

**MODELADO Y CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA BARRA CON
PROPÓSITOS DIDÁCTICOS PARA LA ASIGNATURA DE SISTEMAS
CONTROL**



WILLIAM RICARDO GONZALEZ ROBLES

UNIVERSIDAD DE INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2011

**MODELADO Y CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA BARRA CON
PROPÓSITOS DIDÁCTICOS PARA LA ASIGNATURA DE SISTEMAS
CONTROL**

WILLIAM RICARDO GONZALEZ ROBLES

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

CARLOS RODRIGO CORREA, Ph.D.

UNIVERSIDAD DE INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2011

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi mama por su paciencia y apoyo durante toda mi vida,

A mi novia por haber compartido momentos tan felices,

A todos mis tíos que siempre estuvieron apoyándonos cuando los necesitamos,

Mis hermanos por haber compartido una vida al lado de ustedes,

Familiares y allegados que de una u otra manera hicieron posible mi estudio,

Amigos que conocí en la universidad con los que compartí momentos de alegría,

Pero principalmente este logro es para Dios y a mi papa Q.D.E.P

AGRADECIMIENTOS

A Rodrigo Correa Cely, Director del Trabajo de Grado, por su colaboración y guía durante el desarrollo de este trabajo.

A Carlos Angulo, por gran apoyo durante el desarrollo y la finalización de este trabajo.

A Ivan Amaya y Ricardo Cañas, compañeros del grupo de investigación, por su aporte en temas del desarrollo de esta tesis.

Grupo de investigación CEMOS, por brindarme un espacio para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo.

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, en especial a los profesores que de alguna u otra manera, me formaron para ser Ingeniero Electrónico

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	18
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Generales.	18
1.1.2 Específicos.....	18
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2.1 Justificación.	18
2 MARCO TEÓRICO	20
2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR	20
2.1.1 Conducción térmica	20
2.1.2 Convección	21
2.1.3 Radiación	21
2.1.4 Primera ley de la termodinámica.....	21
2.1.5 Ecuación de transferencia de calor.....	22
2.2 CONTROL DE POTENCIA POR CONTROL DE FASE.....	23
2.3 MÉTODOS NUMÉRICOS EN LA SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES PARCIALES - PDE -.....	24
3 PROTOTIPO.....	26
3.1 MODELO FÍSICO	26
3.2 CONDICIONES INICIALES	30
3.3 SOLUCIÓN NUMÉRICA	31
3.3.1 Método de Diferencias Finitas.....	31
3.3.1.1 Nodo m	32

3.3.1.2	Nodo 0	32
3.3.1.3	Nodo L/2	34
3.3.1.4	Desarrollo modelo Crank-Nicolson	34
3.4	SENSADO Y TARJETA DE ADQUISICIÓN.....	37
3.4.1	Termocuplas	38
3.4.2	Filtros electrónicos	40
3.4.3	Convertidor analógico-digital y protocolo de comunicación I2C	51
3.4.4	Detección de cruce por cero y esquema de potencia	52
3.4.5	Tarjeta de potencia y aislamiento eléctrico	55
3.4.6	Interfaz computador – tarjeta de adquisición	55
3.5	INTERFAZ GUI Y CÓDIGO DE SOLUCIÓN NUMÉRICA EN MATLAB.	57
3.6	CONTROLADOR INDUSTRIAL OMRON E5CK.....	58
4	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES.....	59
4.1	SIMULACIÓN NUMÉRICA, PRUEBAS MÉTODO CRANK - NICOLSON.....	59
4.2	PRUEBAS FÍSICAS, EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS EN EL PROTOTIPO REAL	67
4.2.1	Experimento <i>espacio abierto</i>	68
4.2.2	Experimento <i>espacio cerrado</i>	71
4.2.3	Comparación de los métodos experimental y simulación	73
4.3	PRUEBAS FÍSICAS, CONTROLADOR INDUSTRIAL OMRON E5CK.....	76
5	OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.....	80
6	RECOMENDACIONES.....	82
	REFERENCIAS	83
	ANEXOS.....	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Referencia de las cotas usadas en Figura 3 y Figura 4.....	29
Tabla 2. Coeficientes de Polinomio de Orden Nueve Para la Corrección de Temperatura en la Termocupla Tipo K en el Rango de 0 a 500 °C [9]	40
Tabla 3. Valores de resistencia y capacitancias para las frecuencias de corte en los filtros.....	44
Tabla 4. Frecuencia de corte en los filtros con los valores comerciales	44
Tabla 5. Frecuencia de corte en los filtros hallados en PSPICE.....	48
Tabla 6. Variables Usadas para Prueba de Variación de Nodos.....	60
Tabla 7. Variables usadas para prueba de variación de diferencial de tiempo.....	62
Tabla 8. Variables usadas para Prueba de Variación de Propiedades del Cobre	66
Tabla 9. Ficha técnica para la simulación con el método numérico Crank-Nicolson	74
Tabla 10. Constantes de Configuración del Controlador Industrial E5CK para Realizar Control en los Puntos de Medida.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Volumen de control y los agentes que interactúan en la transferencia de calor en un elemento diferencial.	22
Figura 2. Relación potencia en la resistencia cambiando el ángulo de disparo de la onda sinusoidal.	24
Figura 3. Diseño del prototipo en 3 dimensiones acotado	27
Figura 4. Vista de corte lateral del prototipo acotada y se detallan los elementos ladrillo refractario, resistencia de calentamiento y la barra de cobre.	27
Figura 5. Foto del prototipo real, se enumeran las termocuplas y se muestra el controlador industrial.....	28
Figura 6. Acercamiento al prototipo real. Se observan las temocuplas.....	28
Figura 7. Diagrama de bloque general del prototipo.	30
Figura 8. Representación gráfica del nodo m y de los agentes que interactúan en la transferencia de calor.....	32
Figura 9. Representación gráfica del nodo 0 y de los agentes que interactúan en la transferencia de calor.....	33
Figura 10. Representación gráfica del nodo L/2 y de los agentes que interactúan en la transferencia de calor.....	34
Figura 11. Matriz A del método Crank - Nicolson.....	35
Figura 12. Matriz B del método Crank - Nicolson.....	36
Figura 13. Vectores C , T_j y $T_j + 1$ del método Crank - Nicolson.	36
Figura 14. Diagrama de bloques tarjeta de adquisición	38
Figura 15. Topología de amplificación diferencial	41
Figura 16. Topología de amplificador seguidor.	43
Figura 17. Topología utilizada para realizar barrido en frecuencia AC, para una entrada diferencial.	45
Figura 18. Tensión de salida del primer filtro vs. Frecuencia.	46
Figura 19. Tensión de salida de la segunda etapa de filtrado vs. Frecuencia.....	46

Figura 20. Tensión de salida del filtro pasivo vs. Frecuencia.....	47
Figura 21. Topología utilizada para realizar barrido en frecuencia AC, para una entrada en modo común.	48
Figura 22. Tensión de salida primer filtro, con fuente en modo común vs. Frecuencia.	49
Figura 23. Topología utilizada para realizar barrido en DC, para una entrada diferencial.	50
Figura 24. Tensión de salida primer amplificador vs. Tensión entrada en DC.	50
Figura 25. Topología de detección de cruce por cero.	52
Figura 26. Señales FASE+, FASE- y la diferencial de estas dos.	53
Figura 27. Señal de sincronía en cruce por cero.....	54
Figura 28. Topología en manejo de potencia.	54
Figura 29. Interfaz grafica de usuario.....	57
Figura 30. Método de Crank - Nicolson desarrollado con 10, 30, 60 y 100 nodos.	61
Figura 31. Método de Crank - Nicolson desarrollado con 100, 250, y 500 nodos.	61
Figura 32. Método de Crank - Nicolson desarrollado con diferentes diferenciales de tiempo 10, 1, 0,5 y 0,25.	63
Figura 33. Ampliación de Figura 32.	63
Figura 34. Método de Crank - Nicolson desarrollado con diferentes diferenciales de tiempo 0,25,0,125 y 0,05.	64
Figura 35. Ampliación de Figura 34.	65
Figura 36. Desarrollo por medio de Crank - Nicolson cambiando los valores de los coeficientes de conducción térmica y del calor específico a presión constante.	67
Figura 37. Curva de calentamiento con generación.....	69
Figura 38. Curva de calentamiento sin generación, con temperatura inicial de 139°C.....	69

Figura 39. Curva de calentamiento con generación.....	72
Figura 40. Comparación de curvas de generación con espacio abierto y cerrado en punto de medida en 22cm.....	73
Figura 41. Comparación método numérico vs. Experimento en el nodo 2 sin generación.	74
Figura 42. Comparación método numérico vs Experimento en el nodo 2 sin generación, en el rango de temperatura entre 70 y 0°C.....	75
Figura 43. Autoconfiguración en el punto de medida 3 situado a 0,33 m del ladrillo refractario de soporte.....	77
Figura 44. Funcionamiento del controlador variando el referencia de 140 . °C a 60 °C y luego a 100 °C	78
Figura 45. Funcionamiento del controlador con referencia de 100 °C en el punto de medida 2	79
Figura 46. Funcionamiento del controlador con referencia de 100 °C en el los punto tres puntos medida	79

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO PARA EL PROYECTO DE GRADO MODELADO Y CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA BARRA CON PROPÓSITOS DIDÁCTICOS PARA LA ASIGNATURA SISTEMAS DE CONTROL	85
ANEXO B. IMÁGENES DE LAS PIEZAS QUE CONFORMAN EL PROTOTIPO..	90
ANEXO C. PCB DE LAS TARJETAS ADQUISICIÓN, DETECTOR CRUCE POR CERO Y ACOPLADOR MODULO JM60	94
ANEXO D. LISTA DE COMANDOS DEL CONTROLADOR INDUSTRIAL E5CK DE OMRON	100

RESUMEN

TÍTULO: MODELADO Y CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA BARRA CON PROPÓSITOS DIDÁCTICOS PARA LA ASIGNATURA DE SISTEMAS CONTROL*

AUTOR: WILLIAM RICARDO GONZALEZ ROBLES**

PALABRAS CLAVES: Transferencia de Calor, Temperatura, Adquisición, Modelado, Didáctico, Solución Numérica, Controlador, Prototipo.

DESCRIPCIÓN:

En este documento se desarrolla el análisis, la solución numérica y el modelado, para la transferencia de calor en una barra de cobre. También, se diseña un prototipo para realizar pruebas experimentales, que permita comparar el comportamiento de la temperatura, con soluciones de métodos numéricos. Asimismo, se desarrolla una tarjeta de adquisición para medir la temperatura en el montaje experimental, que simultáneamente es visualizada por medio de una interfaz gráfica para usuario en un computador.

En el segundo capítulo de este documento, se realiza un resumen de los conocimientos necesarios para el desarrollo del material didáctico. En el tercero, se describe físicamente el prototipo; de igual forma, se desarrolla el análisis de un método numérico para la solución de la ecuación de la transferencia de calor e igualmente, se diseñan las tarjetas de adquisición y potencia para el control de temperatura en la barra de cobre. Por otra parte, en la cuarta sección se realizan pruebas de simulación numérica y los resultados se contrastan con los del modelo real. También, se utiliza el controlador industrial E5CK como herramienta de aprendizaje para los estudiantes de la asignatura sistemas de control y para finalizar, se redacta un manual de usuario de la operación del prototipo, que se anexa en éste libro.

* Trabajo de Grado Modalidad Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ph.D. Carlos Rodrigo Correa Cely

ABSTRACT

TITLE: MODELING AND CONTROL OF TEMPERATURE IN A BAR FOR EDUCATIONAL PURPOSES IN CONTROL SYSTEMS SUBJECT *

AUTHOR: WILLIAM RICARDO GONZALEZ ROBLES**

KEYWORDS: Heat Transfer, Temperature, Acquisition, Modeling, Didactic, Numeric Solution, Controller, Prototype.

DESCRIPTION:

This paper develops the analysis, modeling and numerical solution for heat transfer in a copper bar. Also, design a prototype for testing purposes and compare the behavior of temperature with the solution of numerical methods. It also develops an acquisition card to measure the temperature in the experimental setup, which is simultaneously displayed in a graphical user interface on a computer.

In the second chapter of this document, a summary is made of the knowledge required for the prototype development. In the third, physically described the prototype, and likewise, develops the analysis of a numerical method for solving the equation of heat transfer and also cards are designed for power and acquisition for temperature control in the copper bar. Moreover, in the fourth section tests are performed and numerical simulation results are compared with the actual model. Also, industrial controller E5CK is used as learning tool for students of the control systems subject and finally a manual for the operation of the prototype has been written.

* Working Degree mode Research.

** Faculty of Physical-Mechanics Engineering School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: Ph.D. Carlos Rodrigo Correa Cely

INTRODUCCIÓN

Hoy en día el mundo cambia constantemente, por consiguiente las industrias deben estar a la vanguardia para ser competitivas y rentables. Por lo tanto, las empresas necesitan controlar sus procesos productivos y tener sistemas de control que sean lo bastante eficientes, con el propósito de mantener la competitividad.

La temperatura, es unas de las variables que comúnmente se controlan en sistemas y/o plantas, siendo sensible en procesos tales como la fundición de metales, neveras, incubadoras, ambientes, pasteurización, dispositivos electrónicos y otros más. Por consiguiente, se requiere mantener la operación en el punto de consigna, con el fin de obtener los resultados deseados; una manera de realizar el control, es por medio de la estrategia PID, que se desarrolla como parte del material didáctico de este trabajo.

Dada la necesidad de automatizar los sistemas de producción en las industrias, se requieren profesionales con experiencia en las estrategias de control. Por lo tanto, este proyecto desarrolla un prototipo, que controla la temperatura en una barra metálica, con el fin de que el estudiante de la asignatura sistemas de control, pueda realizar una práctica experimental y así profundizar en los conocimientos adquiridos en la parte teórica de la materia.

En este documento se desarrolla el análisis, la solución numérica y el modelado, para la transferencia de calor en una barra de cobre. También, se diseña un prototipo para realizar pruebas experimentales, que permita comparar el comportamiento de la temperatura, con soluciones de métodos numéricos. Asimismo, se desarrolla una tarjeta de adquisición para medir la temperatura en el montaje experimental, que simultáneamente es visualizada por medio de una interfaz gráfica para usuario en un computador.

En el segundo capítulo de este documento, se realiza un resumen de los conocimientos necesarios para el desarrollo del material didáctico. En el tercero, se describe físicamente el prototipo; de igual forma, se desarrolla el análisis de un método numérico para la solución de la ecuación de la transferencia de calor e igualmente, se diseñan las tarjetas de adquisición y potencia para el control de temperatura en la barra de cobre. Por otra parte, en la cuarta sección se realizan pruebas de simulación numérica y los resultados se contrastan con los del modelo real. También, se utiliza el controlador industrial E5CK como herramienta de aprendizaje para los estudiantes de la asignatura sistemas de control y para finalizar, se redacta un manual de usuario de la operación del prototipo, que se anexa en éste libro.

1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Generales.

Modelar y construir un sistema de control de temperatura, en una barra con propósitos didácticos.

1.1.2 Específicos.

- Desarrollar el modelo matemático de la transferencia de calor de una barra.
- Diseñar un prototipo, que permita realizar pruebas con la estrategia de control PID.
- Desarrollar un método de solución numérico, que permita simular el comportamiento de la transferencia de calor de la barra.
- Redactar un manual de usuario, para la operación del prototipo construido.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la necesidad de las industrias para mantenerse a la vanguardia, han tenido que recurrir a nuevos medios para realizar sus procesos más eficientes. Una de las formas que usan para mantenerse en la competencia, es usando controladores en sus sistemas. Por lo tanto, urge tener un personal capacitado y con experiencia, en el diseño y mantenimiento de estos sistemas.

1.2.1 Justificación.

Para ayudar en la capacitación de los nuevos ingenieros, se diseña un prototipo con propósitos didácticos, para que el estudiante tenga un acercamiento a los controladores industriales y así afiance con la práctica, los conocimientos

adquiridos en la asignatura de sistemas de control. Además, permite al alumno, contrastar el comportamiento experimental de la transferencia de calor en la barra, con una solución numérica de éste. De esta manera, este proyecto sirve como material de apoyo para actividades de laboratorio.

2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presenta una breve descripción de los conceptos referentes a la transferencia del calor, específicamente en los temas de conducción, convección y radiación térmica. Adicionalmente, se explica la primera ley de la termodinámica y la ecuación general, que modela este proceso térmico. También, se exponen contenidos sobre el control de potencia por medio del control de fase y la solución de ecuaciones diferenciales parciales por métodos numéricos.

2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor entre dos cuerpos se produce cuando hay una diferencia de temperatura entre ellos y puede presentarse por tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación. Para el caso más general se deben considerar trabajando en conjunto [1]. Dichos modos se dinamizan desde un sistema con una mayor concentración de partículas energéticas hacia uno de menor densidad [2].

La rata de transferencia de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura, que en otras palabras, es el cambio de temperatura por unidad de longitud en esa trayectoria [3]. Así como en los análisis de circuitos eléctricos, se tienen los regímenes estable y transitorio, en los procesos de transferencia de calor también existen estos estados. A continuación se explican los mecanismos de conducción, convección y radiación térmica.

2.1.1 Conducción térmica. Es debida a la interacción entre las partículas que se encuentran en contacto directo y es modelado por (1), siendo k la constante de conductividad térmica del material y $\nabla^2 T$ es el gradiente de segundo orden de la temperatura.

$$\dot{Q} = k \nabla^2 T \quad (1)$$

2.1.2 Convección. Es el modo de transferencia de calor de una superficie a un fluido adyacente que se encuentre en movimiento o en reposo, y se modela por (2).

$$\dot{Q}_{conv} = h A_S (T_S - T_\infty) \quad (2)$$

donde h es el coeficiente de película, A_S es el área superficial a través del cual se da la transferencia de calor por convección, T_S es la temperatura del cuerpo en su superficie y T_∞ es la temperatura del fluido lejos del objeto en estudio.

2.1.3 Radiación. Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas en moléculas o átomos. A diferencia de los otros mecanismos de transferencia de calor, esta forma no necesita de un medio para propagarse y se modela por (3), siendo ε y σ las constantes de emisividad y Stefan-Boltzmann respectivamente.

$$\dot{Q}_{RAD} = \varepsilon \sigma A_S (T_S^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

2.1.4 Primera ley de la termodinámica. Corresponde a la conservación de la energía y define que el cambio total de ésta en un sistema, es debido a la diferencia de las tasas de entrada, salida y generada dentro del elemento. La ecuación general se observa en (4).

$$\dot{E}_{ENTRADA} - \dot{E}_{SALIDA} + \dot{E}_{GENERADA} = \dot{E}_{SISTEMA} \quad (4)$$

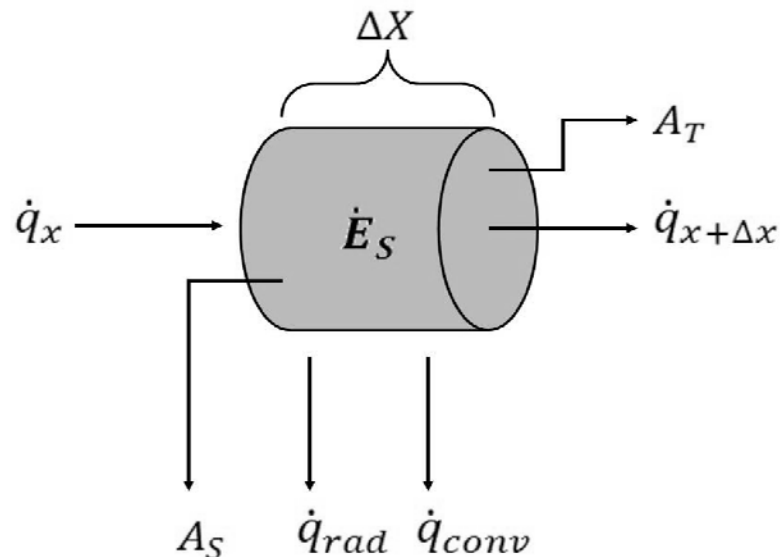
El cambio de energía térmica almacenada en el elemento con respecto al tiempo, es modelado por (5), siendo V el volumen, C_p el calor específico a presión constante y ρ la densidad del elemento.

$$\dot{E}_{SISTEMA} = \rho C_p V \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

2.1.5 Ecuación de transferencia de calor. Para realizar un análisis en cualquier proceso, hay que establecer el modelo matemático que determine el comportamiento de éste y por medio de las ecuaciones diferenciales, se pueden plantear las formulas que determinen la dinámica del sistema.

Para desarrollar el modelo matemático de la transferencia de calor, se define un volumen de control y las energías entrante, saliente, generada y almacenada. Este análisis, se realiza en un elemento con forma cilíndrica, ya que facilita la definición de las áreas transversal y superficial. Además, el flujo de calor se define en una sola dimensión, porque el prototipo se diseña para que el calor se propague de esta manera y permite que la ecuación de modelado sea más sencilla. Por otra parte, en la Figura 1 se observa que los flujos de conducción de entrada y salida, convección y radiación térmica están representados por \dot{q}_x , $\dot{q}_{x+\Delta x}$, \dot{q}_{conv} y \dot{q}_{rad} respectivamente. Asimismo, las áreas transversal y superficial, y el diferencial de longitud se muestran como A_T , A_S y ΔX [4].

FIGURA 1. VOLUMEN DE CONTROL Y LOS AGENTES QUE INTERACTÚAN EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN ELEMENTO DIFERENCIAL.



FUENTE: EL AUTOR.

Luego de reemplazar (1), (2), (3) y (5) en (4), se desarrolla la ecuación general de la transferencia de calor en una sola dimensión (6).

$$k A_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - h P (T_S - T_\infty) - \varepsilon \sigma P (T_S^4 - T_\infty^4) = \rho A_T C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

siendo $A_s = P \Delta x$, $V = A_T \Delta x$, y P el perímetro del cilindro. De (6) se puede decir que tiene la forma de una ecuación diferencial parcial parabólica [3].

2.2 CONTROL DE POTENCIA POR CONTROL DE FASE

Una manera de controlar la potencia en una carga, es por medio del control del voltaje RMS efectivo y esto se realiza retrasando el ángulo de disparo de la señal [5]. Entonces, para un elemento resistivo que tiene una entrada de la siguiente forma $v_s = \sqrt{2} \times V_s \times \sin \omega t$ y se controla el ángulo de disparo de la onda en los semi-ciclos positivo y negativo en α y $\pi + \alpha$ respectivamente, se tendrá una tensión RMS efectiva según (7) [5]. Luego de resolver la integral, que se encuentra en dentro del radical en (7), se obtiene (8). Y se define en (9) la potencia que consume la carga resistiva.

$$V_{in} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 2 V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} \quad (7)$$

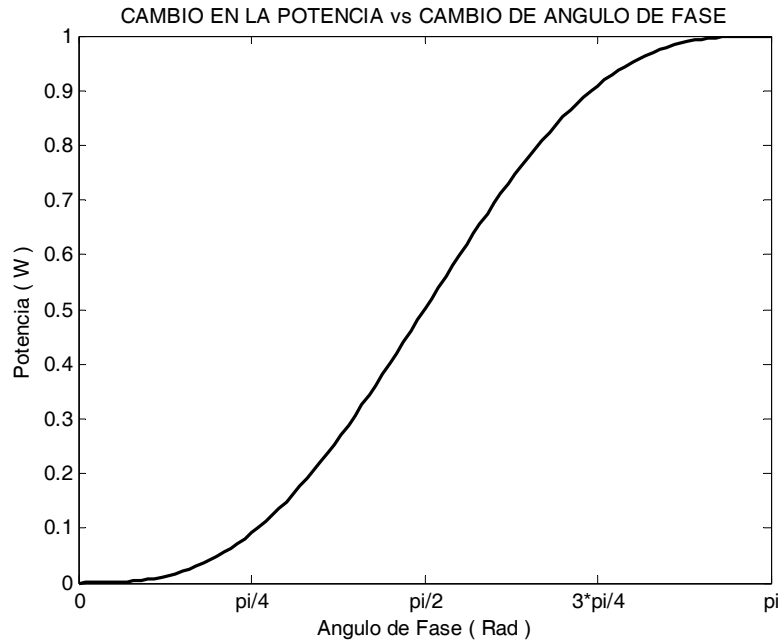
$$V_{in} = V_s \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} \quad (8)$$

$$P = \frac{V_{in}^2}{R} \quad (9)$$

A manera de ejemplo, se realiza un análisis numérico, para observar el efecto que tiene variar el ángulo de fase de la onda de tensión, en la potencia consumida en la resistencia. Entonces, se define $V_s = 1 [V]$ y $R = 1 [\Omega]$, y la variación de $\alpha = [0: \pi]$; por tanto, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 2 y ahí, se observa un

comportamiento cuasi-lineal, en el rango del ángulo de disparo $[\pi/4 : 3\pi/4]$ y en este intervalo la potencia oscila entre 10 y 90 %.

