.

El PWM en forma práctica variaba desde un valor mínimo hasta un máximo de 12 voltios cumpliendo con el objetivo del diseño.

3.5 Resultados del Control PI

En la Figura 3.8 se aprecia la respuesta de la planta en lazo abierto ante una entrada paso.

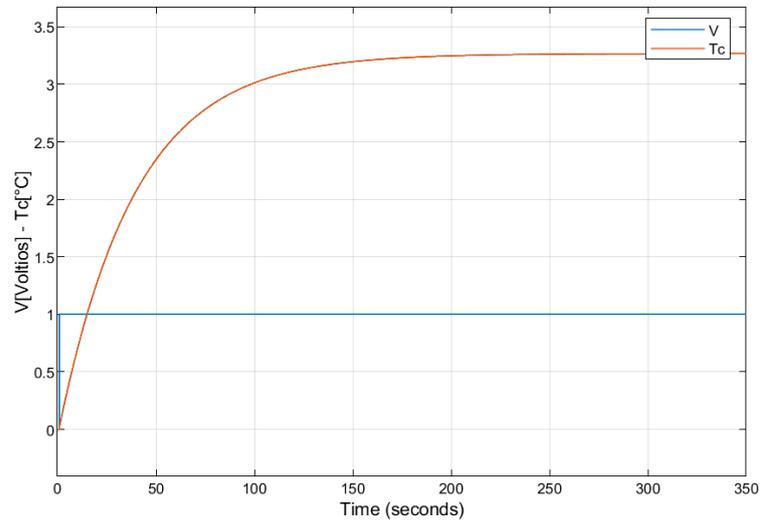


Figura 3. 8 Respuesta del sistema en lazo abierto

En la Figura 3.9 se aprecia la respuesta de la planta en lazo cerrado sin controlador ante una entrada paso.

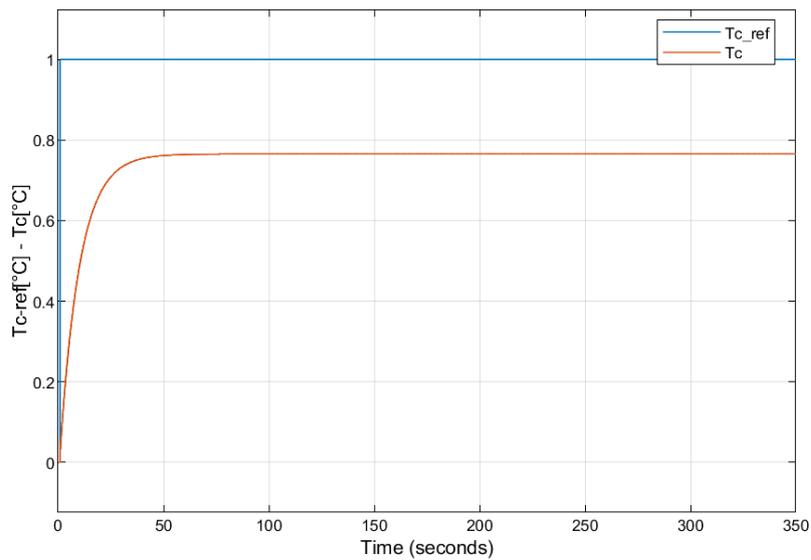


Figura 3. 9 Respuesta del sistema en lazo cerrado sin controlador

En la Figura 3.10 se aprecia la respuesta de la planta en lazo cerrado con controlador ante una entrada paso.