FIGURA 2. RELACIÓN POTENCIA EN LA RESISTENCIA CAMBIANDO EL ÁNGULO DE DISPARO DE LA ONDA SINUSOIDAL.



FUENTE: EL AUTOR.

2.3 MÉTODOS NUMÉRICOS EN LA SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES PARCIALES - PDE -.

Existen ecuaciones matemáticas difíciles o imposibles de resolver por medios analíticos, ya que algunas soluciones están restringidas a ciertas geometrías o condiciones de frontera, pero con un método numérico es posible estimar su respuesta. Entre las maneras de dar respuestas numéricamente a las derivadas, se encuentran las diferencias finitas y con ellas se pueden trabajar ecuaciones no lineales, tales como la de la transferencia de calor que incluye radiación [6].

Este método, aproxima las derivadas en términos de diferencias y éstas sustracciones, pueden ser hacia adelante, atrás o punto medio –centrada-, con respecto del sitio de análisis. Al resolver la primera derivada con diferencia

centrada, se obtiene un error de truncamiento de la serie de Taylor del orden de $O(h^2)$; por el contrario al solucionar con los métodos de adelante y atrás, la inexactitud es de $O(h)$, siendo h el tamaño del paso en la solución numérica [7].

El método de Crank-Nicolson, se basa en diferencias finitas y es muy útil para solucionar PDE parabólicas, tales como las encontradas en los sistemas de transferencia de calor [7]. La aproximación de este método, se define en el punto medio de un paso de tiempo y ésta consideración da como resultado una exactitud de segundo orden para el espacio y el tiempo. La ecuación, por medio del cual se desarrolla el proceso iterativo para la transferencia de calor es (10), donde j es el número de la iteración actual [7].

$$T_m^{(j+1)} = T_m^{(j)} + \frac{1}{2} \left[\left. \frac{dT_m}{dt} \right|^{(j)} + \left. \frac{dT_m}{dt} \right|^{(j+1)} \right] \Delta t \quad (10)$$

3 PROTOTIPO

En éste capítulo, se realiza una descripción física del prototipo construido y también, se desarrolla el método numérico para la transferencia de calor en la barra de cobre. Asimismo, se diseña la tarjeta de adquisición, que permite realizar el sensado de la temperatura en el modelo físico y además, se programa una interfaz gráfica de usuario y un código para resolver numéricamente el proceso térmico desarrollado en éste proyecto. Para finalizar, se describe brevemente el controlador industrial E5CK de *omron*.

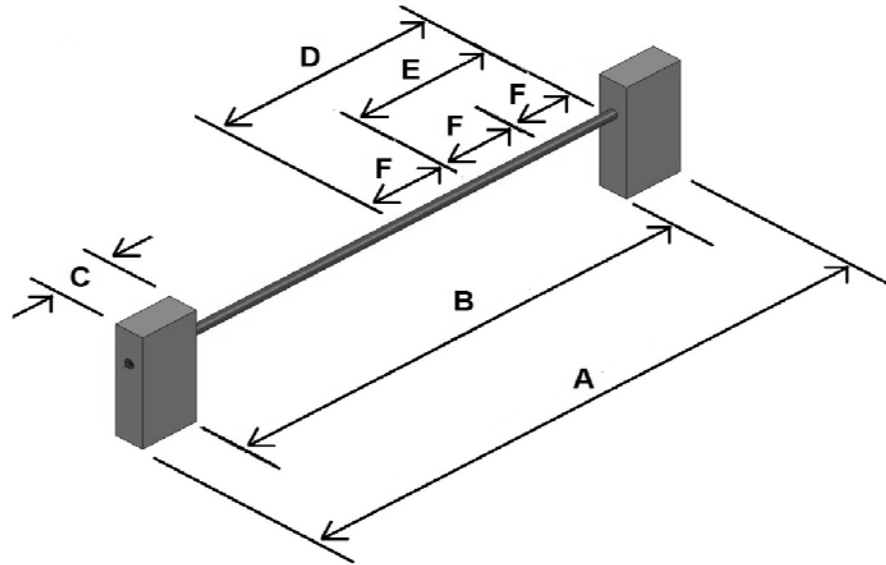
3.1 MODELO FÍSICO

El modelo experimental, es una barra de cobre que tiene las siguientes características físicas: diámetro de 0,016 m y longitud - L - de un 1 m. Ésta, se encuentra soportada en un par ladrillos refractarios, con el fin de minimizar la conducción térmica por medio de ellos. Igualmente, el calor se genera por dos resistencias de calentamiento, cada una instalada dentro de los extremos de la varilla. A continuación, en la Figura 3 se muestra el diseño en 3 dimensiones del prototipo acotado y en la Figura 4 se da una vista de corte lateral del modelo con cotas, donde se observa la resistencia de calentamiento en el interior de la barra y la varilla dentro del ladrillo refractario.

Debido a que la barra se encuentra dentro del ladrillo refractario, se disminuye el área de contacto con el aire. Por lo tanto, la longitud efectiva de la varilla se reduce y se debe redimensionar, al largo de ésta, menos dos veces la distancia lateral del ladrillo. Por otra parte, el prototipo tiene seis termocuplas de medición y entre cada una de ellas, existe un espacio de 0,11 m; éstas, son mostradas en la Figura 5 y la Figura 6. Más adelante, en este documento se explica que el perfil de temperatura, presenta una simetría con respecto al centro longitudinal - $x=L/2$ - y por tanto, se tendrá una medida igual en las parejas de termopares 1 - 6, 2 - 5, y 3 - 4, que corresponden a los puntos de medida 1, 2 y 3, respectivamente. En la

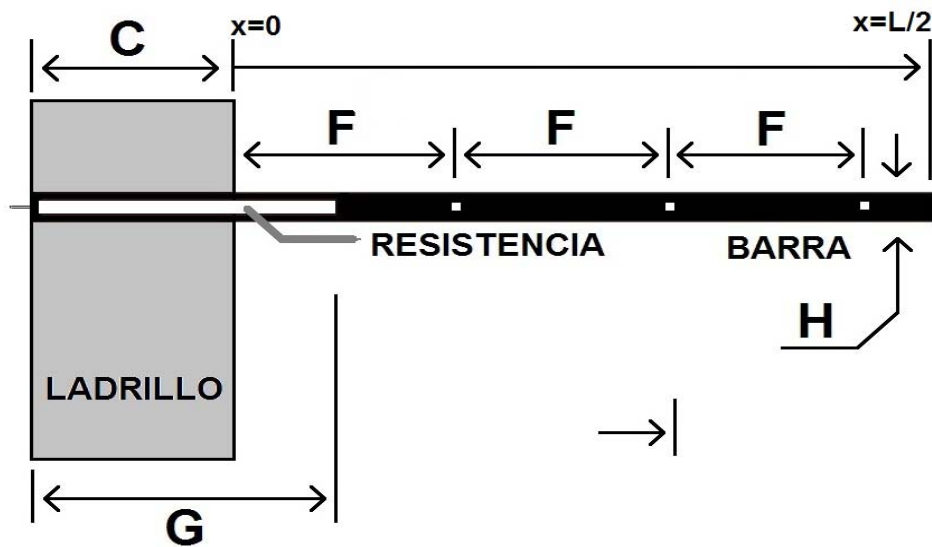
Tabla 1, se muestran las referencias de las cotas usadas en la Figura 3 y la Figura 4.

FIGURA 3. DISEÑO DEL PROTOTIPO EN 3 DIMENSIONES ACOTADO



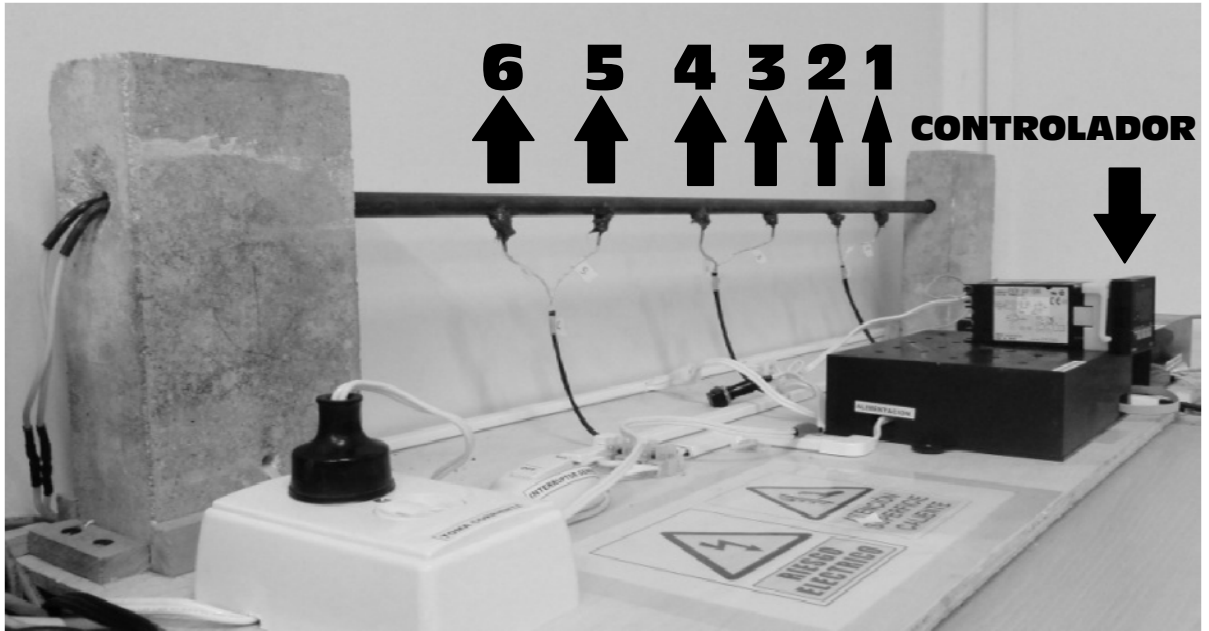
FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 4. VISTA DE CORTE LATERAL DEL PROTOTIPO ACOTADA Y SE DETALLAN LOS ELEMENTOS LADRILLO REFRACTARIO, RESISTENCIA DE CALENTAMIENTO Y LA BARRA DE COBRE.



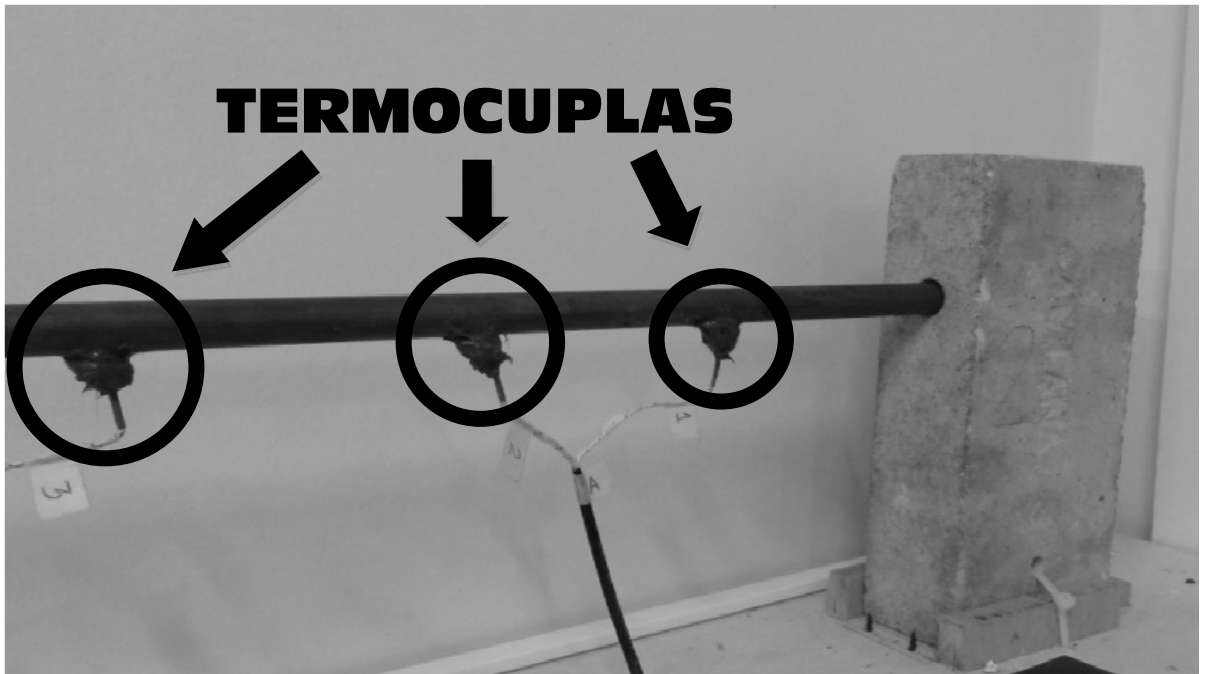
FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 5. FOTO DEL PROTOTIPO REAL, SE ENUMERAN LAS TERMOCUPLAS Y SE MUESTRA EL CONTROLADOR INDUSTRIAL.



FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 6. ACERCAMIENTO AL PROTOTIPO REAL. SE OBSERVAN LAS TEMOCUPLAS.



FUENTE: EL AUTOR.

TABLA 1. REFERENCIA DE LAS COTAS USADAS EN FIGURA 3 Y FIGURA 4

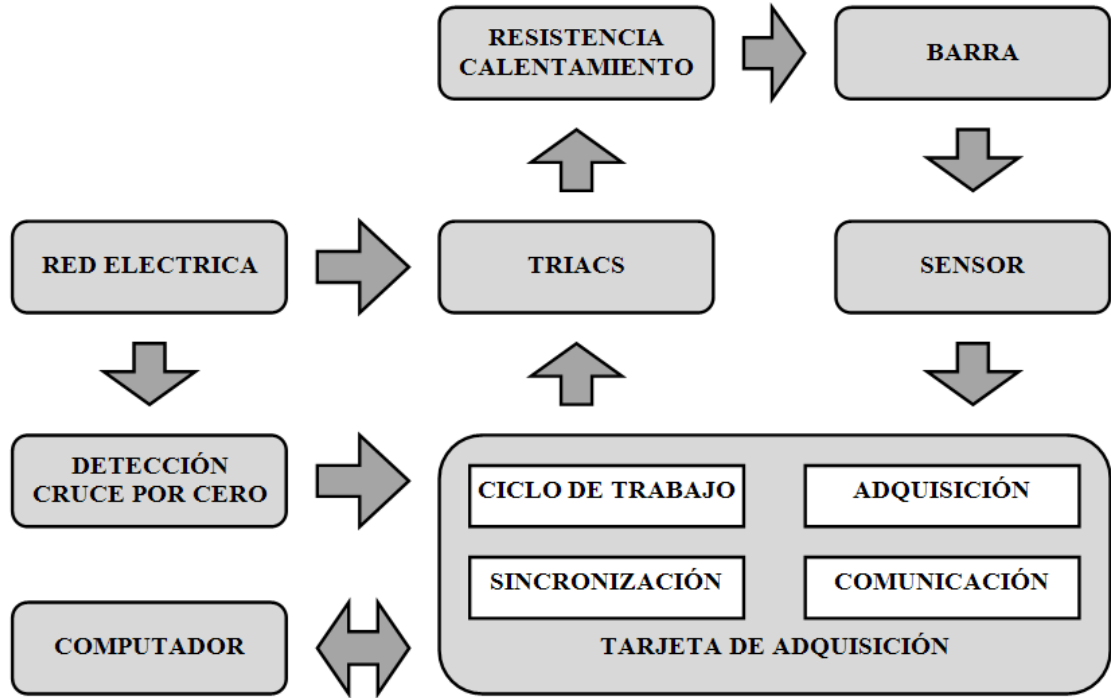
SÍMBOLO DE REFERENCIA	DESCRIPCIÓN DE LA REFERENCIA	VALOR DE LA REFERENCIA [M]
A	LONGITUD DE LA BARRA	1,000
B	LONGITUD EFECTIVA DE LA BARRA	0,800
C	LARGO DEL LADRILLO REFRACTARIO	0,100
D	UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDIDA 3, TERMOCUPLAS 3 Y 4	0,330
E	UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDIDA 2, TERMOCUPLAS 2 Y 5	0,220
F	DISTANCIA ENTRE TERMOCUPLAS Y UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDIDA 1, TERMOCUPLAS 1 Y 2	0,110
G	LONGITUD DE LA RESISTENCIA	0,150
H	DIÁMETRO DE LA BARRA	0,016

FUENTE: EL AUTOR.

En Figura 7, se muestra el diagrama de bloques general del prototipo y se observa, el lazo de realimentación para el control de temperatura, compuesto por los bloques *TRIACs*, *resistencia de calentamiento*, *barra*, *sensor* y *tarjeta de adquisición*. El elemento *TRIACs*, sirve como interruptor de tensión entre las resistencias de calentamiento y la red eléctrica. Asimismo, la unidad *detector cruce por cero*, se encarga de detectar el cambio de signo de la onda de voltaje, con el fin de sincronizar, el disparo del mando de interconexión *TRIACs*, con la frecuencia de la red eléctrica, para efectuar el control de fase. Además, el computador interactúa con la tarjeta de adquisición, para conocer la magnitud de la medida de calor en la barra y asignar, la potencia de los dispositivos de

calefacción.

FIGURA 7. DIAGRAMA DE BLOQUE GENERAL DEL PROTOTIPO.



FUENTE: EL AUTOR.

3.2 CONDICIONES INICIALES

La barra tiene un perfil de temperatura simétrico con respecto al eje vertical que cruza por el centro de la varilla ($L/2$), porque se entrega una potencia igual en las resistencias de calentamiento en sus extremos. Por lo tanto, en el punto medio no existe flujo de calor en cualquier instante de tiempo.

Por la simetría mencionada, se realiza un análisis de transferencia de calor a media barra, ya que para la otra mitad el perfil es igual. Las condiciones de frontera se definen por: primero, la varilla se encuentra inicialmente a una temperatura T_i (11); segundo, para todo instante de tiempo el flujo calor en el punto donde empieza la longitud efectiva - $x=0$ - ... véase Figura 4 ..., es igual a

la potencia eléctrica de la resistencia de calentamiento - $V I$ - (12) y tercero, en el centro longitudinal - $x=L/2$ - no hay conducción térmica, en dirección perpendicular del plano paralelo al área transversal (13) [3].

$$T(x, 0) = T_I \quad (11)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = V I \quad (12)$$

$$\frac{\partial T(L/2, t)}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

3.3 SOLUCIÓN NUMÉRICA

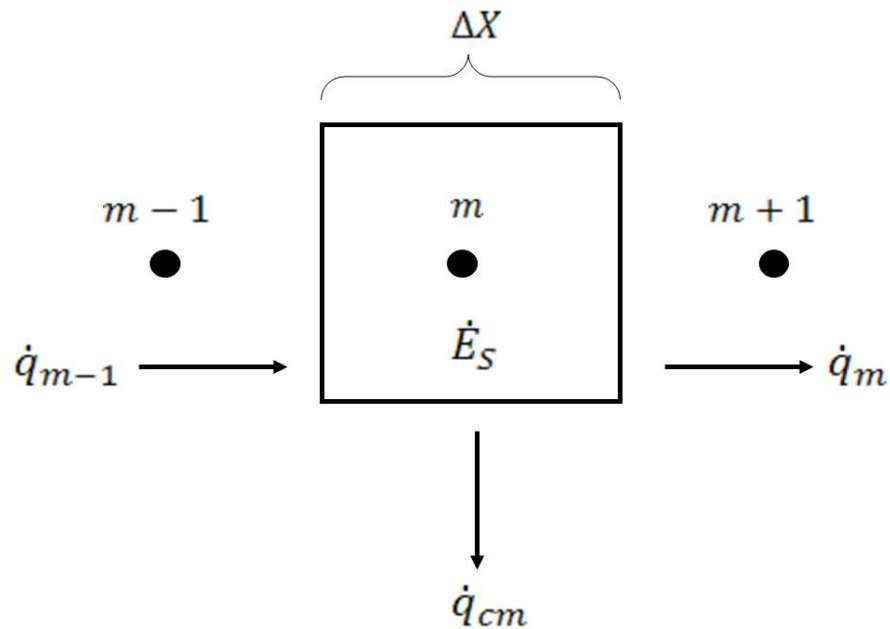
3.3.1 Método de Diferencias Finitas. Para el desarrollo de este método, se divide el objeto a analizar en volúmenes finitos con tamaños iguales, llamados *nodos*. La transferencia de calor de este prototipo, es efectuada en una sola dimensión, con dirección perpendicular respecto del plano paralelo al área transversal de la barra e igualmente hay flujo por convección con respecto al aire que rodea la varilla. A continuación, se realiza un análisis para los puntos longitudinales $x=0$, $x=L/2$ y $x=m$, que corresponden al nodo inicial, final y el punto m atañan a los demás elementos encontrados entre estos dos.

Existen dos maneras de desarrollar este método, la primera es por formulación matemática que reemplaza las ecuaciones diferenciales presentes por las de diferencias correspondientes y la segunda, es por medio de una formulación física que usa las igualdades del balance de energía y flujos de calor por conducción y convección térmica, en elementos de volúmenes diferenciales [6].

El desarrollo de la forma matemática es trivial y no explica de una manera explícita la interacción de los agentes que intervienen en cada nodo. Por lo tanto, se realiza el análisis por medio de la formulación física, para entender como interactúa la conducción térmica, convección y entalpia en cada elemento diferencial.

3.3.1.1 Nodo m . En la Figura 8, se observa la transferencia de calor por conducción térmica desde el nodo $m - 1$ a m y de m hacia $m + 1$, siendo representadas en la gráfica por \dot{q}_{m-1} y \dot{q}_m respectivamente; el flujo de convección al aire está definido por \dot{q}_{cm} , la entalpia se simboliza con \dot{E}_S y la longitud de este elemento diferencial se especifica como ΔX .

FIGURA 8. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL NODO m Y DE LOS AGENTES QUE INTERACTÚAN EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR.



FUENTE: EL AUTOR.

De (1) a (5), se obtiene la ecuación en diferencias de este nodo y se muestra en (14). Esta ecuación es válida en el intervalo de nodos $[1: m_{L/2-1}]$.

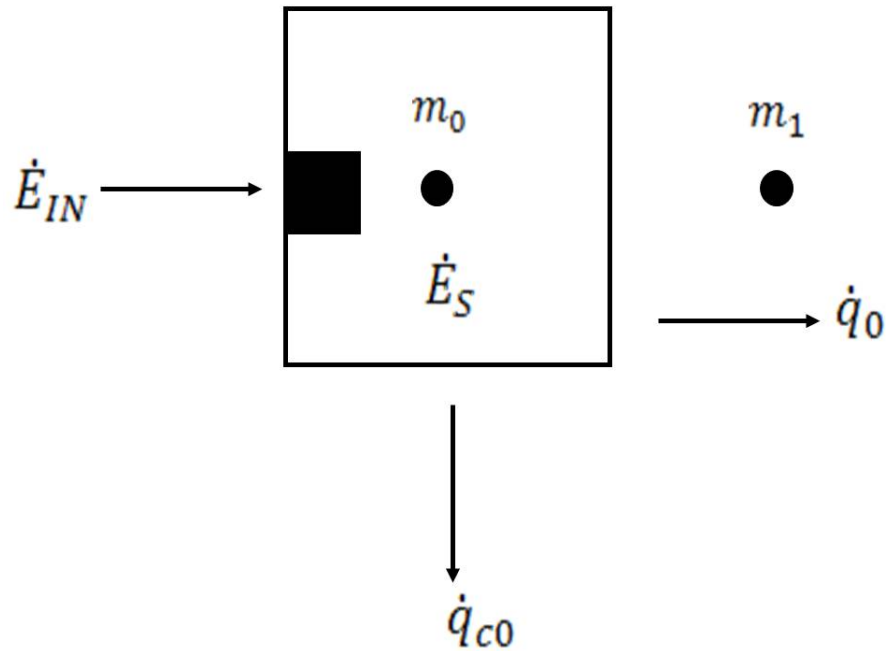
$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{k}{(\Delta X)^2 \rho C_p} (T_{m-1} - 2 T_m + T_{m+1}) - \frac{h P}{A_T \rho C_p} (T_m - T_\infty) \quad (14)$$

3.3.1.2 Nodo 0. En la Figura 9, se muestran los agentes que interactúan en este elemento y se observa, que se incluye un flujo de generación de calor \dot{E}_{IN} y los correspondientes a la conducción térmica hacia el nodo 1, convección al aire y

entalpia. Luego de utilizar las mismas ecuaciones para realizar análisis del nodo m, se obtiene la ecuación en diferencias (15) y esta difiere de (14), porque incluye el elemento matemático referente a la potencia de las resistencias de calentamiento.

$$\frac{dT_0}{dt} = \frac{V I}{\rho C_p A_T \Delta X} - \frac{k}{(\Delta X)^2 \rho C_p} (T_0 - T_1) - \frac{h P}{A_T \rho C_p} (T_0 - T_\infty) \quad (15)$$

FIGURA 9. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL NODO 0 Y DE LOS AGENTES QUE INTERACTÚAN EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR.

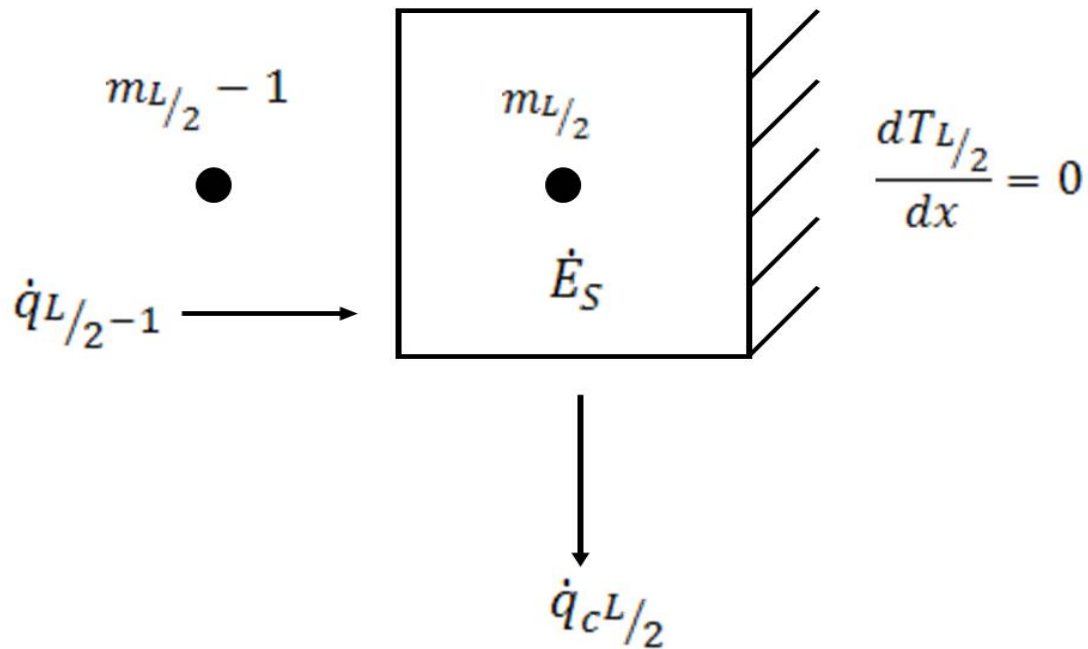


FUENTE: EL AUTOR.

3.3.1.3 Nodo L/2. A diferencia de la Figura 8 y la Figura 9, en la Figura 10 no existen flujos de generación de calor y conducción térmica hacia otro elemento adyacente. La ecuación en diferencias desarrollada a partir de (1) a (5) para este nodo, está definida en (16).

$$\frac{dT_{L/2}}{dt} = \frac{k}{(\Delta X)^2 \rho C_p} (T_{L/2-1} - T_{L/2}) - \frac{h P}{A_T \rho C_p} (T_{L/2} - T_\infty) \quad (16)$$

FIGURA 10. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL NODO L/2 Y DE LOS AGENTES QUE INTERACTÚAN EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR.



FUENTE: EL AUTOR.

3.3.1.4 Desarrollo modelo Crank-Nicolson. Este modelo se desarrolla para N nodos, es decir, que se tiene un tamaño de paso de longitud $\Delta x = \frac{L/2}{N}$ y para simplificar el manejo de matrices, se definen las constantes (17), (18) y (19). Luego, de definir las ecuaciones en diferencias en cada elemento, de reemplazar en (10) y realizar un despeje algebraico, se tiene un arreglo matricial de la forma que se observa en (20). Las matrices A y B , y los vectores C , $T^{(j)}$ y $T^{(j+1)}$ del

método de Crank – Nicolson, se muestran en la Figura 11, la Figura 12 y la Figura 13 respectivamente. Además, el tamaño de ellas son los siguientes: A y B , es de $N \times N$ y los vectores C , $T^{(j)}$ y $T^{(j+1)}$, son de $1 \times N$.

$$CD = \frac{k}{(\Delta X)^2 \rho C_p} \Delta t \quad (17)$$

$$CH = \frac{h P}{A_T \rho C_p} \Delta t \quad (18)$$

$$GN = \frac{V I}{\rho C_p A_T \Delta X} \Delta t \quad (19)$$

$$A T^{(j+1)} = B T^{(j)} + C \quad (20)$$

FIGURA 11. MATRIZ A DEL MÉTODO CRANK - NICOLSON.

$$\begin{bmatrix} 1 + CD + \frac{CH}{2} & -CD & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{CD}{2} & 1 + CD + \frac{CH}{2} & -\frac{CD}{2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{CD}{2} & 1 + CD + \frac{CH}{2} & -\frac{CD}{2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{CD}{2} & 1 + CD + \frac{CH}{2} & -\frac{CD}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -CD & 1 + CD + \frac{CH}{2} \end{bmatrix}$$

FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 12. MATRIZ B DEL MÉTODO CRANK - NICOLSON.

$$\begin{bmatrix}
 1 - CD - \frac{CH}{2} & CD & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \frac{CD}{2} & 1 - CD - \frac{CH}{2} & \frac{CD}{2} & 0 & \dots & 0 \\
 0 & \frac{CD}{2} & 1 - CD - \frac{CH}{2} & \frac{CD}{2} & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{CD}{2} & 1 - CD - \frac{CH}{2} & \frac{CD}{2} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{CD}{2} & 1 - CD - \frac{CH}{2}
 \end{bmatrix}$$

FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 13. VECTORES C , $T^{(j)}$ Y $T^{(j+1)}$ DEL MÉTODO CRANK - NICOLSON.

$$C = \begin{bmatrix} 2 * GN + CH * T_{\infty} \\ CH * T_{\infty} \\ CH * T_{\infty} \\ \vdots \\ CH * T_{\infty} \\ CH * T_{\infty} \end{bmatrix} \quad T^{(j)} = \begin{bmatrix} T_0^{(j)} \\ T_1^{(j)} \\ T_2^{(j)} \\ \vdots \\ T_{N-1}^{(j)} \\ T_N^{(j)} \end{bmatrix} \quad T^{(j+1)} = \begin{bmatrix} T_0^{(j+1)} \\ T_1^{(j+1)} \\ T_2^{(j+1)} \\ \vdots \\ T_{N-1}^{(j+1)} \\ T_N^{(j+1)} \end{bmatrix}$$

FUENTE: EL AUTOR.

De las matrices A y B , se observa que los elementos de la diagonal principal tienen la forma que se muestra en (21), siendo $p = CD + CH/2$ y después de resolver se obtiene la razón (22).

$$(1 + p) T^{(j+1)} = (1 - p) T^{(j)} \quad (21)$$

$$\lambda = \frac{(1 - p)}{(1 + p)} \quad (22)$$

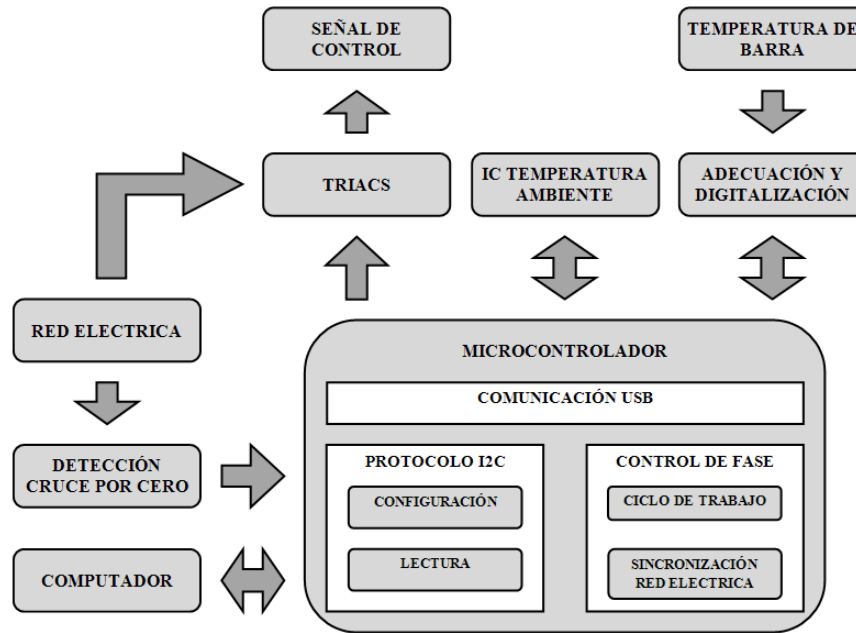
Para que el método de Crank – Nicolson se encuentre en la zona de decaimiento estable, es decir, que el nuevo valor de T en la siguiente iteración sea igual en

signo y más pequeño en magnitud, λ tiene que estar entre 0 y 1. Por otra parte, para obtener la solución de la ecuación diferencial parcial, se realiza un proceso iterativo, donde se resuelve primero el lado derecho, luego se aplica el método de eliminación Gauss-Jordan a la matriz A y finalmente, se obtiene la respuesta en ese instante de tiempo. Este proceso, se repite aumentando un paso de tiempo por vez, hasta que se llegue al final del intervalo.

3.4 SENSADO Y TARJETA DE ADQUISICIÓN

En la Figura 14, se muestra el diagrama que describe el funcionamiento de la tarjeta de adquisición. El bloque *temperatura de barra*, representa las termocuplas que miden la magnitud del nivel de calor en la barra. Siguiendo en la misma línea, continua *adecuación y digitalización*, que contiene las etapas electrónicas, para realizar la amplificación y el filtrado de la señal proveniente de los termopares e inmediatamente sigue un convertidor analógico-digital – ADC – que la digitaliza. Asimismo, el control de fase es sincronizado con la frecuencia y el cruce por cero de la onda de tensión de la red eléctrica, por medio del elemento *detección cruce por cero*. Además, se sensa la temperatura en los terminales de entrada de los dispositivos de medición en la tarjeta de adquisición, por medio de encapsulados electrónicos. Todo es operado por el microcontrolador, que también configura y lee los datos de los ADCs y los circuitos integrados colocados en los conectores. También, realiza la comunicación de envío y recepción de información con un computador –PC-, incluso detecta el cruce por cero y genera una onda PWM para el disparo de los TRIACs, que sirven como interruptor en el control de potencia de las resistencias de calentamiento.

FIGURA 14. DIAGRAMA DE BLOQUES TARJETA DE ADQUISICIÓN



FUENTE: EL AUTOR.

3.4.1 Termocuplas. Es un sensor de temperatura que consiste en la unión de dos metales disimilares y presenta efecto seebeck (propiedad termoeléctrica por la unión de dos metales disimilares, que genera una tensión proporcional a la temperatura) por el gradiente de temperatura que existe entre los extremos del termopar y genera una tensión por esta diferencia. Existen varios tipos de termopares y pueden ser tipo J, K, T y algunas otras; la diferencia principal entre ellas, son los metales usados para su construcción [8]. El punto donde se unen se llama *unión caliente* y el otro extremo se nombra *unión fría*. Si se mantiene la unión fría desconectada y existe una diferencia de temperatura entre estos dos puntos, se genera un voltaje proporcional a la desigualdad de la magnitud del nivel de calor de estas zonas [8].

Para este proyecto, se utiliza la termocupla tipo K, fabricada con aleaciones de Cr-Ni y Al-Ni, porque tiene una mejor linealidad en la curva de *tensión salida vs temperatura* en el rango de trabajo del prototipo y por otra parte, permite realizar

medidas con precisiones arriba de $\pm 0,1$ °C. Asimismo, es la de mayor disponibilidad en el mercado local con un bajo costo [8].

Cuando se conecta la unión fría a la tarjeta de adquisición, se unen los metales de la termocupla al cobre del *PCB* y se crea otro efecto *seebeck*, que produce una tensión eléctrica que se resta al voltaje generado en la unión caliente. Por tanto, es necesario realizar una compensación, para poder obtener una medida fiable. Para este proyecto se realiza una solución software.

A pesar de que la tensión generada por las termocuplas es proporcional a la temperatura, estas presentan una no-linealidad alta. Por esta razón, se debe realizar una linealización para obtener una medida más exacta y el estándar NIST ITS-90 [9] que fue adoptado por la International Electrotechnical Commission – IEC- propone corregir la curva *tensión de salida vs temperatura*, por medio de un polinomio de interpolación que tiene una relación directa entre la tensión en mV y la temperatura en °C [10]. Con esta forma se requiere menos calibración y se puede usar cualquier tipo de marca de termopares al momento de realizar un cambio. La expresión matemática usada para reajustar la temperatura en las termocuplas es de orden nueve y los coeficientes para el termopar de tipo K en un rango de 0 a 500 °C son mostrados en (23) y la Tabla 2 respectivamente [9].

$$T = a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 + a_4V^4 + a_5V^5 + a_6V^6 + a_7V^7 + a_8V^8 + a_9V^9 \quad (23)$$

TABLA 2. COEFICIENTES DE POLINOMIO DE ORDEN NUEVE PARA LA CORRECCIÓN DE TEMPERATURA EN LA TERMOCUPLA TIPO K EN EL RANGO DE 0 A 500 °C [9]

COEFICIENTES	VALOR
a_0	0,000000E+00
a_1	2,508355E+01
a_2	7,860106E-02
a_3	-2,503131E-01
a_4	8,315270E-02
a_5	-1,228034E-02
a_6	9,804036E-04
a_7	-4,413030E-05
a_8	1,057734E-06
a_9	-1,052755E-08

FUENTE: EL AUTOR.

Por la longitud y la característica metálica del material que componen a estos transductores, tienen tendencia de ser afectados por ruido. Sin embargo, una forma de eliminar este problema, es usar un amplificador de entrada diferencial, con una buena ganancia de rechazo en modo común CMRR en la etapa de adecuación de señal, acompañado de filtros pasa-bajas para eliminar las frecuencias no deseadas y dejar solo el nivel de DC.

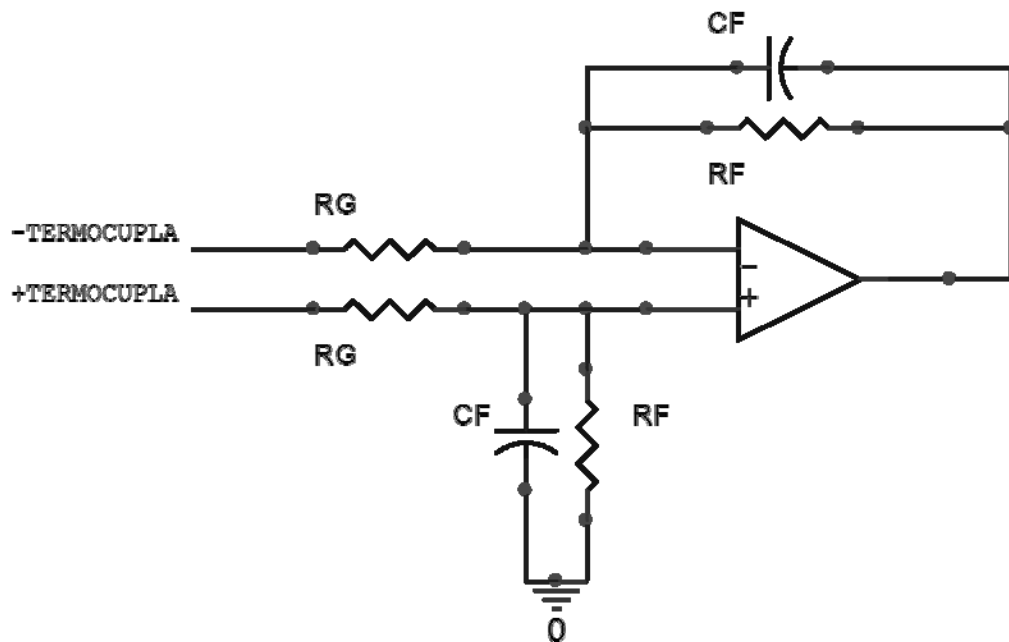
3.4.2 Filtros electrónicos. Existen dos clasificaciones para los filtros electrónicos y varían según los componentes utilizados para su construcción. Estos pueden ser de tipo pasivo o activo y dependen principalmente si solamente se construye con resistencias, capacitores e inductores o si se diseña con amplificadores operacionales o transistores respectivamente.

Los filtros pasivos son más fáciles de diseñar e implementar, pero son más sensibles a la tolerancia de los componentes, el manejo de la ganancia de

amplificación es prácticamente nula, tienen un consumo de potencia alto comparado con los circuitos de semiconductores, poseen una impedancia de salida muy alta, que no permite realizar un acoplamiento de una etapa en cascada y en el diseño de pasabajas, los valores de resistencias y capacitancias tienden a ser demasiado grandes. En cambio su contraparte activa, tiene un comportamiento muy superior en las desventajas comentadas, pero tiene una limitación en el ancho de banda [11].

Por las razones anteriores se elige un filtro activo y dado el problema que tiene la termocupla con el ruido, se selecciona una topología de entrada diferencial, porque puede rechazar con gran efectividad las señales de modo común –CMRR- presentes en las dos entradas del termopar. La topología elegida para este trabajo es mostrada en la Figura 15 [12].

FIGURA 15. TOPOLOGÍA DE AMPLIFICACIÓN DIFERENCIAL



FUENTE: EL AUTOR.

Después de realizar un análisis al circuito de la Figura 15, se obtiene la función de transferencia (24), la ganancia en DC (25) y la frecuencia de corte (26).

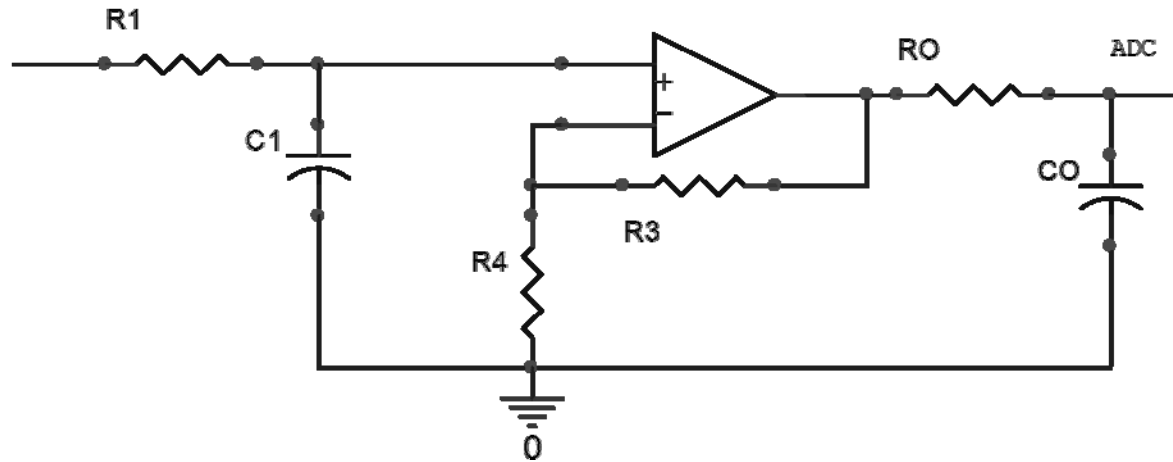
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_f / R_g}{s * C_f * R_f + 1} \quad (24)$$

$$A_v = \frac{R_f}{R_g} \quad (25)$$

$$f = \frac{1}{2\pi * C_f * R_f} \quad (26)$$

Si se elige una frecuencia de corte muy baja, se obtiene como resultado una resistencia R_f del orden de los $M\Omega$ y la tolerancia que normalmente se encuentra en el mercado es del 1%. Como ejemplo numérico, para un corte en 50 Hz se tiene un valor de resistencia de 3,18 $M\Omega$ y podría tener una variación de más o menos de 30 $k\Omega$. Debido a lo anterior y a que la señal generada en las termocuplas es DC, se propone realizar un filtrado en varias etapas con frecuencias de corte de 1 kHz, 50 Hz y 1Hz (Para frecuencias de ondas de radio, de la red eléctrica y aislar la componente DC) respectivamente . Para la siguiente etapa en cascada al amplificador diferencial, se elige una configuración de op-amp seguidora. Para finalizar el diseño, se selecciona a la salida un filtro pasivo con corte en 1Hz. El esquemático de las dos últimas topologías mencionadas, se muestra en la Figura 16.

FIGURA 16. TOPOLOGÍA DE AMPLIFICADOR SEGUIDOR.



FUENTE: EL AUTOR.