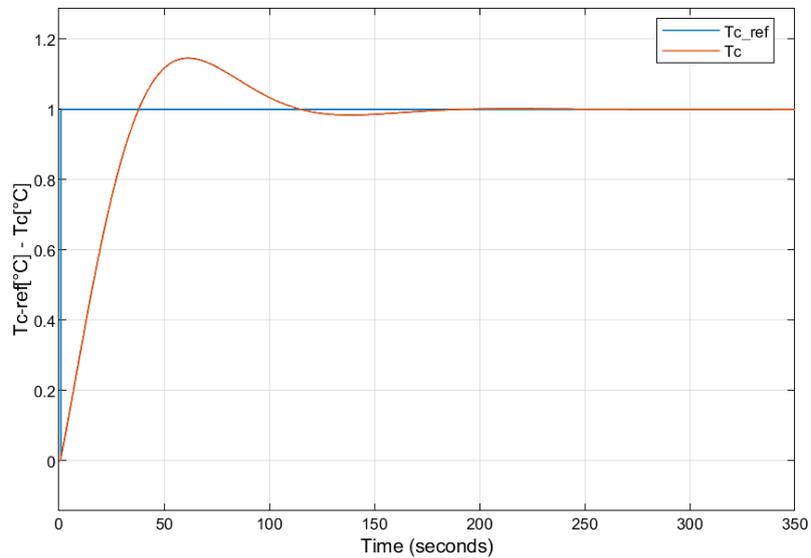


Figura 3. 10 Respuesta del sistema en lazo cerrado con controlador

En la Figura 3.11 se observa la respuesta del sistema utilizando el PID Tuner de Matlab dando como resultado un controlador del tipo PI.

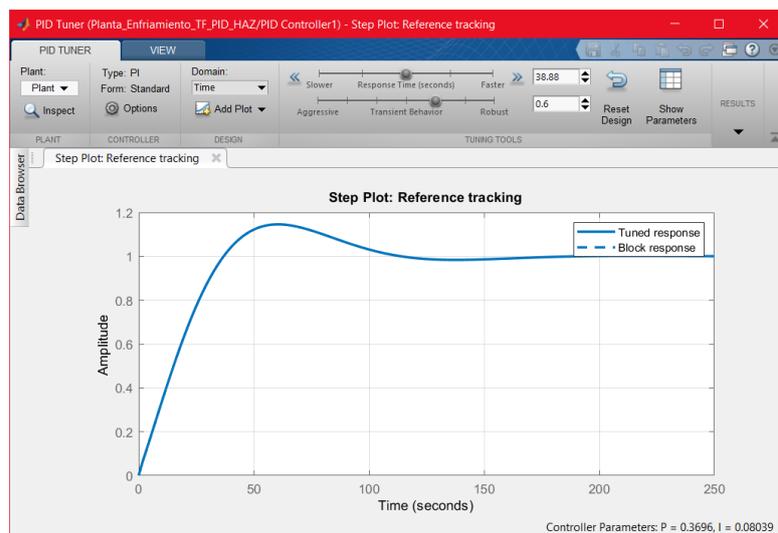


Figura 3. 11 Respuesta utilizando PID Tuner de MatLab

En la Figura 3.12 se muestran los parámetros del controlador PI, así como también las especificaciones de la respuesta del sistema.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.36959	0.36959
I	0.08039	0.08039
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	28 seconds	28 seconds
Settling time	104 seconds	104 seconds
Overshoot	14.6 %	14.6 %
Peak	1.15	1.15
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	60 deg @ 0.0514 rad/s	60 deg @ 0.0514 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Figura 3. 12 Parámetros del controlador PI y especificaciones de la respuesta del sistema

En la Figura 3.13 se presenta el bloque de parámetros PID generado por MatLab para el controlador PI.