Para ajustar la ganancia DC de la etapa de adecuación, hay que tener en cuenta que la cota superior de tensión en la entrada del convertidor analógico-digital – ADC- es de 2,048 V, el coeficiente de *seebeck* para la termocoupla de tipo K es aproximadamente $40,46 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y se estima que la temperatura del prototipo puede llegar hasta 480°C . Entonces, la amplificación deberá tener un valor del orden de 105 V/V, para no sobrepasar el voltaje máximo permitido en el ADC. Debido a que el CMRR depende directamente de la ganancia diferencial, se elige para la primera etapa de la cascada del filtro, un valor de 80 V/V y en la segunda de 1,3 V/V, que da como resultado un total 104 V/V. Los valores de las resistencias y las capacitancias para filtrar las frecuencias deseadas, se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3. VALORES DE RESISTENCIA Y CAPACITANCIAS PARA LAS FRECUENCIAS DE CORTE EN LOS FILTROS

ELEMENTO	VALOR CALCULADO	VALOR COMERCIAL
R_g	2,000 (K Ω)	2,000 (K Ω)
R_f	159,154 (K Ω)	160,000 (K Ω)
C_f	1,000 (nF)	1,000 (nF)
R_1	3,183 (K Ω)	3,300 (K Ω)
R_3	3,000 (K Ω)	3,000 (K Ω)
R_4	10,000 (K Ω)	10,000 (K Ω)
C_1	1,000 (μ F)	1,000 (μ F)
R_o	15,920 (K Ω)	10,000 (K Ω)
C_o	10,000 (μ F)	10,000 (μ F)

FUENTE: EL AUTOR.

En la Tabla 3, se observa, que los valores de resistencia y capacitancia calculada, se llevan al valor comercial más cercano para la implementación. Al realizar esto las frecuencias de corte cambian y los nuevos valores se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4. FRECUENCIA DE CORTE EN LOS FILTROS CON LOS VALORES COMERCIALES

PUNTO DE MEDIDA	FRECUENCIA CON VALORES COMERCIALES (Hz)	FRECUENCIA DESEADA (Hz)
f_1	994,718	1000
f_2	48,228	50
f_o	1,592	1

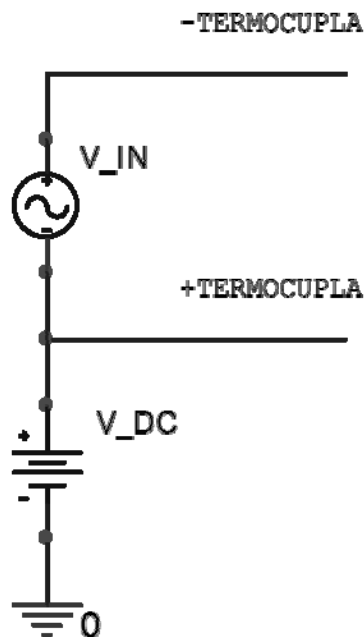
FUENTE: EL AUTOR.

El amplificador operacional op-amp, que se necesita para que esta topología realice una buena adecuación de la señal proveniente de las termocuplas, es aquel que tenga alto CMRR, rechazo en la fuente de alimentación –PSRR- y

ganancia en circuito abierto y simultáneamente, posea bajo *Offset* en la entrada para tensión y corriente, y un valor de *zero-drift* pequeño. El que mejor se adapta a estos requerimientos y se usa para la construcción de la etapa de acondicionamiento de la señal es *OPA735* de *texas instruments*. Con los valores calculados de resistencias y capacitancias, y el modelo *SPICE* del opamp *OPA735*, se realiza una simulación en el software *PSPICE* con barridos en DC y frecuencia AC. Las medidas se obtienen en las salidas de la primera etapa *V(5)*, en la segunda *V(9)* y en el filtro pasivo *V(11)* de la cascada de amplificación y filtrado.

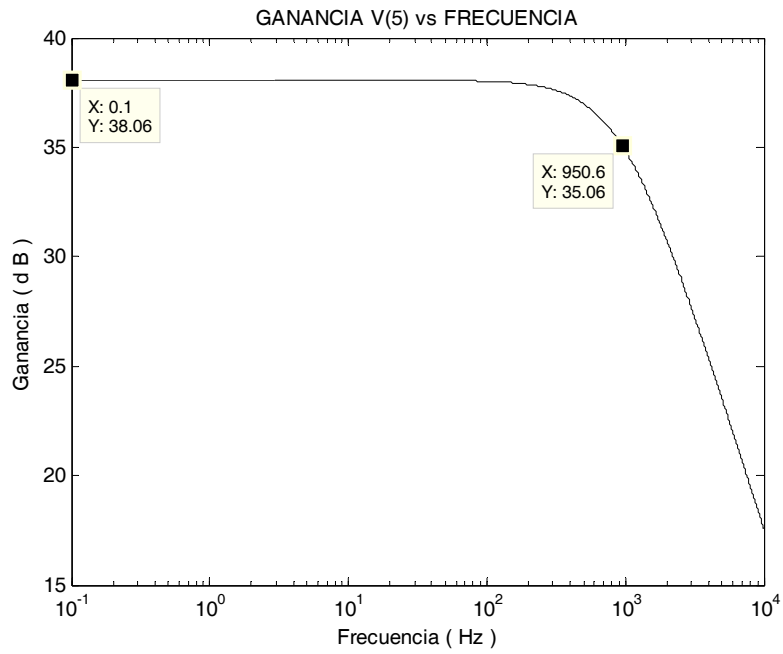
Para realizar el barrido en frecuencia AC con una fuente en la entrada en modo diferencial se utiliza el circuito que se muestra en Figura 17. Luego de realizar el análisis se obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 18, la Figura 19 y la Figura 20 con escala logarítmica en el eje x.

FIGURA 17. TOPOLOGÍA UTILIZADA PARA REALIZAR BARRIDO EN FRECUENCIA AC, PARA UNA ENTRADA DIFERENCIAL.



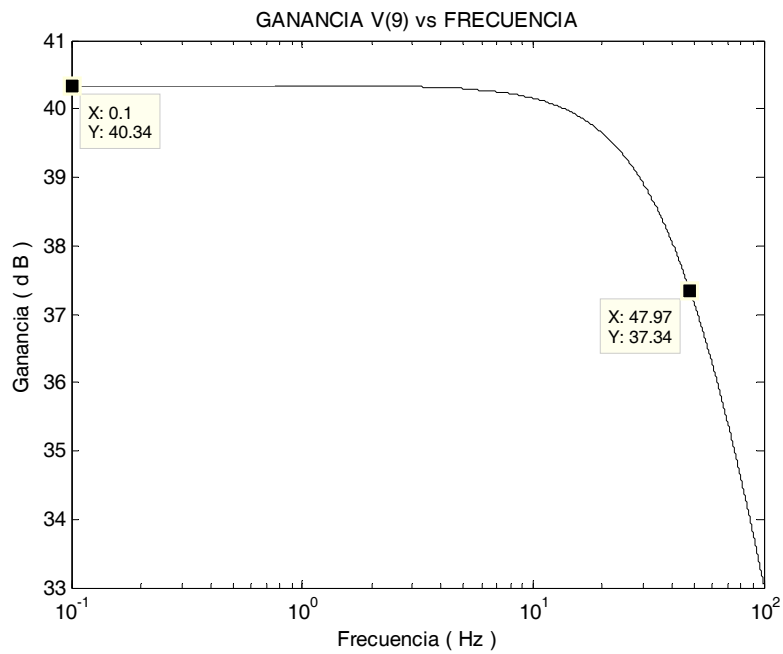
FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 18. TENSIÓN DE SALIDA DEL PRIMER FILTRO VS. FRECUENCIA.



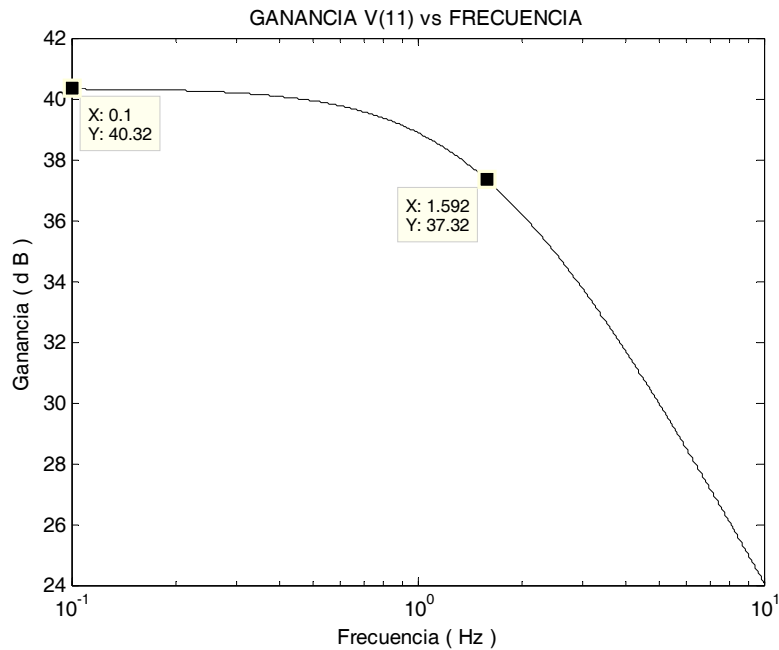
FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 19. TENSIÓN DE SALIDA DE LA SEGUNDA ETAPA DE FILTRADO VS. FRECUENCIA.



FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 20. TENSIÓN DE SALIDA DEL FILTRO PASIVO VS. FRECUENCIA.



FUENTE: EL AUTOR.

En la Figura 18, la Figura 19 y la Figura 20 se observa por medio de marcadores la frecuencia donde la curva de tensión disminuye 3 dB con respecto a la amplitud en 0,1 Hz y que se muestran en la Tabla 5. Comparando el ancho de banda de los puntos simulados con los deseados se puede notar que las frecuencias de 1 kHz y 50 Hz discrepan poco con un error de 4% aproximadamente, en cambio la de 1 Hz tiene una diferencia del 50% con relación a la deseada, sin embargo esta última semejanza es tolerable y aceptable porque el ADC que se elige es del tipo sigma-delta que entre sus características realiza un filtrado de baja frecuencia, el cual se explicará más adelante en este texto.

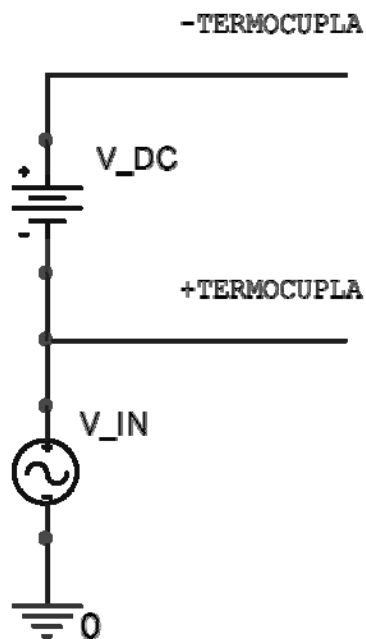
TABLA 5. FRECUENCIA DE CORTE EN LOS FILTROS HALLADOS EN PSPICE

PUNTO DE MEDIDA	FRECUENCIA DE DISEÑO (Hz)	FRECUENCIA DE CORTE (Hz)
V(5)	1000	950,600
V(9)	50	47,975
V(11)	1	1,592

FUENTE: EL AUTOR.

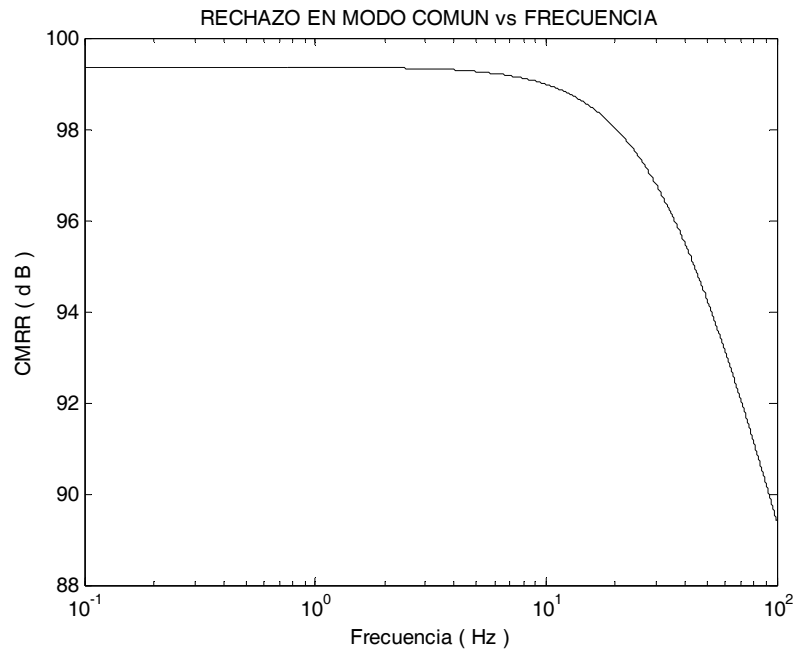
Al realizar un análisis en frecuencia variando la entrada diferencial por una entrada en modo común, utilizando el circuito mostrado en la Figura 21, se obtiene en la última etapa de filtrado la gráfica mostrada en la Figura 22 con escala logarítmica en el eje x. Se puede concluir que las señales armónicas de la red eléctrica van a ser atenuadas con un factor superior a 80 dB.

FIGURA 21. TOPOLOGÍA UTILIZADA PARA REALIZAR BARRIDO EN FRECUENCIA AC, PARA UNA ENTRADA EN MODO COMÚN.



FUENTE: EL AUTOR.

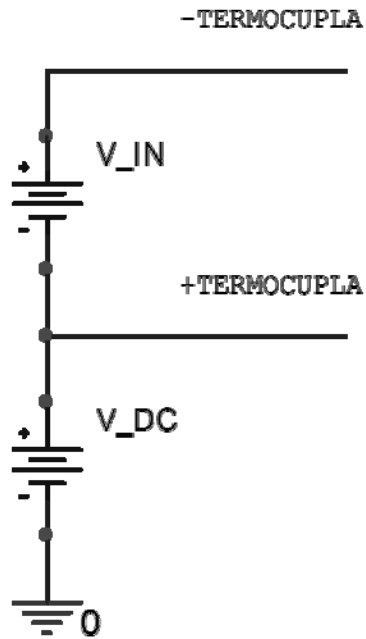
FIGURA 22. TENSIÓN DE SALIDA PRIMER FILTRO, CON FUENTE EN MODO COMÚN VS. FRECUENCIA.



FUENTE: EL AUTOR.

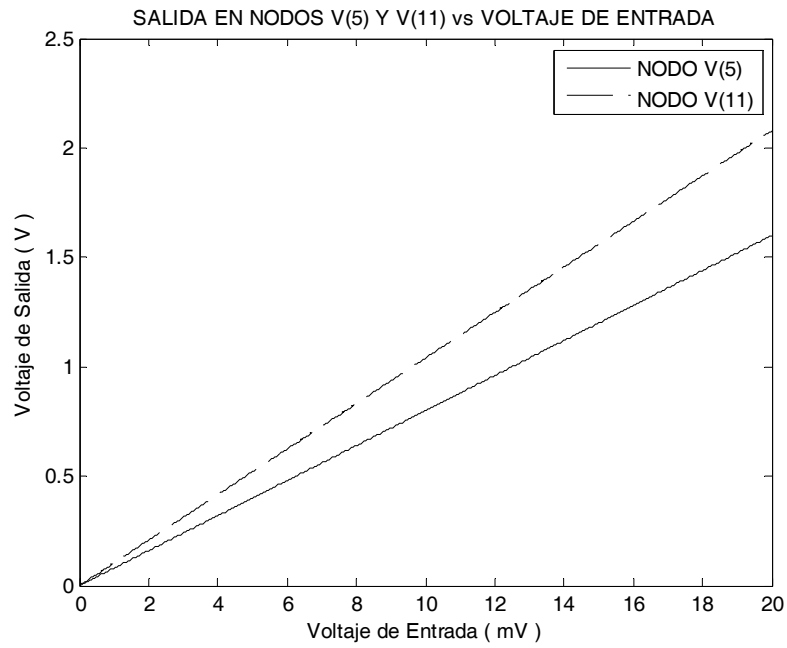
Ahora se realiza un barrido lineal en DC con una fuente de tensión continua conectada de manera diferencial tal como se muestra en la Figura 23. En un rango de 0 a 20 mV se obtiene la Figura 24 y se observa un comportamiento igual en las salidas de la primera y última etapa del filtro.

FIGURA 23. TOPOLOGÍA UTILIZADA PARA REALIZAR BARRIDO EN DC, PARA UNA ENTRADA DIFERENCIAL.



FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 24. TENSIÓN DE SALIDA PRIMER AMPLIFICADOR VS. TENSIÓN ENTRADA EN DC.



FUENTE: EL AUTOR.

Con los barridos en AC y DC se muestra, por medio de simulación, como se comporta la etapa de adecuación a la tensión generada y la inmunidad ruido capturado por la termocupla.

3.4.3 Convertidor analógico-digital y protocolo de comunicación I2C. En general los convertidores analógicos - digitales –ADC- están divididos en dos categorías: rata de Nyquist y sobremuestreadores. Los primeros operan al mínimo de frecuencia necesario para capturar toda la información de la señal de entrada y además entregan a la salida muchas muestras por segundo -sps- alcanzando muestreos del orden de 5 Msps. Este tipo de ADC son usados generalmente en aplicaciones donde se requiera una resolución moderada y manejo de señales con un ancho de banda alto.

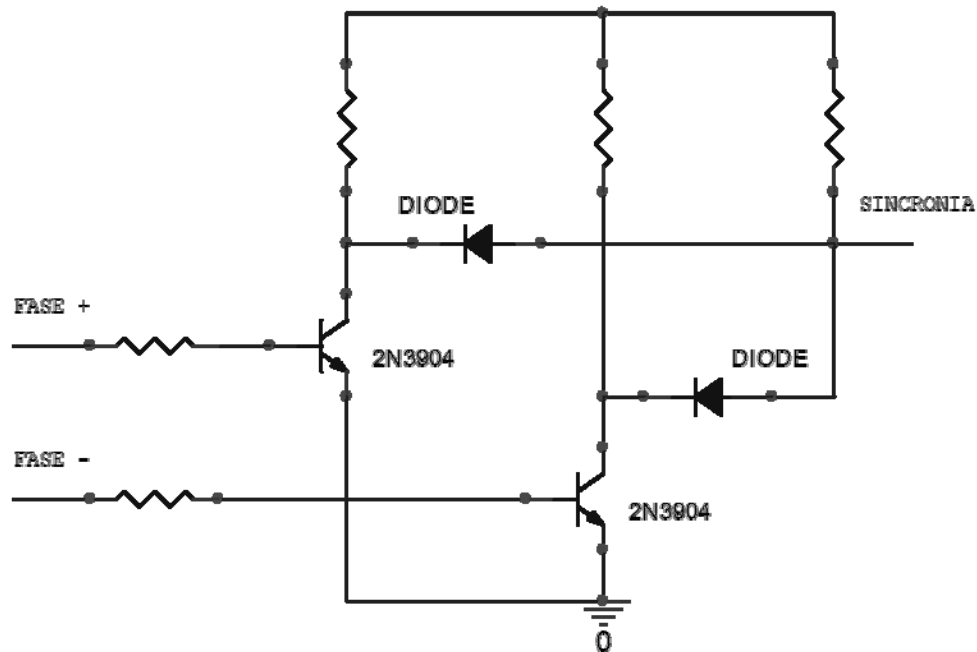
En cambio los ADC sobremuestreadores son todo lo contrario a los rata de Nyquist por que estos realizan un sobremuestreo a la señal de entrada alrededor de unas 16 veces más que su contraparte. Además tienen una alta resolución y precisión sin necesidad de calibración y por lo general son usados en aplicaciones que tienen señales con un ancho de banda bajo (menores a 20 kHz hasta 5 ksps) [13].

La mejor opción para este proyecto es usar un ADC (tipo sobremuestreador) sigma-delta porque la señal que proviene de la termocupla es DC, por lo tanto el ancho de banda es bajo. También se necesita precisión para garantizar una buena medida de la temperatura, asimismo el modulador de este tipo de convertidores realiza un sobremuestreo a la entrada, que luego integra y después filtra, garantiza una reducción de la potencia del ruido de cuantización [14]. En comparación con el método SAR no es necesario un filtro de *Anti-Aliasing*, *trimmer* de calibración, circuito *Sample-Hold* y referencia de voltaje [15]. Por último, ya que el proceso de la transferencia de calor de la barra posee tiempos de establecimiento grandes no es necesario tomar muchas muestras por segundo, por consiguiente alrededor de 10 sps es suficiente. Por todo lo mencionado anteriormente se selecciona el ADC

ADS1113 de *texas instruments* para discretizar la salida de la etapa de adecuación del termopar. El integrado seleccionado se comunica con los demás dispositivos por medio del protocolo I2C diseñado por *Philips*, el cual tiene 2 líneas, una de reloj y otra de datos, que ayuda a minimizar las conexiones del bus y por ende a construir PCBs más pequeñas. También es fuertemente inmune al ruido, tiene bajo consumo de potencia, trabaja en un rango amplio de temperatura y es sencillo diagnosticar fallas y realizar depuraciones [16].

3.4.4 Detección de cruce por cero y esquema de potencia. Para realizar el control de fase de la onda de tensión de las resistencias de calentamiento es necesario detectar el cruce por cero de la señal de voltaje para sincronizar el disparo en el ángulo deseado con la frecuencia de la red eléctrica y esto se efectúa por medio del circuito mostrado en la Figura 25.

FIGURA 25. TOPOLOGÍA DE DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO.

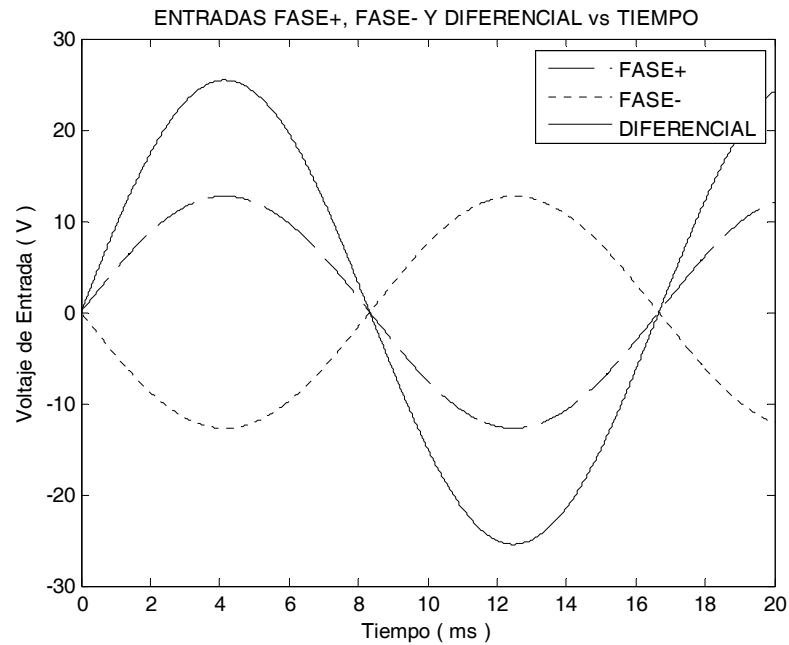


FUENTE: EL AUTOR.

En este circuito, los transistores BJT se activan cuando la señal de entrada esté en un semi-ciclo positivo y sea superior a 0,7 V. Los dos diodos realizan una

comparación tipo AND, por lo tanto cuando la salida en los BJT está en alto, habrá un pulso de sincronía. A continuación se muestra en la Figura 26 las entradas *FASE+* y *FASE-* desfasadas 180 grados a una frecuencia de 60 Hz y la diferencial de estas dos.