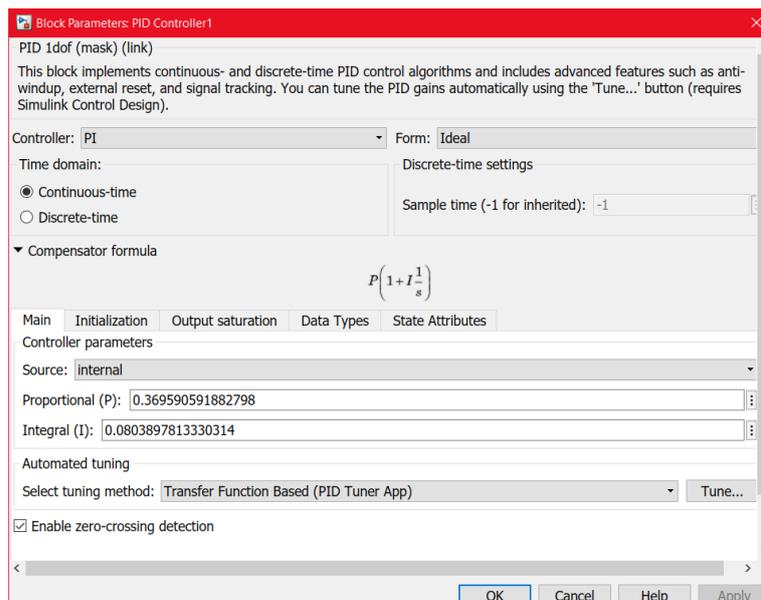


Figura 3. 13 Bloque de parámetros del controlador PI.

En la Figura 3.14 se aprecia la respuesta del esfuerzo de control realizado cuando la planta es excitada por una entrada paso.

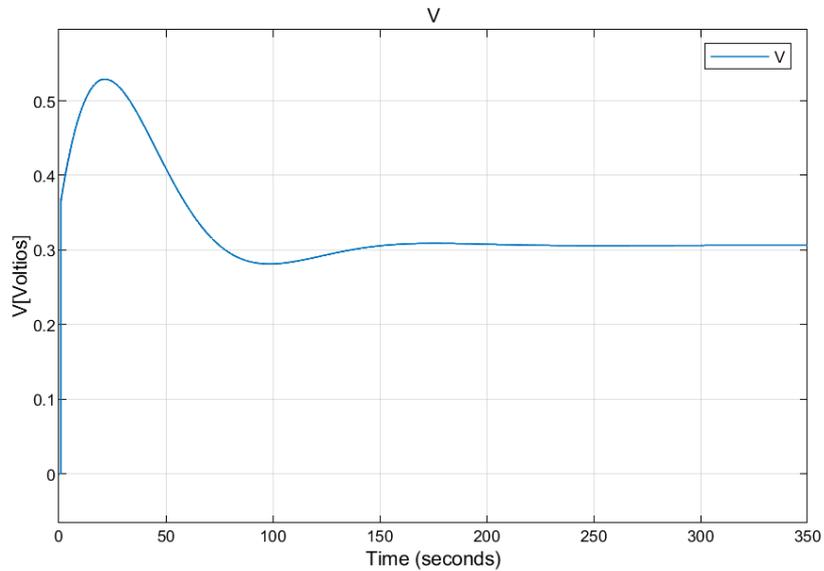


Figura 3. 14 Esfuerzo del controlador

3.6 Resultados del control en espacio de estados por reubicación de polos

En la Figura 3.15 se aprecia la respuesta del sistema en lazo abierto representado en espacio de estados.

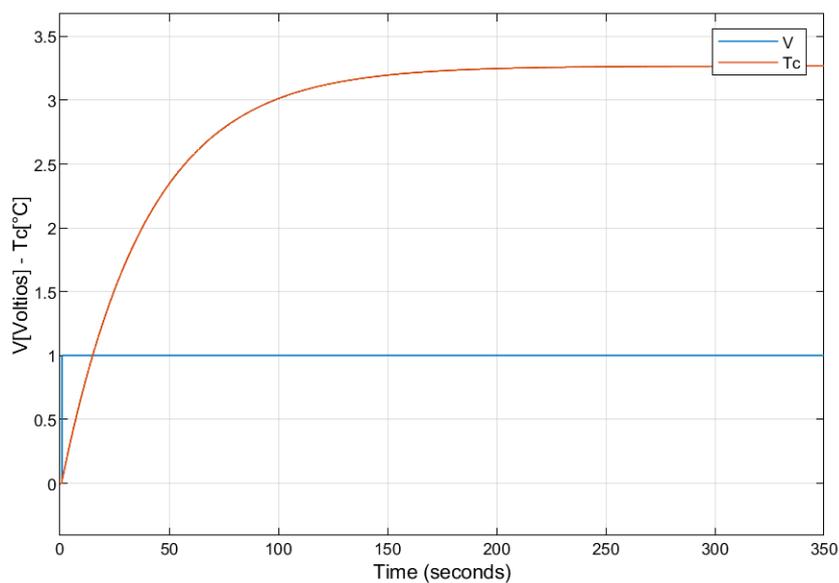


Figura 3. 15 Respuesta del sistema en lazo abierto

En la Figura 3.16 se aprecia la respuesta del sistema en lazo cerrado representado en espacio de estados.

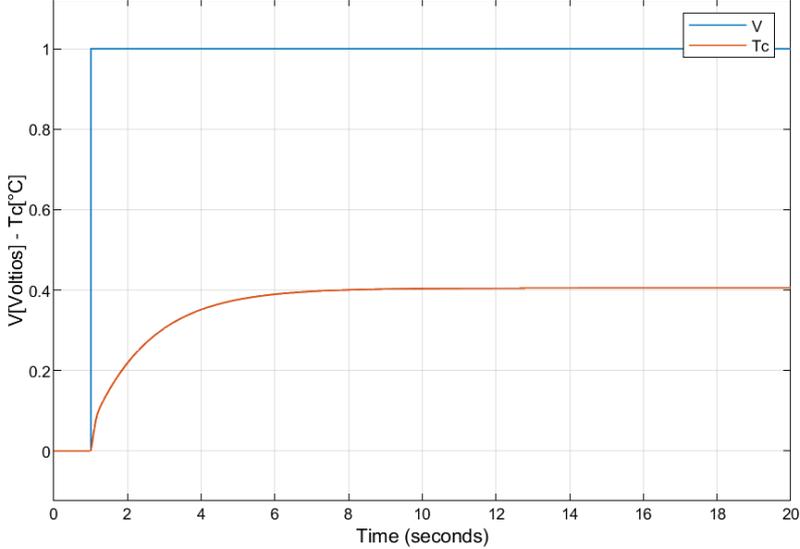


Figura 3. 16 Respuesta del sistema en lazo cerrado con realimentación de estados

En la Figura 3.17 se presenta la respuesta del sistema en lazo cerrado con realimentación de estados utilizando ubicación de polos.

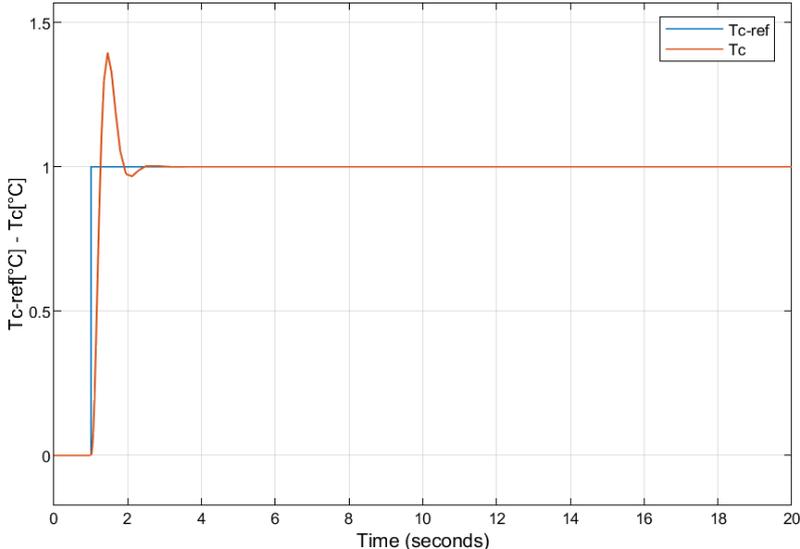


Figura 3. 17 Respuesta del sistema en lazo cerrado con realimentación de estados incluyendo integradores para error cero en estado estacionario

En la Figura 3.18 se aprecia la respuesta del esfuerzo de control realizado cuando la planta es excitada por una entrada paso.