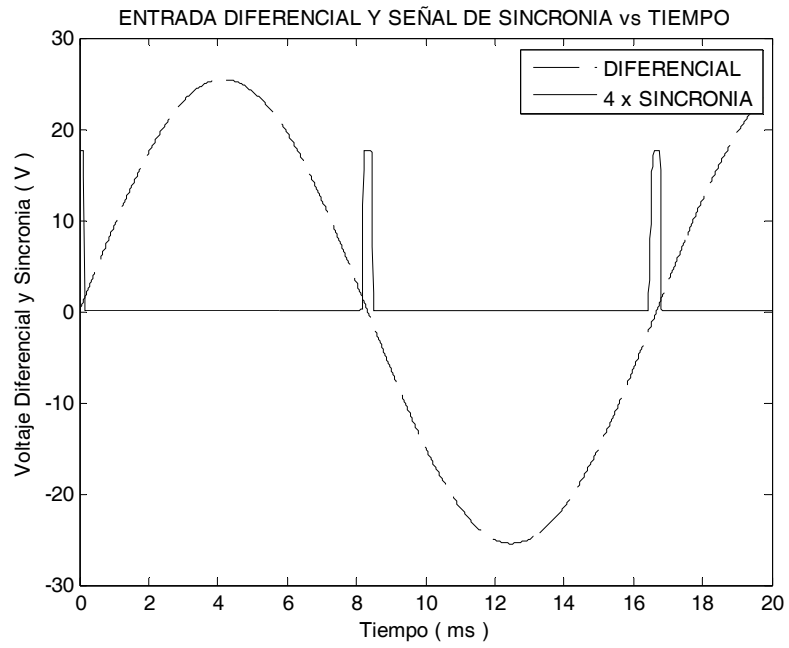
FIGURA 26. SEÑALES *FASE+*, *FASE-* Y LA DIFERENCIAL DE ESTAS DOS.



FUENTE: EL AUTOR.

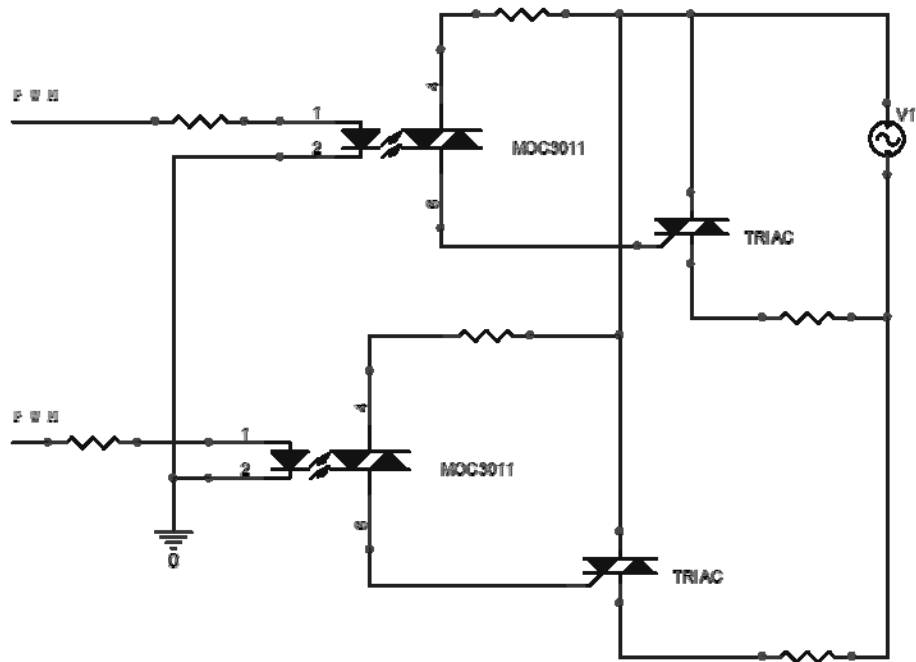
La Figura 27 muestra la señal diferencial y los pulsos en sincronía, y se observa que en el flanco de bajada de este pulso se detecta un cruce por cero. Para realizar el control de la potencia RMS en la resistencia, se utiliza el esquema mostrado en la Figura 28. La señal de control PWM pasa por un *OPTOTRIAC* que controla un *TRIAC* que a su vez maneja directamente la potencia de la resistencia de calentamiento.

FIGURA 27. SEÑAL DE SINCRONÍA EN CRUCE POR CERO.



FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 28. TOPOLOGÍA EN MANEJO DE POTENCIA.



FUENTE: EL AUTOR.

3.4.5 Tarjeta de potencia y aislamiento eléctrico. Dada la sensibilidad que tienen los circuitos de adecuación analógica a las interferencias creadas por el manejo de potencia eléctrica, algunos fabricantes recomiendan construir la alimentación en un circuito aparte. Por lo tanto se diseña y construye una tarjeta que contiene los *TRIACs* de potencia, el esquema para la detección de cruce por cero y un regulador de 5 V para el suministro eléctrico de la tarjeta de adquisición. Por otro lado existe la posibilidad de que pueda presentarse por la red eléctrica una señal de alto voltaje y debido a que el computador y la tarjeta de adquisición a estas tensiones son vulnerables, es necesario seleccionar unos elementos que los protejan para esta circunstancia.

Luego de la regulación de la tarjeta de potencia se elige un regulador aislado galvánicamente (*DCR010505* de *texas instruments*) que mantiene la tensión de alimentación de la tarjeta de adquisición con alta precisión y además, protege de sobretensiones y disminuye el ruido proveniente de la tarjeta de potencia. Para separar las fuentes de voltaje de la tarjeta de adquisición y del puerto USB del computador, se utiliza el aislador galvánico digital *ISO7420* de *texas instruments*, este circuito integrado admite una sola dirección en los canales de transferencia de datos y asimismo, puede transmitir a 1 mega bits por segundo -Mbps-.

3.4.6 Interfaz computador – tarjeta de adquisición. Para conectar la tarjeta de adquisición diseñada al computador se consideran dos posibilidades. La primera es usar la tarjeta de adquisición NI USB-6009 que tiene 12 puertos digitales de entrada y dos analógicos, pero la máxima frecuencia que puede alcanzar en la salida digital para generar una onda cuadrada es de 200 Hz y la mínima frecuencia permitida para el protocolo de comunicación I2C es de 10 kHz, por lo tanto no puede ser utilizada en este proyecto. Entonces se propone usar un microcontrolador con conexión USB y se elige el MC9S08JM60 de *freescale*. Éste puede trabajar a una frecuencia máxima de 48MHz en el bus interno y alcanzar en las salidas generales hasta 2 MHz. Además, tiene dos temporizadores con control

sobre 8 puertos en total, un contador de tiempo real, posee 60 kB de memoria flash y 4 kB de RAM.

La tarjeta de adquisición necesita tres canales de comunicación con protocolo I2C, porque se tienen 6 termocuplas y cada una requiere un ADC, así como un sensor de temperatura en el punto de unión fría para un total 12 elementos, sin embargo, los dispositivos seleccionados anteriormente admiten máximo cuatro esclavos en la misma conexión. Además, los aisladores galvánicos digitales transfieren información en una sola dirección, entonces se debe convertir la señal de datos de uno a dos canales que corresponden a uno de entrada y otro de salida respectivamente, es decir, que el protocolo ahora usa un bus de 3 líneas en vez de 2. El microcontrolador seleccionado sólo tiene un modulo I2C y se necesitan 3 para poder comunicarse con todos los ICs, por lo tanto se desarrolla un código I2C que pueda trabajar con la separación requerida y se programa para que configure, realice lecturas en los encapsulados electronicos y luego almacene los datos en un vector que el PC leerá cuando sea requerido. También detecta el flanco de bajada de la señal de sincronía y controla el ciclo de trabajo del PWM para el disparo sincronizado de los TRIACs que regulan la potencia RMS de la resistencia de calentamiento.

Uno de los puertos de los temporizadores se usa para la detección del flanco de bajada del pulso enviado por el circuito de detección de cruce por cero. Otro se utiliza para la salida del PWM que controla el disparo de los TRIACs de potencia, 12 puertos generales se usan para el protocolo de comunicación I2C y 4 más para los LEDs indicadores de estado. El contador de tiempo real se maneja para disparar la alarma cuando no hay respuesta en la transmisión de datos a los dispositivos integrados y por medio de la comunicación USB el computador accede a los datos almacenados en el vector de lectura y controla el ciclo de trabajo de la señal PWM deseada.

3.5 INTERFAZ GUI Y CÓDIGO DE SOLUCIÓN NUMÉRICA EN MATLAB.

Con el software Matlab se diseñó una interfaz gráfica de usuario –GUI- para visualizar la temperatura que sensa la termocupla en la barra, el punto de unión fría y la suma de ambas. Además, el número de la muestra actual y el tiempo transcurrido de la prueba son mostrados en la GUI. También se controla el ciclo de trabajo y existe la opción de almacenar los datos en una hoja de cálculo. En la Figura 29 se muestra la interfaz diseñada.

FIGURA 29. INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO.



FUENTE: EL AUTOR.

Además de la GUI se implementó un código basado en el método de Crank–Nicolson para solucionar numéricamente la PDE parabólica del calor. En él se pueden definir los diferenciales de tiempo y espacio, y las constantes requeridas para tener una solución numérica acorde a los parámetros ingresados. Al finalizar las iteraciones se muestra una gráfica del perfil de temperatura en media barra, ya que debido a la simetría con respecto al centro longitudinal de la varilla el perfil de la transferencia de calor es igual a la otra mitad.

3.6 CONTROLADOR INDUSTRIAL OMRON E5CK

Para controlar la temperatura en este proyecto se utiliza el controlador industrial E5CK de Omron. El uso de este dispositivo es para que los estudiantes de la asignatura sistemas de control conozcan y se familiaricen con los controladores de las fábricas. Con él se puede controlar por medio de la estrategia PID, permitiendo ingresar los valores de las constantes Proporcional –P- , de tiempo integral –Ki- y derivativa –Kd-, manualmente. También tiene una función que permite realizar una configuración automática –autotuning- para buscar los valores P, Ki y Kd más adecuados para el proceso. Asimismo, se elige entre varias entradas que pueden ser termocuplas, *RTDs*, analógicas de tensión o corrientes e incluso admite asignar funciones de control o alarmas individualmente para cada salida.

4 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas simuladas con el método numérico de Crank – Nicolson y las efectuadas con el prototipo diseñado y el controlador industrial E5CK. En el desarrollo de estos experimentos se varían algunas condiciones inherentes a la forma de realizarlos, es decir, se hallan soluciones numéricas cambiando los pasos de tiempo y espacios y las propiedades del material de la barra. Del mismo modo, se ensaya con el montaje real modificando el espacio de confinamiento, de manera que se determine la temperatura máxima de calentamiento en cada punto y las características experimentales del material metálico. Para finalizar, se evalúa el dispositivo de control cambiando el punto de consigna.

Como se explicó anteriormente, el largo de la varilla es de 1 m y se encuentra incrustada 0,10 m en cada ladrillo refractario, entonces la longitud efectiva para realizar el análisis es de 0,80 m. Además, por la simetría presentada en el perfil de temperatura, se realiza solamente análisis a un solo lado del eje vertical que cruza por el centro longitudinal de la barra.

4.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA, PRUEBAS MÉTODO CRANK - NICOLSON

A continuación se desarrollan pruebas de simulación cambiando los pasos de tiempo, número de nodos y propiedades del cobre. La primera prueba que se realiza con el algoritmo, es para determinar cómo se altera la solución numérica a la variación de la cantidad de nodos, mientras se mantienen constantes los valores de las propiedades del cobre y el diferencial de tiempo. En la Tabla 6 se muestran los datos utilizados en este experimento.

TABLA 6. VARIABLES USADAS PARA PRUEBA DE VARIACIÓN DE NODOS

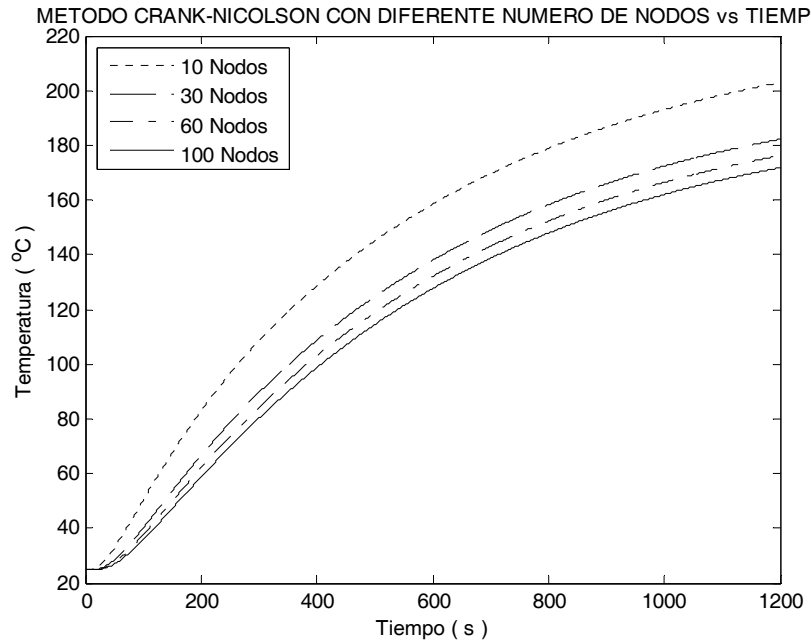
NOMBRE DE LA VARIABLE	SÍMBOLO DE LA VARIABLE	VALOR DE LA VARIABLE	UNIDADES DE LA VARIABLE
CONSTANTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	k	401,00	$\frac{W}{m K}$
COEFICIENTE DE CALOR ESPECIFICO	C_p	385,00	$\frac{J}{Kg K}$
COEFICIENTE DE CONVECTIVO DEL AIRE	h	25,00	$\frac{W}{m^2 K}$
DIFERENCIAL DE TIEMPO	Δt	0,25	s
RANGO DE VARIACIÓN DE LOS NODOS	N	[10,00 – 500,00]	'---

FUENTE: EL AUTOR.

En la Figura 30 se observa la solución numérica para 10, 30, 60 y 100 nodos, y en la Figura 31 se soluciona para 100, 250 y 500. De estas dos figuras se puede decir que a medida que se aumenta el número de nodos, la solución tiende a hacia ciertos puntos específicos. Por otra parte, es evidente que en todas las respuestas existe un comportamiento de un sistema de segundo orden con amortiguamiento crítico.

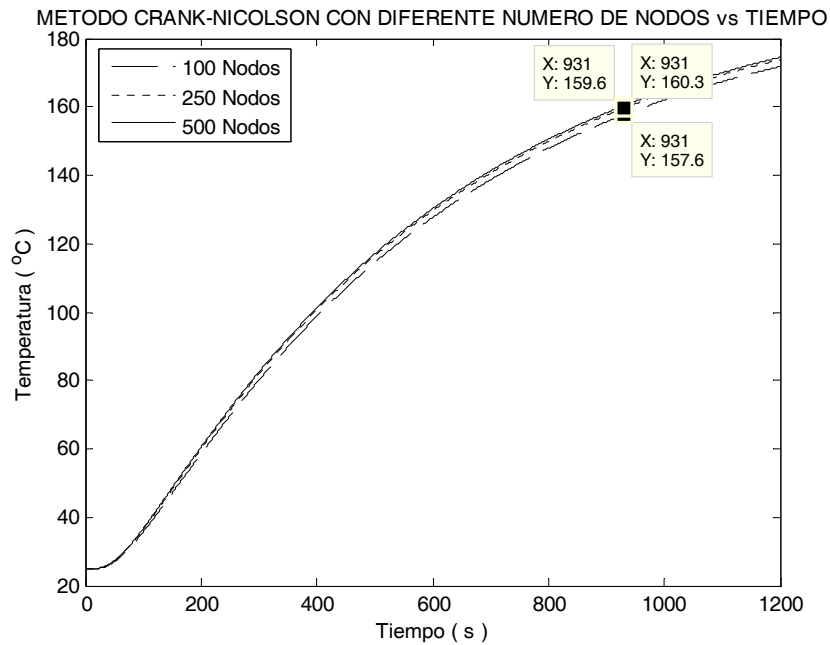
En la Figura 31 se observan unos marcadores que indican una solución a las pruebas de 100, 250 y 500 nodos en 931 segundos, con temperaturas de 157,6, 160,3 y 159,6 °C respectivamente. Por lo tanto, se puede concluir que las soluciones de 250 y 500 discrepan con error de 0,4 % aproximadamente. En cambio, entre 100 y 500 la diferencia se encuentra alrededor de 1,25 % que es tres veces mayor que la anterior, pero aun así sigue siendo pequeño. Sin embargo, el costo de elegir una mayor cantidad de nodos es un incremento en el tiempo de procesamiento.

FIGURA 30. MÉTODO DE CRANK - NICOLSON DESARROLLADO CON 10, 30, 60 Y 100 NODOS.



FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 31. MÉTODO DE CRANK - NICOLSON DESARROLLADO CON 100, 250, Y 500 NODOS.



FUENTE: EL AUTOR.

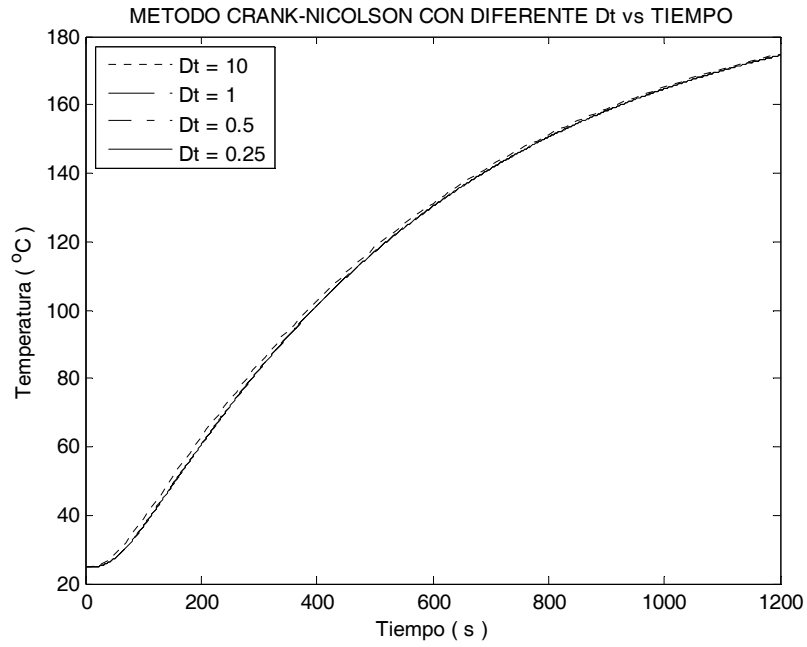
La segunda prueba es para observar el comportamiento de la solución cuando se cambia el diferencial de tiempo y se mantienen constantes los valores de las demás variables, estos datos se muestran en la Tabla 7. Como resultado se exponen en la Figura 32 las soluciones numéricas para los diferenciales de tiempo - Δt - de 10, 1, 0,5 y 0,25 segundos, y se observa que la respuesta de Δt igual a 10 se aleja poco de las otras. A continuación, en la Figura 33 se realiza una ampliación en el rango [168,2-169,2; 1069-1073,5] de la Figura 32 para observar que las gráficas tienen una diferencia del orden de las decimas.

TABLA 7. VARIABLES USADAS PARA PRUEBA DE VARIACIÓN DE DIFERENCIAL DE TIEMPO

NOMBRE DE LA VARIABLE	SÍMBOLO DE LA VARIABLE	VALOR DE LA VARIABLE	UNIDADES DE LA VARIABLE
CONSTANTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	k	401,00	$\frac{W}{m K}$
COEFICIENTE DE CALOR ESPECIFICO	C_p	385,00	$\frac{J}{Kg K}$
COEFICIENTE DE CONVECTIVO DEL AIRE	h	25,00	$\frac{W}{m^2 K}$
RANGO DE VARIACIÓN DEL DIFERENCIAL DE TIEMPO	Δt	[10,00 – 0,05]	s
NUMERO DE NODOS	N	250,00	

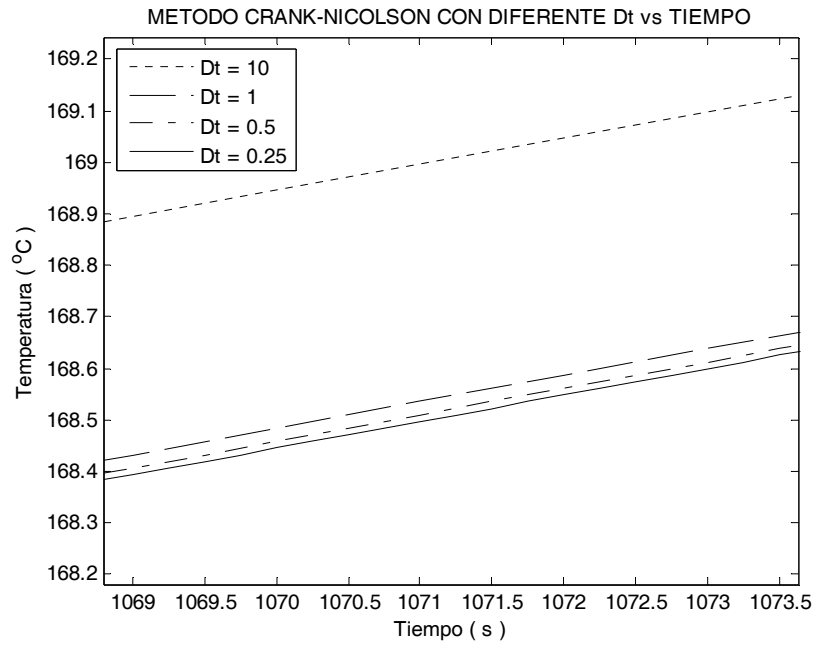
FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 32. MÉTODO DE CRANK - NICOLSON DESARROLLADO CON DIFERENTES DIFERENCIALES DE TIEMPO 10, 1, 0,5 Y 0,25.



FUENTE: EL AUTOR.

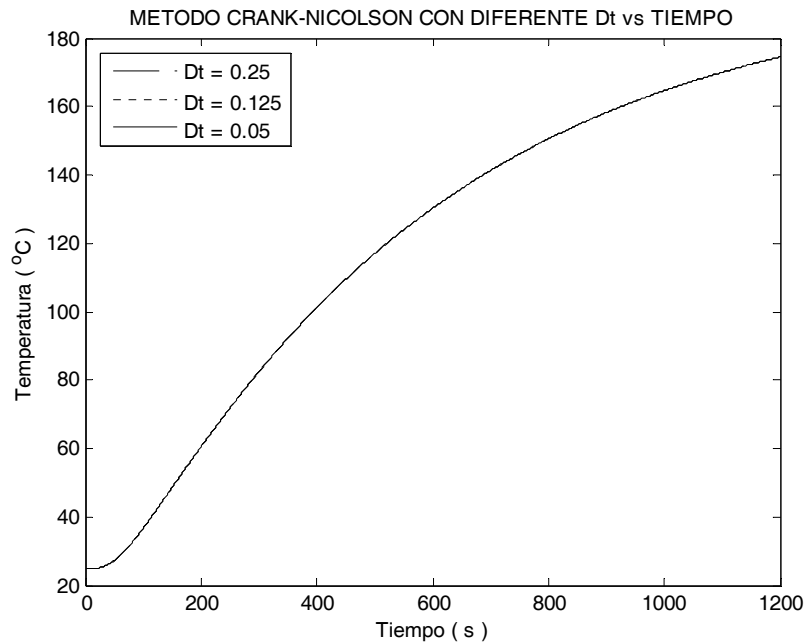
FIGURA 33. AMPLIACIÓN DE FIGURA 32.