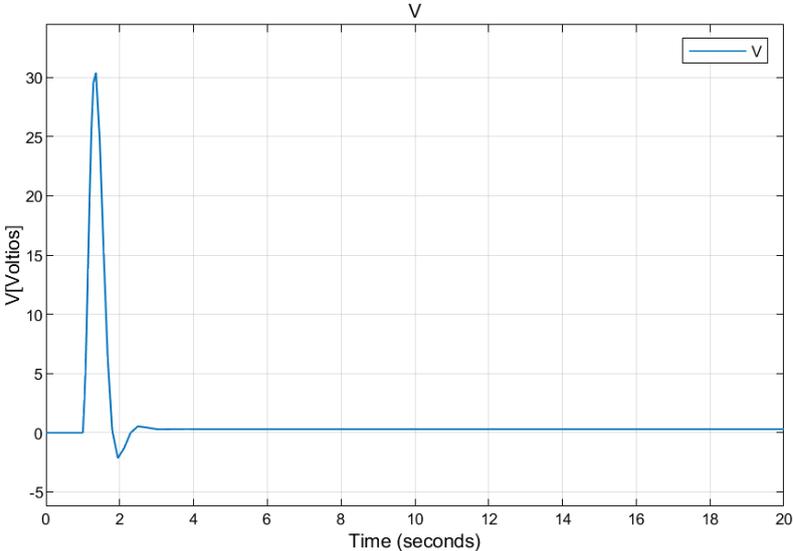


Figura 3. 18 Respuesta del esfuerzo del controlador

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- A partir de las pruebas realizadas sobre el kit de refrigeración basado en celdas Peltier se demostró que al variar la velocidad de los ventiladores del sistema de enfriamiento de la cara caliente se lograba variar la temperatura de la cara del lado frío.
- Los modelos construidos en Simulink a partir de las ecuaciones que relacionan la dinámica de las celdas Peltier, tanto para los módulos TEC como para los TEG cumplieron con las expectativas de la determinación de sus parámetros, ya que fueron comparados con los datos de las hojas de los fabricantes resultando valores muy similares, lo que permitió su validación.
- Los modelos construidos en Simulink también pueden ser utilizados para graficar las características de estos módulos, por ejemplo: I vs V , I vs P .
- El PWM diseñado a partir de los conocimientos de electrónica, fue simulado para comprobar su funcionamiento y después de ello se implementó físicamente, dando como resultados un PWM confiable que es usado para controlar el sistema de ventiladores.
- A partir del modelo de la planta se logró aplicar técnicas de control tanto tradicionales como modernas que cumplieran con las especificaciones deseadas de las respuestas como lo son el tiempo de estabilización y el sobre impulso.
- Con el control PI se obtuvo un tiempo de estabilización mayor que el que se logró con el controlador diseñado en espacio de estados mediante la técnica de ubicación de polos.

Recomendaciones

- Para futuras pruebas se recomienda considerar una celda Peltier independiente para su caracterización.
- Considerar una fuente de voltaje con la suficiente potencia para poder alimentar a la celda Peltier directamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfa Laval. (15 de mayo de 2022). *Intercambiador de calor: ¿ Qué es y para qué sirve?*
Obtenido de alfalaval: www.alfalaval.es
- Améstegui, M. (2001). *Apuntes de Control PID*. La Paz, Bolivia.
- Carlos Zorilla, V. A. (2022). *Diseño de un sistema de control de temperatura para una camara de pruebas experimentales de climatizacion, contrastando técnicas de control clásico vs moderno*. Guayaquil.
- Efrén Herrera, E. V. (2020). Temperature influences at the Myoelectric level in the Upper Extremities of the Human Body. *TOBEJ-14-28*, 15.
- Fluideco. (03 de diciembre de 2019). *Tipos de bombas periestáticas* . Obtenido de fluideco: www.fluideco.com
- Herrera, E. (2020). *Control Multivariable*. Guayaquil .
- Juan Gomar. (16 de octubre de 2018). *Cómo funciona la célula Peltier y que ventajas tiene*. Obtenido de profesionalreview: www.profesionalreview.com
- Luis Viera, J. J. (s.f.). *Acondicionamiento de señal de Temperatura mediante control PID*. Guayaquil .
- Madrid, E. U. (s.f.). *Modelado de una célula de Peltier*. Madrid.
- Pardo, C. (2022). *Controlador PID*. Tecno Recursos.
- Sergio D, P. C. (2006). *Control en el espacio de estado*. Madrid: Pearson, Prentice Hall.
- Simon Lineykin, S. B.-Y. (2019). *Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules*. 5.

Anexo 1

Programación del módulo TEC

```
clear all, close all, clc
%=====
%===== Datos de la Peltier =====
%=====
TH=27+273.15;
TC=-68+27+273.15;
Vmax=15.4; Imax=10; DTmax=68;
sim('Modulo_Peltier_TEC_S',1)
%=====
%===== Uso de Parámetros =====
%=====
R1=R(1,1); S1=S(1,1); Z1=Z(1,1);
TC1=[230:1:300];
I1=(S1*TC1-S1*sqrt(TC1.^2-2*(TH-TC1)/Z1))/R1;
V1=Vmax-S1*sqrt(TC1.^2-2*(TH-TC1)/Z1);
%=====
%===== Gráfica de características =====
%=====
figure(10)
yyaxis left
plot(TC1,I1);
ylim([0 16])
xlabel('T_C [°K]')
ylabel('Corriente [A]')
yyaxis right
plot(TC1,V1);
line([TC TC],[0 16],'LineStyle','--','LineWidth',0.1)
txt = num2str(TC);
text(TC+1,1,txt);
title('Características de Salida I-T_C y V-T_C')
ylabel('Voltaje [V]')
grid
legend('Corriente','Voltaje')
%=====
figure(20)
subplot(2,2,[1 2]);
yyaxis left
plot(TC1,I1);
ylim([0 16])
xlabel('T_C [°K]')
ylabel('Corriente [A]')
yyaxis right
plot(TC1,V1);
ylim([0 16])
line([TC TC],[0 16],'LineStyle','--','LineWidth',0.1)
txt = num2str(TC);
text(TC+1,1,txt);
title('Características de Salida I-T_C y V-T_C')
```

```

ylabel('Voltaje [V]')
grid
legend('Corriente', 'Voltaje')

subplot(2,2,3);
plot(TC1,I1);
ylim([0 16])
line([TC TC],[0 16], 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 0.1)
txt = num2str(TC);
text(TC+1,1,txt);
title('Características de Salida I-T_C')
xlabel('T_C [°K]')
ylabel('Corriente [A]')
grid

subplot(2,2,4);
plot(TC1,V1, 'r');
ylim([0 16])
line([TC TC],[0 16], 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 0.1)
txt = num2str(TC);
text(TC+1,1,txt);
title('Características de Salida V-T_C')
xlabel('T_C [°K]')
ylabel('Voltaje [V]')
grid