FUENTE: EL AUTOR.

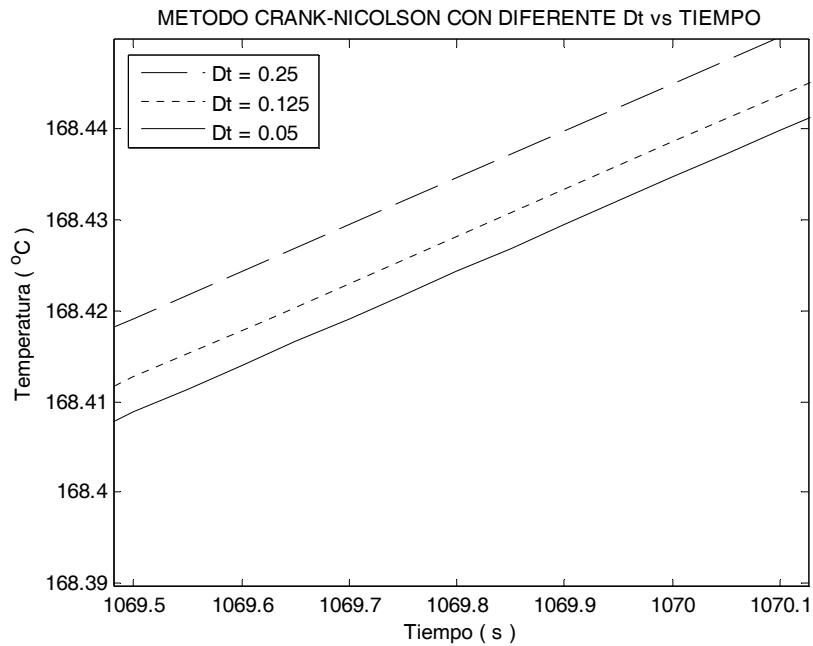
En la Figura 34 se muestran las soluciones para los diferenciales de tiempo 0,25, 0,125 y 0,05 segundos, y en la Figura 35 se realiza una ampliación de esta en el rango [168,39-168,44; 1069,5-1070,1] y se observa que la diferencia de las respuestas está en el orden de las centésimas de grados centígrados. Tal como se comentó en la prueba de variación de nodos, se tendrá un incremento en el tiempo de ejecución del algoritmo, cuando se disminuya el diferencial de análisis. En conclusión, escoger 250 nodos con un Δt de 0,1 segundos dará resultados rápidos con margen de error pequeño.

FIGURA 34. MÉTODO DE CRANK - NICOLSON DESARROLLADO CON DIFERENTES DIFERENCIALES DE TIEMPO 0,25,0,125 Y 0,05.



FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 35. AMPLIACIÓN DE FIGURA 34.



FUENTE: EL AUTOR.

La tercera y última prueba que se realiza con el algoritmo, es para observar como varia el comportamiento de la temperatura por el cambio de los valores de las propiedades del cobre. Cabe aclarar, que aunque la tarjeta de adquisición se diseñó para sensor una temperatura de 480 °C, la barra alcanza una cota máxima de 240 °C. Los datos de las características del metal en estudio, se toman de las tablas en los apéndices A y B de [1]. En la Tabla 8 se muestran la información con la que se simula el experimento.

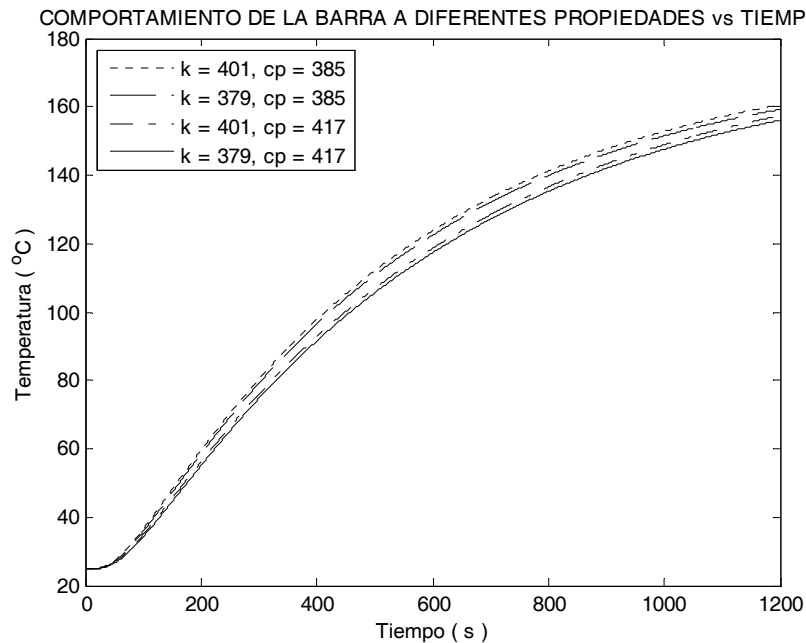
TABLA 8. VARIABLES USADAS PARA PRUEBA DE VARIACIÓN DE PROPIEDADES DEL COBRE

NOMBRE DE LA VARIABLE	SÍMBOLO DE LA VARIABLE	VALOR DE LA VARIABLE	UNIDADES DE LA VARIABLE
RANGO DE VARIACIÓN DEL CONSTANTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	k	[401,0 – 379,0]	$\frac{W}{mK}$
RANGO DE VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE CALOR ESPECÍFICO	C_p	[385,0 – 417,0]	$\frac{J}{KgK}$
COEFICIENTE DE CONVECTIVO DEL AIRE	h	25,0	$\frac{W}{m^2K}$
DIFERENCIAL DE TIEMPO	Δt	0,1	s
NUMERO DE NODOS	N	250,0	

FUENTE: EL AUTOR.

En la Figura 36 se observan cuatro curvas correspondientes a cambios en los coeficientes de conductividad térmica y calor específico. Los valores que se toman en la primera y última línea de la leyenda en la figura, atañen a comportamientos de 300 y 500 K respectivamente. En cambio, las dos pruebas del medio no tienen la posibilidad de coexistir físicamente en este material, no obstante, se realiza un test con el fin de analizar cuál de las propiedades tiene mayor efecto en la transferencia de calor de la barra. De esta gráfica, se puede decir que aumentar la temperatura de la varilla, tiene un efecto en sus propiedades que altera la elevación de la temperatura. Asimismo, el coeficiente de calor específico tiene un impacto más negativo en la capacidad de conducir calor, cuando éste se compara con el resultado del factor de conductividad térmica.

FIGURA 36. DESARROLLO POR MEDIO DE CRANK - NICOLSON CAMBIANDO LOS VALORES DE LOS COEFICIENTES DE CONDUCCIÓN TÉRMICA Y DEL CALOR ESPECÍFICO A PRESIÓN CONSTANTE.



FUENTE: EL AUTOR.

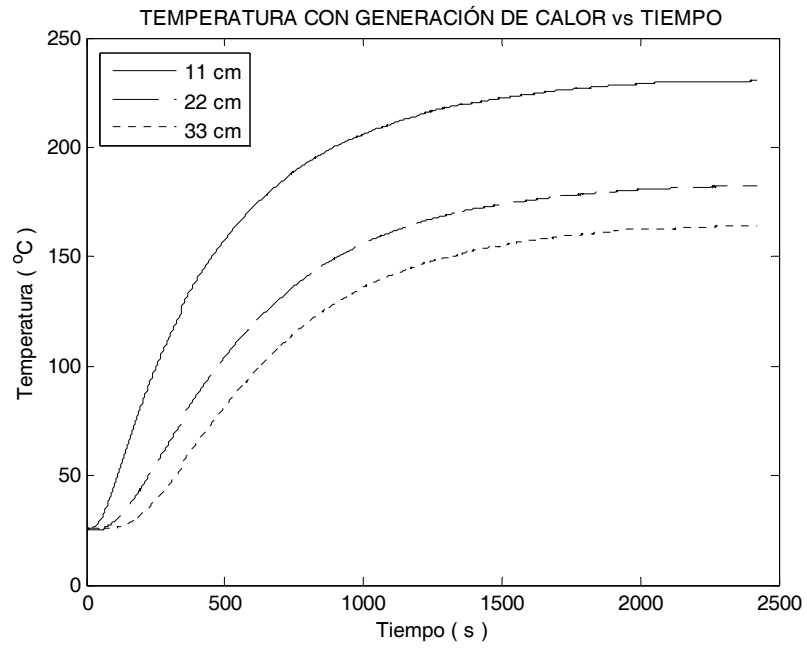
4.2 PRUEBAS FÍSICAS, EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS EN EL PROTOTIPO

En el numeral anterior, se realizaron pruebas de la transferencia de calor en la barra, por medio de simulación numérica, con el método de solución Crank – Nicolson. A continuación, se ejecutan ensayos experimentales en el modelo real, con el fin de observar el comportamiento de la temperatura en la varilla, cuando se aplica en las resistencias de calentamiento una señal de tensión con ciclo de trabajo al 100 %. Asimismo, se analiza el efecto producido por la modificación en el tamaño del espacio de confinamiento y se desarrolla de dos maneras: *espacio abierto*, es decir, que el prototipo se encuentra en un salón abierto y la otra opción es *espacio cerrado*, que corresponde a aislarlo térmicamente del ambiente. Para finalizar, los siguientes experimentos se repitieron unas cinco veces y se selecciona uno para analizarlo en este documento.

En el experimento a *espacios abierto y cerrado*, se realiza una toma de muestras durante 40 minutos, generando calor con las resistencias colocadas en sus extremos. Luego, se suspende la producción de energía térmica y se espera que la temperatura de la barra alcance la del ambiente. Simultáneamente, los datos se visualizan en la GUI cada 0,3 s y además, se almacenan en una hoja de cálculo para realizar un análisis del comportamiento de la transferencia de calor en los siguientes tramos: el primero es cuando se genera calor y en el otro, se espera que la varilla se caliente uniformemente hasta que la temperatura se estabilice en la del ambiente.

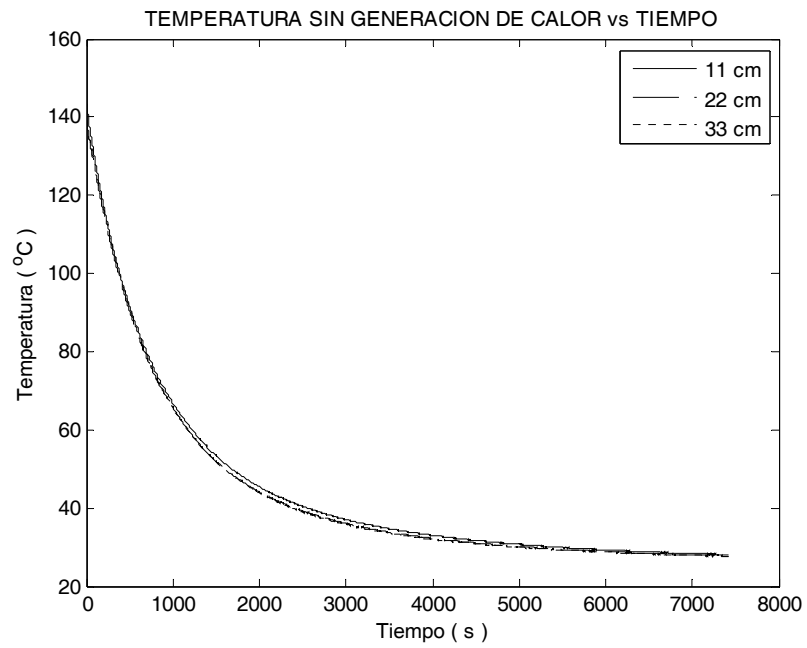
4.2.1 Experimento *espacio abierto*. En la Figura 37 se muestra la curva de calentamiento con generación de calor en los tres puntos de medida a distancias de 0,11 m entre ellos. Se puede observar, que el perfil de temperatura tiene un crecimiento con saturación al final y también este sistema tiene una respuesta de amortiguamiento crítico, tal como se evidenció en la soluciones de simulación numérica usando el método Crank-Nicolson. Asimismo, en la Figura 38 se grafica el segundo tramo de análisis del comportamiento de la transferencia de calor en la barra, con una temperatura inicial de 139 °C en toda la varilla y además se interrumpe la producción de energía térmica en las resistencias de los extremos. En efecto, la temperatura desciende de manera idéntica en los sitios de medición, en un tiempo superior a dos horas.

FIGURA 37. CURVA DE CALENTAMIENTO CON GENERACIÓN.



FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 38. CURVA DE CALENTAMIENTO SIN GENERACIÓN, CON TEMPERATURA INICIAL DE 139°C.



FUENTE: EL AUTOR.

A continuación, utilizando el software Eureka (www.eureka.com), se realizan una serie de interpolaciones con los datos almacenados de las pruebas efectuadas, para así hallar los valores experimentales del modelo y por tanto, determinar los coeficientes de conductividad térmica, calor específico y película del aire.

Para comenzar, se interpola usando el modelo que se muestra en (27) con la información presente en el primer tramo de datos, con el fin de hallar en el punto de medición ubicado en 0,22 m, la ecuación matemática que rige el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo, en función de las magnitudes del nivel de calor, en los sitios de medida situados a 0,11 m $-T_1-$, 0,22 m $-T_2-$ y 0,33 m $-T_3-$; que en otras palabras, determinan la variación del perfil de la transferencia de energía térmica con respecto a la longitud. Para finalizar, la solución que resulta después de la ejecución de Eureka, es mostrada en (28) y tiene una correlación de 0,088.

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = f(T_1, T_2, T_3) \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_2}{\partial t} = & 0,51578057 + 0,0091376677 * T_1 - 0,018482812 * T_2 \\ & + 0,0075596138 * T_3 \end{aligned} \quad (28)$$

Comparando (28) con la ecuación en diferencias que se desarrolló para el método numérico de diferencias finitas en el nodo m (14), es evidente que tienen la misma forma y que representan la variación de la temperatura con respecto al eje de longitud x . Asimismo, se desarrolla (14) para el punto de medida 0,22 m, incluyendo un término de generación de calor \dot{G}_{IN} y se obtiene (29).

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{k}{\rho * c_p * \Delta x^2} (T_1 - 2T_2 + T_3) - \frac{h * P}{\rho * c_p * A_t} (T_2 - T_{inf}) + \dot{G}_{IN} \quad (29)$$

Para los siguientes cálculos se define la razón $CF = \frac{k}{c_p}$, los valores $\rho = 8930$, $\Delta x = 0.11$ y se iguala el factor de T_1 en (28) con el mismo en (29), obteniendo el

valor de CF en (30). Por otra parte, la temperatura de la barra está alrededor de 400 K, entonces el coeficiente de calor específico según las tablas de propiedades para el cobre en [1], es $c_p = 397 \text{ J / Kg K}$ y por tanto, el factor de conducción térmica k experimental es $389,06 \text{ W / K m}$. Igualmente, el esperado según las bases de datos en [1], es de 393 W / K m , por consiguiente el error que se presenta, es de $1,017 \%$.

$$\frac{CF}{\rho * \Delta x^2} = 0,0091376677 \rightarrow CF = 0,98 \quad (30)$$

Otro modelo a interpolar es (31) con los datos del segundo tramo, con ello se busca hallar en el punto de medición ubicado a $0,22 \text{ m}$, la ecuación matemática que rige el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo, pero esta vez, en función de la magnitud del nivel de calor en el sitio de medida situado a $0,22 \text{ m}$ - T_2 -. Entonces, la igualdad resultante de la ejecución de Eureka es (32) con una correlación de $0,013$. Por otra parte, al comparar (29) con (32), se evidencia que esta última no tiene las expresiones correspondientes a los lugares de sensado en $0,11 \text{ m}$ - T_1 -. y $0,33 \text{ m}$ - T_3 -, y generación. Para finalizar con el análisis de éste modelado, se debe determinar el coeficiente de película del aire - h - experimental y esto se realiza tomando el término independiente de (32), igualándolo al segundo término de (29), reemplazando valores de k y c_p hallados experimentalmente y definiendo la temperatura de ambiente a 300 K , da como resultado $h = 16.02$.

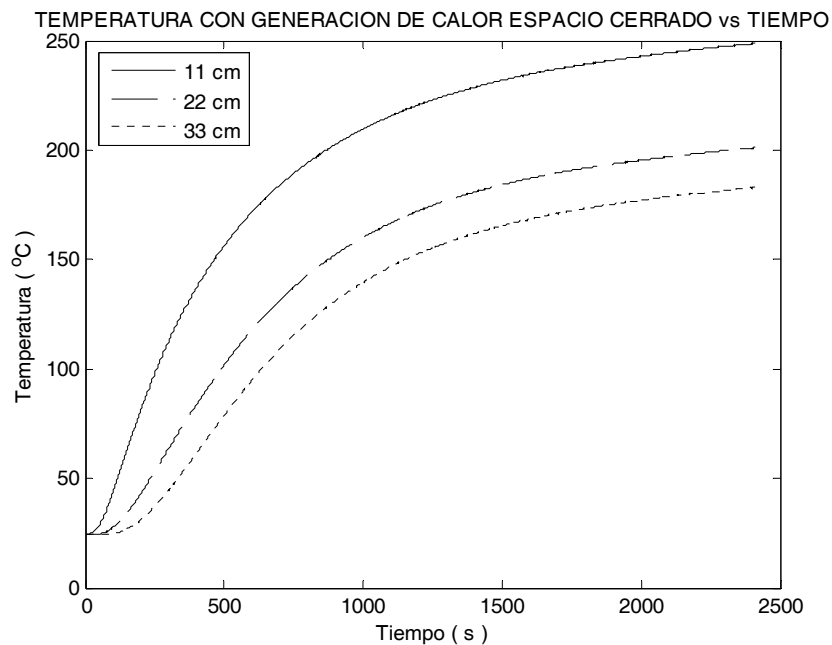
$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = f(T_2) \quad (31)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = 0,3423906 - 0,0011297783 * T_2 \quad (32)$$

4.2.2 Experimento espacio cerrado. En esta prueba, se realiza la toma de datos con el prototipo encerrado en una caja de cartón, con recubrimiento de

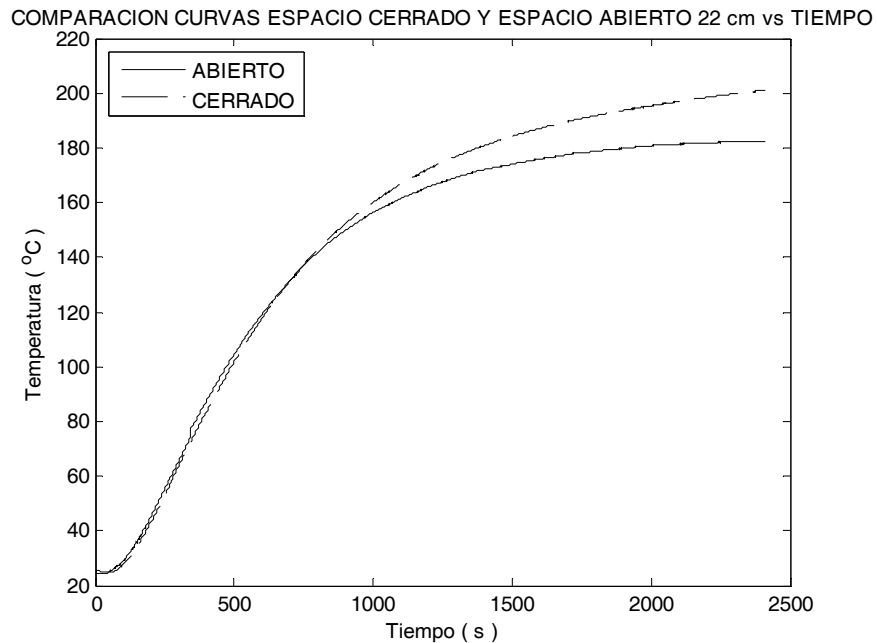
icopores como aislante térmico. En la Figura 39, se observa la gráfica del comportamiento de la temperatura de la barra, en los puntos de medida 0,11 m, 0,22 m y 0,33 m. A simple vista se detalla que la temperatura final es mayor en comparación con la Figura 37. Esto se evidencia mejor en la Figura 40, que muestra las curvas de los experimentos a espacio abierto y cerrado a 0,22 m de los ladrillos refractarios; entre ellas hay un error cuadrático medio de 5% y un máximo de 8.69%. Este calentamiento extra es debido a que el aire encerrado en la caja se calienta y por lo tanto, cambia su coeficiente de película a medida que varía el nivel de calor. Por esta razón y por la imposibilidad de tomar control sobre esta variable, este tipo de prueba no se tiene en cuenta para el proyecto.

FIGURA 39. CURVA DE CALENTAMIENTO CON GENERACIÓN.



FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 40. COMPARACIÓN DE CURVAS DE GENERACIÓN CON ESPACIO ABIERTO Y CERRADO EN PUNTO DE MEDIDA EN 22CM.



FUENTE: EL AUTOR.

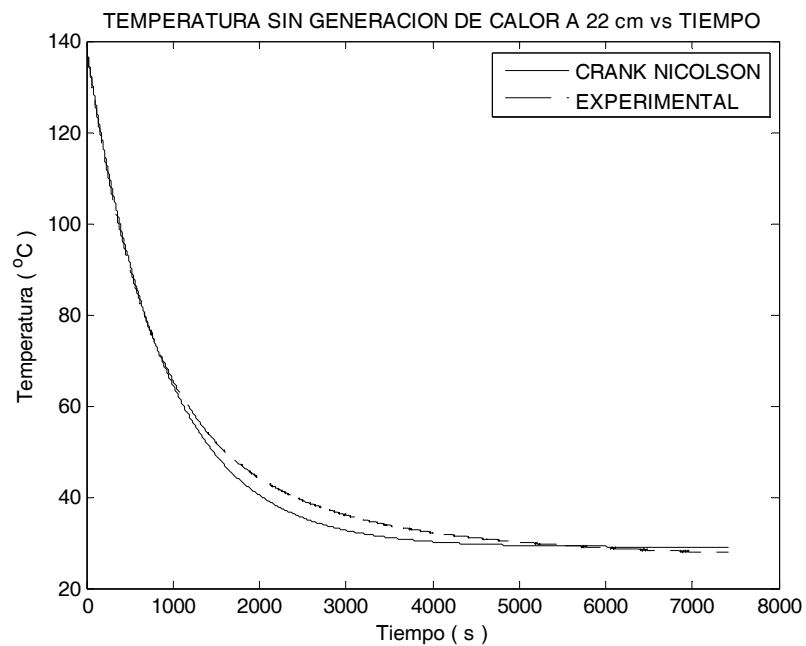
4.2.3 Comparación de los métodos experimental y simulación. Con los valores de los coeficientes de conductividad térmica, calor específico y convección del aire, hallados en el experimento de *espacio abierto*, se ejecuta una simulación numérica con el método de Crank – Nicolson. Tal como se recomendó anteriormente, el número de nodos es 250 y el diferencial de tiempo es 0.1 s. Con estos datos se obtiene la Figura 41 y en ella, se observa la comparación gráfica de los perfiles de temperaturas simulado y real, en el punto de medida ubicado en 0,22 m. Es evidente, que en el rango de 140 °C a 60 °C, están prácticamente superpuestas una sobre la otra, pero por debajo de este nivel se separan hasta que se encuentran nuevamente en 27 °C, que corresponde a la temperatura ambiente. La ficha técnica para la simulación se muestra en la Tabla 9.

TABLA 9. FICHA TÉCNICA PARA LA SIMULACIÓN CON EL MÉTODO NUMÉRICO CRANK-NICOLSON

NOMBRE DE LA VARIABLE	SÍMBOLO DE LA VARIABLE	VALOR DE LA VARIABLE	UNIDADES DE LA VARIABLE
CONSTANTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	k	389,03	$\frac{W}{m K}$
COEFICIENTE DE CALOR ESPECIFICO	C_p	397,00	$\frac{J}{kg K}$
COEFICIENTE DE CONVECTIVO DEL AIRE	h	16,02	$\frac{W}{m^2 K}$
DIFERENCIAL DE TIEMPO	Δt	0,10	s
NUMERO DE NODOS	N	250,00	

FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 41. COMPARACIÓN MÉTODO NUMÉRICO VS. EXPERIMENTO EN EL NODO 2 SIN GENERACIÓN.



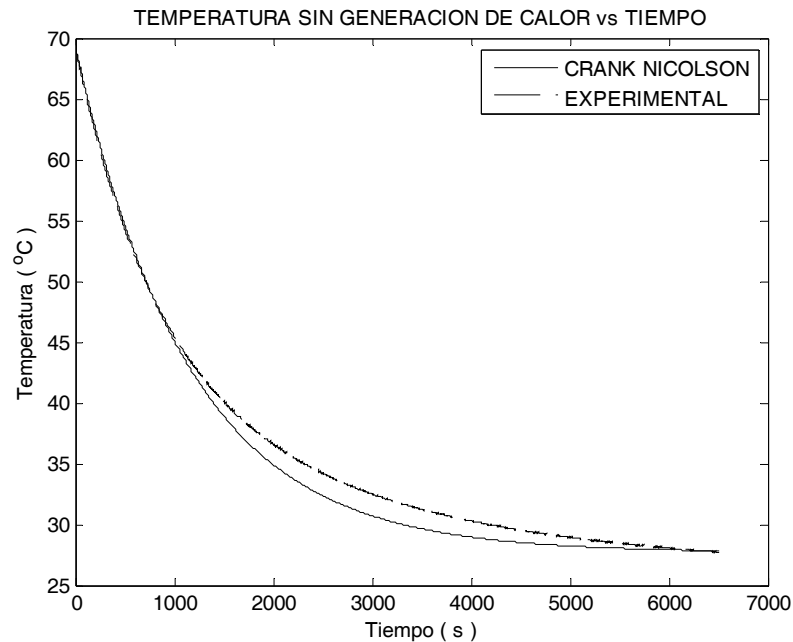
FUENTE: EL AUTOR.

Debido a la diferencia presentada entre los perfiles de temperatura en el punto de medida 0,22 m, por los métodos simulado y experimental, se procede, a examinar los datos e interpolarlos dentro del rango de 70 °C a 27 °C, usando el modelo (31)

en el software Eureka. Por consiguiente, la ecuación que resulta es (33) y realizando el mismo procedimiento utilizado para determinar el coeficiente de película del aire en el experimento de *espacio abierto*, con los valores de las propiedades c_p y k del cobre a una temperatura de 300 K, se obtiene $h = 12.38$. Comparando éste coeficiente de convección con el hallado anteriormente, se comprueba que puede variar con la temperatura en el fluido que rodea la barra. Para finalizar, se gráfica en la Figura 42 la comparación del comportamiento en el prototipo y la simulación con el nuevo h , entre 70 °C y 27 °C. Se evidencia, que están cercanas nuevamente hasta 45 °C aproximadamente, pero debajo de este nivel se vuelven a separar.

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = 0.26444528 - 0.00087676948 * T_2 \quad (33)$$

FIGURA 42. COMPARACIÓN MÉTODO NUMÉRICO VS EXPERIMENTO EN EL NODO 2 SIN GENERACIÓN, EN EL RANGO DE TEMPERATURA ENTRE 70 Y 0°C.



FUENTE: EL AUTOR.

4.3 PRUEBAS FÍSICAS, CONTROLADOR INDUSTRIAL OMRON E5CK

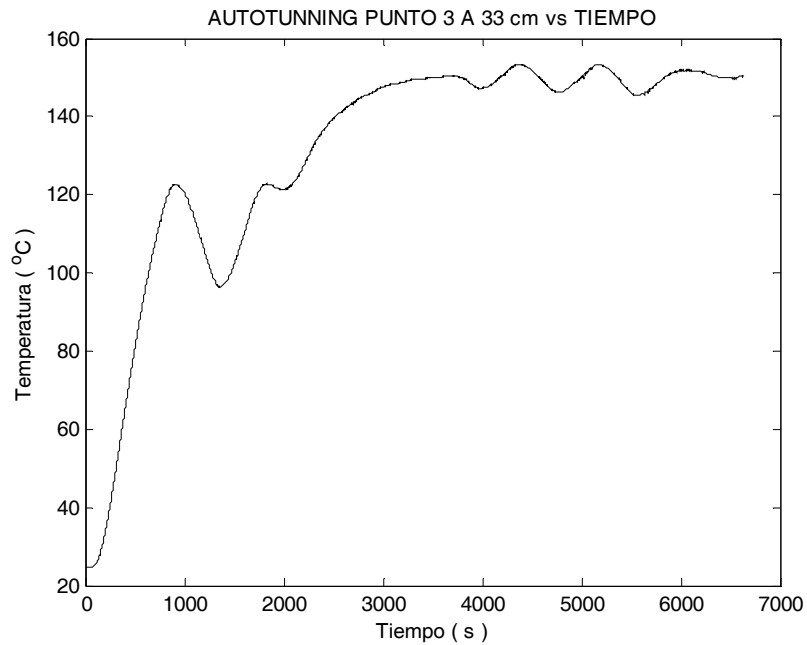
Para encontrar los parámetros de la estrategia PID del controlador, se utiliza la función *autotuning*. Cabe anotar, que antes de ejecutar la autoconfiguración, se debe ingresar en el *setpoint* del controlador, un valor de temperatura menor a la cota superior observada en la Figura 37, para cada sitio de medición. Como se explicó anteriormente, el perfil de la transferencia de calor en la barra presenta una simetría con respecto al centro de la varilla, el punto 1 se refiere a la pareja de termocuplas 1-6 que se encuentran a 0,11 m de los ladrillos, el 2 al dúo 2-5 que está a 0,22 m y el 3 a 3-4 con distancias de 0,33 m. En Tabla 10, se muestran los valores de las constantes proporcional - P -, y las de los tiempos integral - Ki - y derivativo - Kd -, hallados por el *autotuning* en cada punto; la variación de los valores cambia, porque a que a medida que se aleja de la fuente de calor, aumenta el retardo en la respuesta a un cambio de potencia en las resistencias en dichos puntos. También, se incluyen las temperaturas máxima con la que se puede trabajar en ellos. Por último, mientras que el controlador ejecuta una autoconfiguración en el punto 3, se realizó una toma de datos en un tiempo superior a 6000 s y se muestran graficados en la Figura 43. Esta gráfica se compara con la figura que aparece en la pagina 3-13 de [17] y se puede decir que tienen un comportamiento similar.

TABLA 10. CONSTANTES DE CONFIGURACIÓN DEL CONTROLADOR INDUSTRIAL E5CK PARA REALIZAR CONTROL EN LOS PUNTOS DE MEDIDA

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3
P	4.0	4.1	4.8
Ki	154	402	601
KD	23	60	90
TEMPERATURA MÁXIMA °C	220	170	150

FUENTE: EL AUTOR.

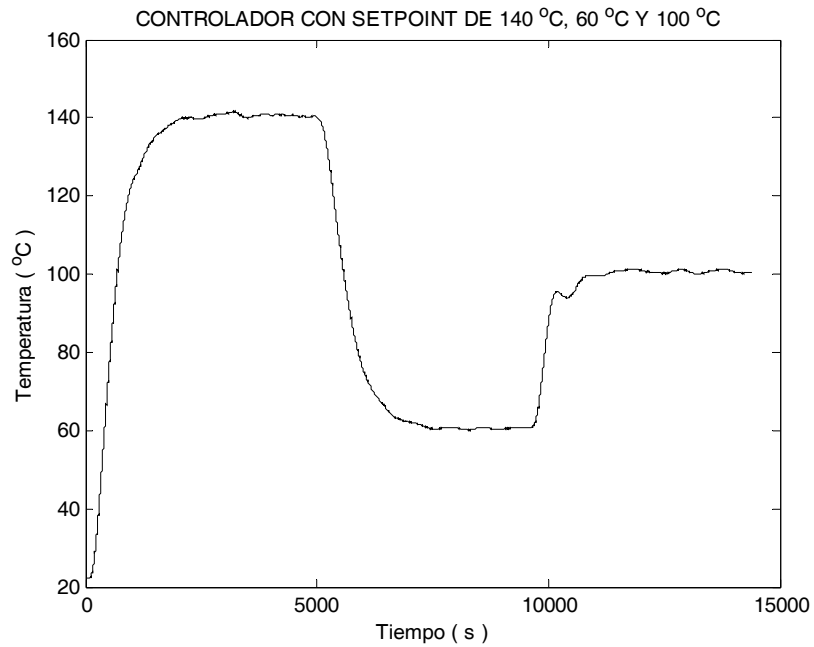
FIGURA 43. AUTOCONFIGURACIÓN EN EL PUNTO DE MEDIDA 3 SITUADO A 0,33 M DEL LADRILLO REFRACTARIO DE SOPORTE.



FUENTE: EL AUTOR.

Una de las pruebas realizadas al controlador, fue variar el *setpoint* de la temperatura en el sitio de medición 3. Después de la modificación del punto de consigna, se espera durante una hora y veinte minutos para realizar el siguiente cambio. Fueron tres cambios de *setpoint* en el experimento, primero se trabajó con 140 °C, luego con 60 °C y para finalizar se usó 100 °C. En la Figura 44 se muestra la gráfica de los datos y se observan unas fluctuaciones en la curva, debido a una corriente de aire fría, que circula en el salón donde se encuentra el prototipo.

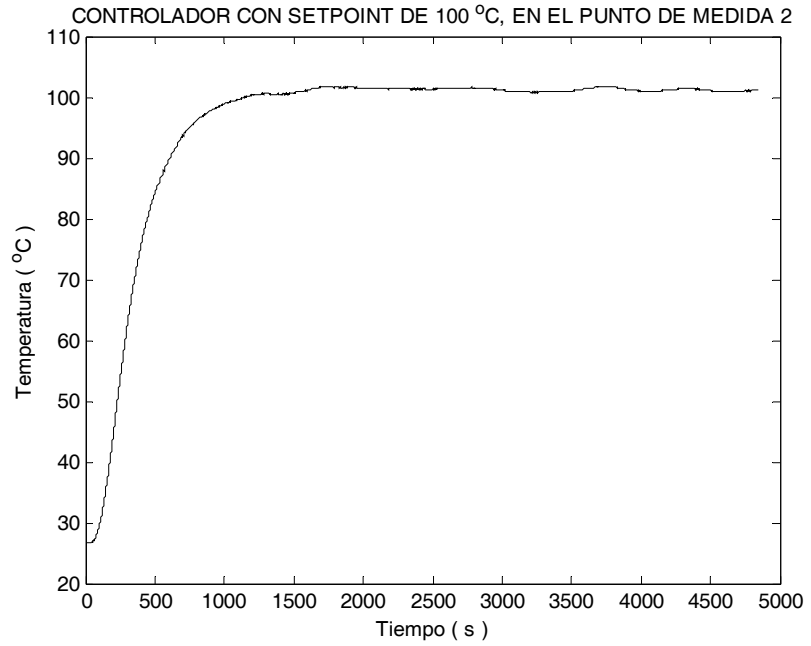
FIGURA 44. FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR VARIANDO EL REFERENCIA DE 140 . °C A 60 °C Y LUEGO A 100 °C



FUENTE: EL AUTOR.

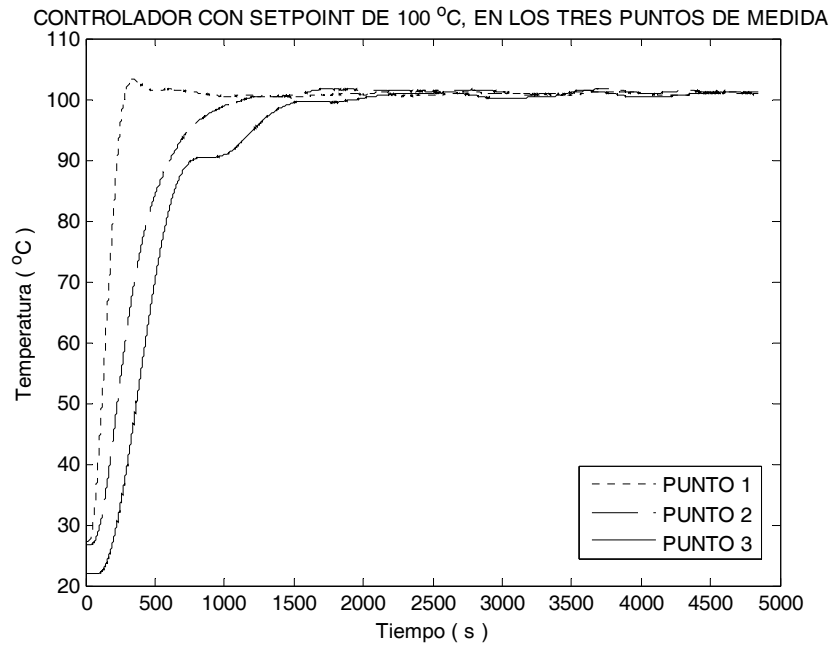
Posteriormente, se realizó una prueba con un *setpoint* de 100 °C en cada punto de medida, durante una hora y veinte minutos, con el fin de observar el perfil de la temperatura en cada sitio de medición. En la Figura 45, se muestra el comportamiento de la magnitud del nivel de calor en el punto 2, y se evidencia que en un tiempo aproximado de 1200 segundos se llega a 100 °C, manteniéndose hasta el final de la prueba. Por otra parte, en Figura 46 se observa graficada la temperatura en los tres puntos de medida, y como es lógico, entre más cerca esté de la fuente de calor, más rápido llegara al *setpoint*.

FIGURA 45. FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR CON REFERENCIA DE 100 °C EN EL PUNTO DE MEDIDA 2



FUENTE: EL AUTOR.

FIGURA 46. FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR CON REFERENCIA DE 100 °C EN EL LOS PUNTO TRES PUNTOS MEDIDA



FUENTE: EL AUTOR.

5 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Se construyó un prototipo, para que los estudiantes de la asignatura de sistemas de control, puedan practicar y afianzar los conocimientos recibidos en las clases de teoría. Además, se programó un algoritmo de solución numérica, para resolver la ecuación diferencial parcial –PDE- parabólica de la transferencia de calor, por medio del método de Crank – Nicolson y adicionalmente, dentro de este código, se pueden modificar los valores de las propiedades del cobre y los diferenciales de tiempo y espacio, con el fin de obtener varias soluciones a este proceso térmico que se contrastan con el comportamiento de la temperatura en el prototipo, para así, determinar el modelo que mejor se ajuste a la transferencia de calor en la barra.

Se diseñó y construyó una tarjeta de adquisición, para sensar con termocuplas la temperatura en seis puntos de medida de la barra metálica del prototipo. Además, se programó el microcontrolador para realizar control de fase de la onda de tensión en las resistencias de calentamiento y asimismo, se usó también como interfaz entre la tarjeta construida y el computador, con el fin de leer y almacenar los datos correspondientes a la variable medida. Adicionalmente, se efectuaron varias tomas de datos por medio de una interfaz gráfica usuario – máquina, que fue programada en Matlab y con la información almacenada y el software Eureka, se interpoló y modeló, con el fin de extraer de las pruebas realizadas, los valores experimentales de las propiedades del cobre y el coeficiente de película del aire. Para finalizar, se puede concluir que de las pruebas experimentales en un espacio abierto y cerrado, el coeficiente de convección del aire cambia constantemente con la temperatura.

Se contrastaron los comportamientos del perfil de temperatura obtenidos por el método numérico y las pruebas experimentales, y se evidenció que tienen respuestas muy similares en forma y valores, con error cuadrático medio cuando

hay generación en las resistencias de calentamiento del orden de 8,40% y 1,53% con solamente convección (no generación).

Con este proyecto se trabajó el proceso de la transferencia de calor en una barra por experimentación y solución numérica, permitiendo realizar comparaciones entre lo teórico y práctico, y además, se efectuó el modelado de este fenómeno, con el fin de que el estudiante de la asignatura sistemas de control tenga un punto de referencia, al momento de abordar un problema de caracterización y modelado de procesos.

Usando el controlador industrial E5CK, los estudiantes pueden adquirir una experiencia práctica en la operación de este y así suplir las necesidades que tiene la industria sobre el uso de este tipo de controladores en sus empleados.

Se redactó un manual de usuario para que los estudiantes puedan operar este prototipo en el laboratorio de la asignatura sistemas de control.

6 RECOMENDACIONES

Se recomienda, que se utilice el prototipo en la enseñanza practica del laboratorio de la asignatura sistemas de control, con el fin de enseñar a los estudiantes que toman el curso, sobre el modelado de un proceso real, que en este caso corresponde a la transferencia de calor y además, la operación de un controlador industrial.

Además, de usar la maqueta diseñada como herramienta de apoyo en el laboratorio, se hace énfasis en seguir la continuidad de éste proyecto, desarrollando estrategias de control avanzado para controlar la temperatura en la barra.

REFERENCIAS

- [1] A. F. Mills, *Heat Transfer*, 2nd ed. Prentice Hall, 1998, p. 954.
- [2] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed. Clarendon, Oxford, 1959, p. 517.
- [3] Y. A. Cengel, *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach*, vol. 32, no. 5. McGraw-Hill, 2006, p. 416.
- [4] L. M. Jiji, *Heat Conduction*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [5] M. h Rashid, *Power Electronics Handbook*, 1st ed. Canada: ACADEMIC PRESS, 2001, p. 892.
- [6] G. E. Myers, *Analytical Methods in Conduction Heat Transfer*, 1st ed. McGraw-Hill College, 1971, p. 512.
- [7] S. c Chapra, *Numerical Methods for Engineers*, 6th ed. Singapore: McGraw-Hill Higher Education, 2010, p. 960.
- [8] J. Shtargot and S. Mirza, "REFERENCE DESIGN 5032: Modern Thermocouples and a High-Resolution Delta-Sigma ADC Enable High-Precision Temperature Measurement." MAXIM-IC, 2011.
- [9] "ITS-90 Table for type K thermocouple." [Online]. Available: http://srdata.nist.gov/its90/download/type_k.tab. [Accessed: 23-Oct-2011].
- [10] J. Shtargot and S. Mirza, "REFERENCE DESIGN 5032: Modern Thermocouples and a High-Resolution Delta-Sigma ADC Enable High-Precision Temperature Measurement." MAXIM-IC, 2011.
- [11] "APPLICATION NOTE 1762: A Beginner's Guide to Filter Topologies." MAXIM-IC, 2003.
- [12] S. Sedra, *Microelectronics Circuits*, 4th ed. Oxford University Press, USA, 1997, p. 1360.
- [13] S. D. Kulchycki, "Continuous-Time Sigma-Delta ADCs." National Semiconductor, 2008.
- [14] "APPLICATION NOTE 1870: Demystifying Delta-Sigma ADCs." MAXIM-IC, 2003.

- [15] "TUTORIAL 1080 Understanding SAR ADCs: Their Architecture and Comparison with Other ADCs." MAXIM-IC, 2001.
- [16] "THE I 2C-BUS SPECIFICATION." PHILIPS Semiconductor, p. 46, 2000.
- [17] Omron, "E5CK Digital Controller User's Manual." OMRON, p. 138, 1995.

ANEXOS

ANEXO A

**MANUAL DE USUARIO PARA EL PROYECTO DE GRADO MODELADO Y
CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA BARRA CON PROPÓSITOS
DIDÁCTICOS PARA LA ASIGNATURA SISTEMAS DE CONTROL**

Manual de Usuario para el Proyecto de Grado Modelado y Control de Temperatura en una Barra con Propósitos Didácticos Para la Asignatura de Sistemas Control

A.1 INTRODUCCIÓN

En este documento, se muestra con detalles las piezas que componen al prototipo diseñado como material didáctico para la asignatura de sistemas de control. Además, se guía al usuario para que realice las conexiones necesarias, con el fin de realizar pruebas. También, se explica el uso de la interfaz GUI desarrollada para este proyecto y la configuración del controlador industrial E5CK.

A.2 PIEZAS

A continuación, se señalan las piezas que este prototipo contiene, las siguientes figuras se encuentran en ANEXO B.

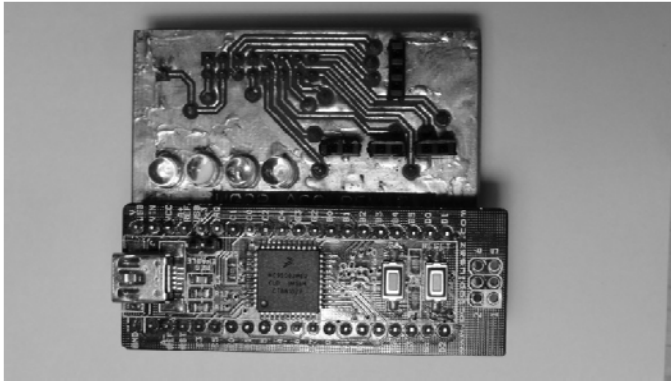
- Prototipo, Fig. B1.
- Toma corriente, Fig. B2.
- Interruptor de General, Fig. B3.
- Termocuplas, Fig. B4.
- Caja de potencia y adquisición, Fig. B5.
- Tarjeta de potencia, Fig. B6.
- Conector de resistencias de calentamiento, Fig. B7.
- Tarjeta de adquisición, Fig. B8.
- Conectores de termocuplas, Fig. B9.
- Switch de selección para controlar las resistencias por parte de la tarjeta de adquisición o del controlador E5CK. Conexión de la salida del controlador, Fig. B10.
- Conector potencia-adquisición, Fig. B11.
- Conector adquisición - Selección, Fig. B12.
- Modulo JM60, Fig. B13.
- Acoplador Modulo Jm60 tarjeta de adquisición, Fig. B14.
- Controlador E5CK, Fig. B15.
- Bornera en controlador E5CK, Fig. B16.

A.3 CONEXIONES

En esta sección, se explica las conexiones necesarias para realizar pruebas con el prototipo. Se advierte, que antes de conectar a la red eléctrica, hay que realizar y verificar las siguientes conexiones.