```

Anexo 2

Programación del módulo TEG

```
clear all, close all, clc
%=====
%===== Datos de la Peltier =====
%=====
TH=230+273.15;
TC=30+273.15;
Vm=2.38;
Wm=19;Nth_max=4.5/100;
sim('Modulo_Peltier_TEG_S',1)
%=====
%===== Uso de Parámetros - Ok =====
%=====
RL=R(1,1);
I_sc=2*Im(1,1);
I1=0:0.1:I_sc;
V1=-RL*(I1-I_sc);
P=V1.*I1;
N=(P/Wm)*Nth_max*100;
%=====
%===== Gráfica de características =====
%=====
figure(10)
yyaxis left
% plot(I1,V1,I1,N,'g');
plot(I1,V1);
xlabel('Corriente [A]')
% ylabel('Voltaje [V] / Eficiencia [%]')
ylabel('Voltaje [V]')
yyaxis right
plot(I1,P);
title('Características de Salida a DT=Cte')
ylabel('P [Watts]')
grid
% legend('Voltaje','Eficiencia','Potencia')
legend('Voltaje','Potencia')
%=====
figure(20)
% subplot(3,2,[1 3 5]);
subplot(2,2,[1 3]);
yyaxis left
% plot(I1,V1,I1,N,'g');
plot(I1,V1);
xlabel('Corriente [A]')
% ylabel('Voltaje [V] / Eficiencia [%]')
ylabel('Voltaje [V]')
yyaxis right
```

```

plot(I1,P);
title('Características de Salida a DT=Cte')
ylabel('P [Watts]')
grid
% legend('Voltaje','Eficiencia','Potencia')
legend('Voltaje','Potencia')

% subplot(3,2,2);
subplot(2,2,2);
plot(I1,V1);
ylim([0 5])
line([0 7.9832],[2.38 2.38],'LineStyle','--','LineWidth',0.1)
line([7.9832 7.9832],[0 2.38],'LineStyle','--','LineWidth',0.1)
txt = '(7.9832,2.38)';
text(7.9832,3,txt);
xlabel('Corriente [A]')
ylabel('Voltaje [V]')
grid

% subplot(3,2,4);
% plot(I1,N,'g');
% ylim([0 6])
% line([0 7.9832],[4.5 4.5],'LineStyle','--','LineWidth',0.1)
% line([7.9832 7.9832],[0 4.5],'LineStyle','--','LineWidth',0.1)
% txt = '(7.9832,4.5)';
% text(7.9832,5,txt)
% xlabel('Corriente [A]')
% ylabel('Eficiencia [%]')
% grid

% subplot(3,2,6)
subplot(2,2,4)
plot(I1,P,'r');
ylim([0 22])
line([0 7.9832],[19 19],'LineStyle','--','LineWidth',0.1)
line([7.9832 7.9832],[0 19],'LineStyle','--','LineWidth',0.1)
txt = '(7.9832,19)';
text(7.9832,20,txt);
xlabel('Corriente [A]')
ylabel('P [Watts]')
grid

```

Anexo 3

Programación de la planta con Módulo Peltier

```
clear all, close all, clc
%=====
%===== Datos de la Planta =====
%=====
num=[0.2503 26.74 86.57];
den=[1 13.49 1033 26.5];
%Representación en Función de Transferencia
Gtf_HAZ=tf(num,den)
%=====
%===== Respuesta a una entrada paso =====
%=====
figure(10)
step(Gtf_HAZ,350)
grid
%Ejecutar este archivo antes de usar el Simulink
% %Representación del Sistema en Espacio de Estados
[A,B,C,D]=tf2ss(num,den)
% [A,B,C,D]=ssdata(Gss_HAZ)
%Determinación de la Controlabilidad del sistema
RangoCt=rank(ctrb(A,B))
%Determinación de la Observabilidad del sistema
RangoObs=rank(observ(A,C))
pol_car=poly(A)
roots(pol_car)
n=length(A)
cerol=zeros(n,1);
Aol=[A,cerol;
     -C,0] % Aol A de lazo abierto
Bol=[B;
     -D] % Bol B de lazo abierto
% Obtencion de Kt
polos_des=[-4+5.46*j,-4-5.46*j,-12,-12]
Kt=acker(Aol,Bol,polos_des) % Kt=[K Ki]
K=Kt(1:n)
Ki=Kt(n+1)
```

Resultados

Gtf_HAZ =

$$\frac{0.2503 s^2 + 26.74 s + 86.57}{s^3 + 13.49 s^2 + 1033 s + 26.5}$$

Continuous-time transfer function.

A =

1.0e+03 *

-0.0135	-1.0330	-0.0265
0.0010	0	0
0	0.0010	0

B =

1
0
0

C =

0.2503 26.7400 86.5700

D =

0

RangoCt =

3

RangoObs =

3

pol_car =

1.0e+03 *

0.0010 0.0135 1.0330 0.0265

ans =

-6.7322 +31.4218i
-6.7322 -31.4218i
-0.0257 + 0.0000i

n =

3

Aol =

1.0e+03 *

-0.0135	-1.0330	-0.0265	0
0.0010	0	0	0
0	0.0010	0	0
-0.0003	-0.0267	-0.0866	0

Bol =

1
0
0
0

polos_des =

-4.0000 + 5.4600i -4.0000 - 5.4600i -12.0000 + 0.0000i -12.0000 + 0.0000i

Kt =

18.5100 -670.2619 187.3174 -76.2027

K =

18.5100 -670.2619 187.3174

Ki =

-76.2027