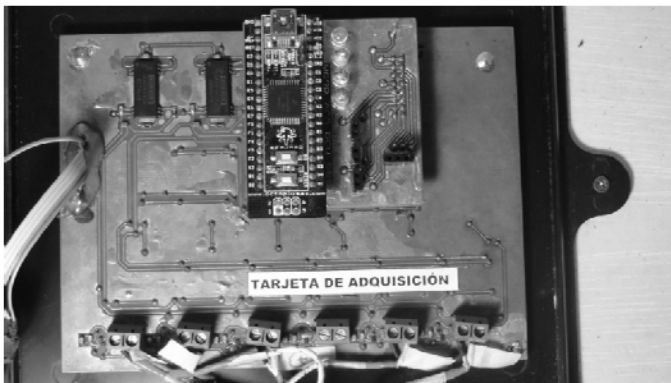
- Verificar interruptor general, Fig. B3, se encuentra en off.
- Realizar la conexión de los conectores de resistencias de calentamiento, Fig. B7.
- Verificar que los conectores potencia-adquisición, Fig. B11, y adquisición-selección, Fig. B12, se encuentren conectados.
- Verificar conexión de modulo Jm60 al acoplador jm60-adq, el conector usb se debe encontrar hacia el lado donde se encuentran los leds, tal como se muestra en Fig. A1.
- Verificar conexión acoplador Jm60-Adq, en la tarjeta de adquisición, el conector usb del modulo jm60 debe quedar del lado opuesto a los conectores de termocuplas, tal como se muestra en Fig. A2.
- Conectar cable Usb al modulo Jm60 y PC.
- Conectar la alimentación, la salida y la termocupa en el controlador E5CK, según Fig. A3. Se puede usar el toma corriente Fig. B2, para alimentar al dispositivo.
 - Conectar en la caja de adquisición la salida del controlador E5CK, tal como se muestra en Fig. A4. y colocar el swith de selección en tarjeta de adquisición.

FIG. A1 CONEXIÓN MODULO JM60 Y ACOPLADOR JM60-ADQ



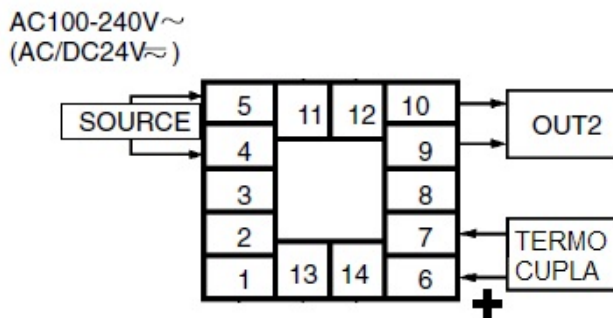
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. A2 CONEXIÓN ACOPLADOR JM60 – ADQ, A LA TARJETA DE ADQUISICIÓN



FUENTE: EL AUTOR.

FIG. A3 CONEXIÓN EN LA BORNERA DEL CONTROLADOR E5CK



FUENTE: MANUAL DE USUARIO, CONTROLADOR INDUSTRIAL E5CK DE OMRON. MODIFICADA, POR AUTOR.

A.4 INTERFAZ GUI EN MATLAB

Después de realizar las conexiones descritas en el capítulo anterior, se debe abrir el archivo *caracterizacion_termocuplas.m* en Matlab. Luego se ingresa al menú *Debug>Run caracterización_termocuplas.m* o simplemente se presiona la tecla F5 para ejecutar el programa, que muestra la interfaz GUI, Fig. A5.

FIG. A4 CONEXIÓN DE LAS SALIDAS DEL CONTROLADOR E5CK A LA CAJA DE ADQUISICIÓN.



FUENTE: EL AUTOR.

FIG. A5 INTERFAZ GUI



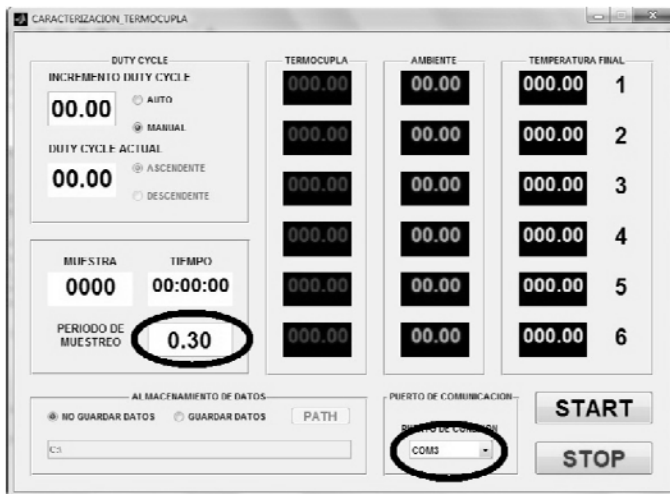
FUENTE: EL AUTOR.

En Fig. A5, se muestra la temperatura en la unión fría, la de ambiente y la suma de ambas, el tiempo, el numero de muestras transcurridas en la prueba y el ciclo de trabajo actual. También, se puede seleccionar guardar los datos adquiridos y además, controlar el ciclo de trabajo de la onda de tensión que va a las resistencias de calentamiento y el periodo de adquisición.

Con esta interfaz se puede trabajar de dos maneras, la primera es controlando la potencia de las resistencia para poder realizar la caracterización de la barra del prototipo y la segunda es hacer un seguimiento de la temperatura cuando está conectado y en operación el controlador industrial E5CK.

Antes de correr cualquier prueba, hay que seleccionar el puerto donde está conectada la tarjeta y el periodo de muestreo, que por defecto es 0.3 s. En Fig. A6 se muestra donde configurar con unos óvalos de línea gruesa.

FIG. A6 PERIODO DE MUESTREO Y SELECCIÓN DE PUERTO



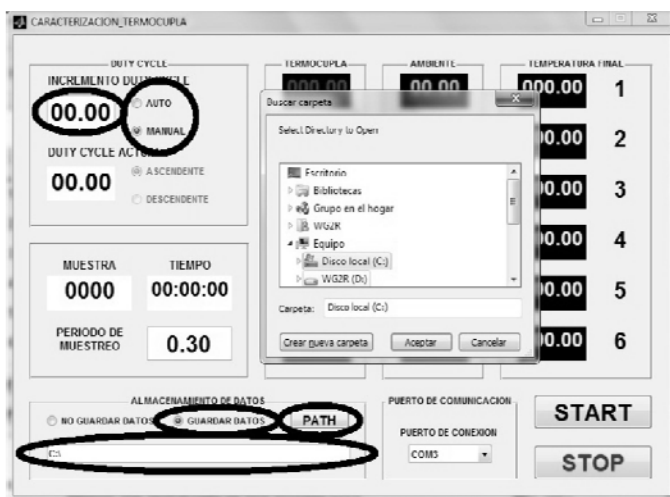
FUENTE: EL AUTOR.

A.4.1 Caracterización De La Barra

Para caracterizar la barra se recomienda guardar los datos para un posterior análisis, este programa almacena los datos en un archivo de Excel, el numero de muestras máximas que se puede almacenar en una hoja es calculo es 65536. Por lo tanto el software se detiene automáticamente al alcanzar este valor.

Siguiendo la recomendación anterior de almacenar los datos, se procede de la siguiente manera: en Fig. A7 se observa en el marco de *almacenamiento de datos*, la selección de *guardar datos* y se debe ingresar la ruta almacenamiento, por medio del botón *path* o manualmente en el cuadro de edición texto señalado. En este camino, se almacena el archivo de Excel con nombre *Datos_* seguido de la fecha y la hora de inicio de la prueba.

FIG. A7 ALMACENAMIENTO DE DATOS Y CONFIGURACIÓN DE CICLO DE TRABAJO



FUENTE: EL AUTOR.

Además de guardar los datos, se debe que seleccionar el ciclo de trabajo. Si se selecciona *manual* en el marco *duty cycle*, se tiene que ingresar el valor del porcentaje en alto de la señal PWM en *incremento duty cycle*, este se mantiene

durante toda la prueba, no es posible cambiarlo hasta la finalización de ésta.

Cuando se selecciona *auto* el valor que se ingrese en *incremento duty cycle*, será la cantidad que aumenta el ciclo de trabajo, este cambia cuando el promedio de todas las temperaturas tenga un error menor a 5 °C comparándola con la media inmediatamente anterior. Tal como sucede en el modo *manual* no es posible cambiar el paso, hasta que finalice la prueba.

En Fig. A7 se observa la casilla de *incremento duty cycle*, los modos *auto* y *manual* y el ciclo de trabajo actual en *duty cycle actual*.

A.4.2 Seguimiento De La Temperatura En La Barra Cuando Se Usa El Controlador E5CK

Durante el seguimiento de la temperatura en la barra el valor que se ingrese en *incremento duty cycle* no actúa sobre el prototipo, ya que el control lo está realizando el controlador industrial E5CK y este opera la potencia de las resistencias.

En caso de que no se requiera realizar un análisis posterior a los datos se recomienda seleccionar *no guardar datos* en el marco de *almacenamiento de datos*.

A.5 CONTROLADOR INDUSTRIAL E5CK

ADVERTENCIA: Para poder realizar las pruebas usando el controlador E5CK, hay que revisar las conexiones eléctricas.

En este prototipo hay seis puntos de medida, la cual son simétricos con respecto al eje vertical que cruza por el centro de la varilla. Debido a lo expuesto anteriormente y que además, la potencia generada en los dos extremos de la barra es la misma, las parejas de termocuplas 1-6, 2-5 y 3-4, deben tener una temperatura aproximadamente igual.

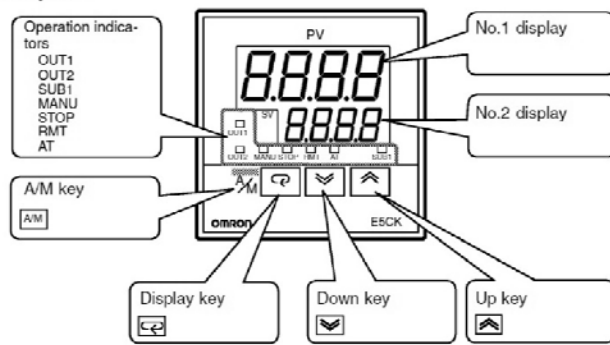
Por lo anterior se puede realizar pruebas con un solo lado de la barra, y usar el otro para seguimiento por medio de la interfaz GUI diseñada. Para así, analizar el comportamiento de la temperatura.

Debido a que el controlador E5CK solo permite realizar el control un solo punto, se aconseja desconectar solamente la termocupla del lugar a controlar y dejar las demás conectadas a la tarjeta de adquisición. El termopar se ajusta en el dispositivo de control como esta descrito en el capítulo III.

En Fig. A8 se muestra el panel frontal del controlador y se observa los displays 1 y 2, los indicadores de salida, auto-tunning, stop y manual, y las teclas display, arriba y abajo.

FIG. A8 PANEL FRONTAL DE CONTROLADOR E5CK, TOMADO MANUAL DE USUARIO OMRON E5CK

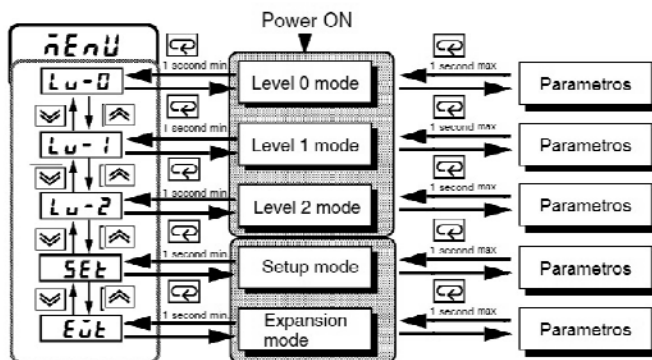
■ Front panel



FUENTE: MANUAL DE USUARIO, CONTROLADOR INDUSTRIAL E5CK DE OMRON.

Presionando la tecla *Display* por más de un segundo, se ingresa al menú, luego con las teclas de arriba y abajo se puede seleccionar el modo deseado, se vuelve a presionar *Display* mas de un segundo para ingresar a dicho modo. Y presionando *Display* menos de un segundo se puede ir cambiando entre los parámetros y si se desea modificar alguno de ellos, se usa las teclas de arriba y abajo. En Fig. A9 se muestra el diagrama de bloques del software del controlador.

FIG. A9 DIAGRAMA DE FLUJO SOFTWARE E5CK, TOMADO MANUAL DE USUARIO OMRON E5CK Y MODIFICADO.



FUENTE: MANUAL DE USUARIO, CONTROLADOR INDUSTRIAL E5CK DE OMRON. MODIFICADA, POR AUTOR.

Para configurar los parámetros del controlador E5CK, hay que apoyarse en el ANEXO D, donde se muestran los códigos de los parámetros con sus respectivos nombres.

Para configurar el controlador realizar los siguientes pasos:

- Ingresar a *menú*>*Setup mode* y modificar:
 - *C/F selection*, asignar *C*.
 - *Control output 1 assignment*, asignar *alarm 1 AL-1*.
 - *Control output 2 assignment*, asignar *heat*.

- *Auxiliary output 1 assignment*, asignar *alarm 2 AL-2*.
- *Direct/Reverse operation*, asignar *or-r*.
- Ingresar *menú*>*Expansion mode* y modificar:
 - *Pid/On/Off*, asignar *PID*.
 - *ST*, asignar *off*.

Dependiendo el punto a controlar hay que ingresar los valores de las constantes P, Ki y Kp de este en el controlador. Por medio del autotuning del controlador se obtuvo los valores de la estrategia PID para la barra en las parejas de puntos 1-6, 2-5 y 3-4, se pueden observar en Tabla A1.

TABLA A1. CONSTANTES DE CONFIGURACIÓN DEL CONTROLADOR INDUSTRIAL E5CK PARA REALIZAR CONTROL EN LOS PUNTOS DE MEDIDA

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3
P	4.0	4.1	4.8
KI	154	402	601
KD	23	60	90
TEMPERATURA MÁXIMA °C	220	170	150

FUENTE: EL AUTOR.

Para ingresar los parámetros del controlador PID, seguir los siguientes pasos:

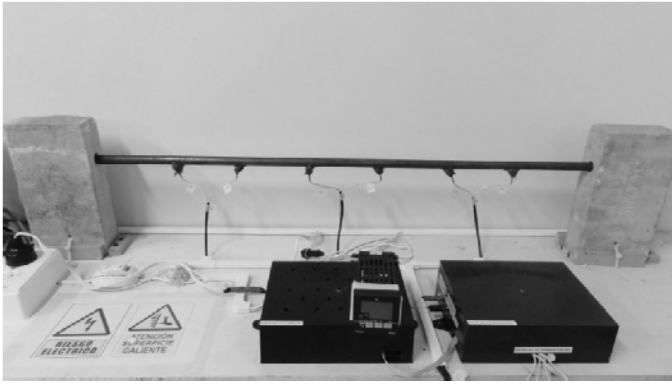
- Ingresar a *menú*>*Level 1 mode* y modificar:
 - *Proportional band*, asignar *Valor de constante proporcional* del punto de medida, dado en Tabla A1.
 - *Integral time*, asignar *Valor de constante Integral* del punto de medida, dado en Tabla A1.
 - *Derivate time*, asignar *Valor de constante Derivativa* del punto de medida, dado en Tabla A1.
- Ingresar a *menú*>*Level 0 mode* y modificar:
 - *Set point*, asignar *Valor de set point deseado*, sin sobre pasar el valor máximo de la temperatura dada en Tabla A1.

El Controlador ya se encuentra listo para controlar la temperatura, en caso de cambiar el punto de control, reconfigurar los valores de las constantes de la estrategia PID en el dispositivo.

ANEXO B

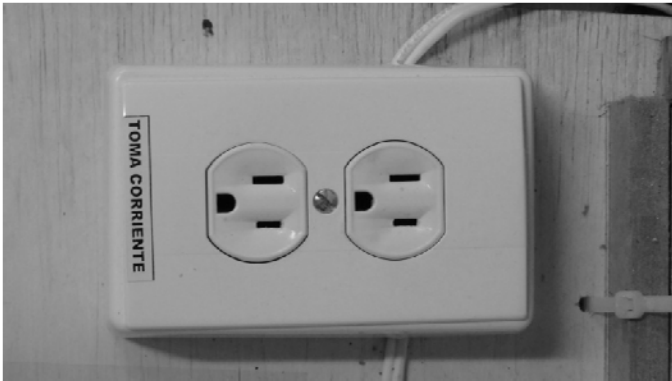
IMÁGENES DE LAS PIEZAS QUE CONFORMAN EL PROTOTIPO

FIG. B1 PROTOTIPO



FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B2 TOMA CORRIENTE



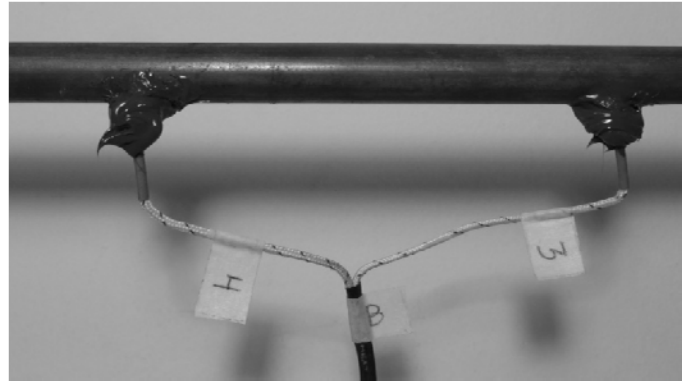
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B3 INTERRUPTOR GENERAL



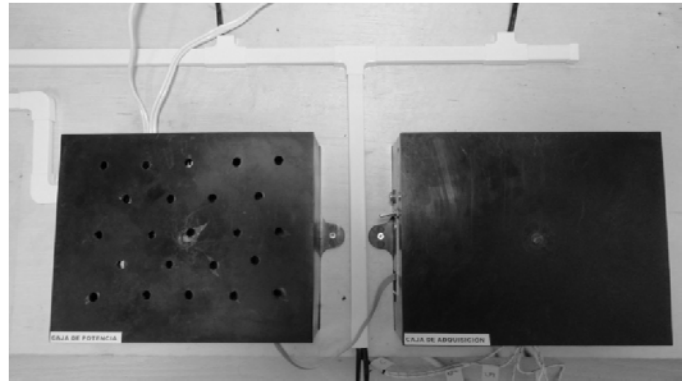
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B4 TERMOCUPLAS



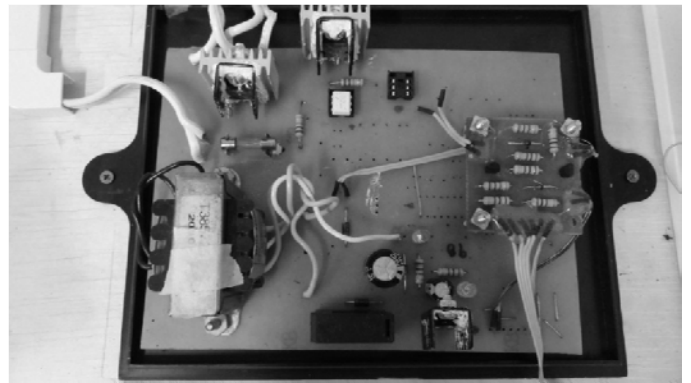
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B5 CAJAS DE POTENCIA Y ADQUISICIÓN



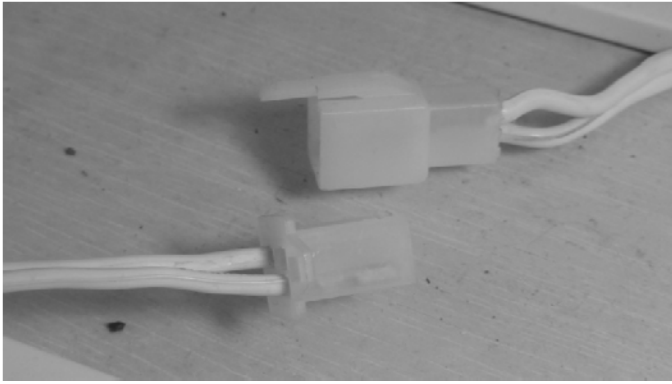
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B6 TARJETA DE POTENCIA



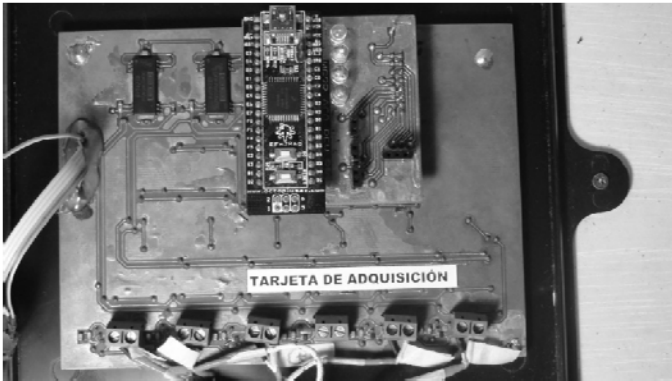
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B7 CONECTOR RESISTENCIAS DE CALENTAMIENTO



FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B8 TARJETA DE ADQUISICIÓN



FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B9 CONECTORES PARA LAS TERMOCUPLAS



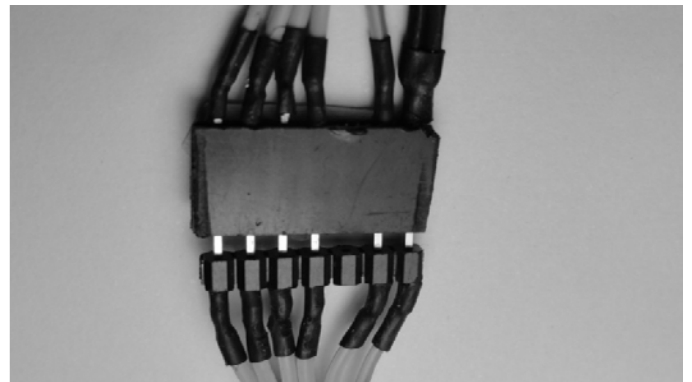
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B10 SWITCH DE SELECCIÓN PARA EL CONTROL DE LA POTENCIA DE LAS RESISTENCIAS DE CALENTAMIENTO Y CONECTOR PARA LA SALIDA DEL CONTROLADOR E5CK.



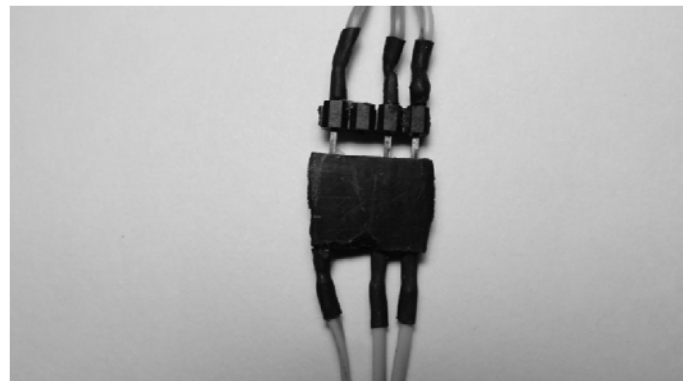
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B11 CONECTOR POTENCIA-ADQUISICIÓN



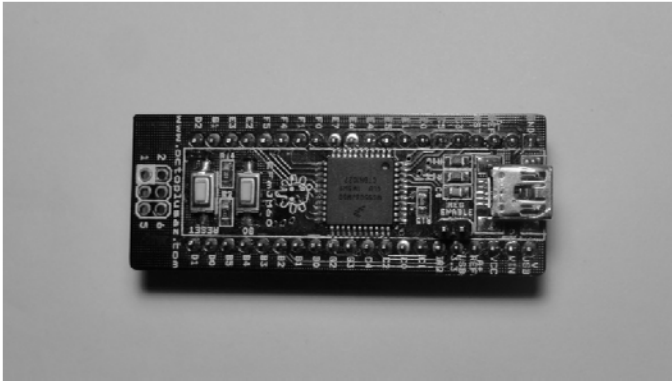
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B12 CONECTOR ADQUISICIÓN-SELECCIÓN



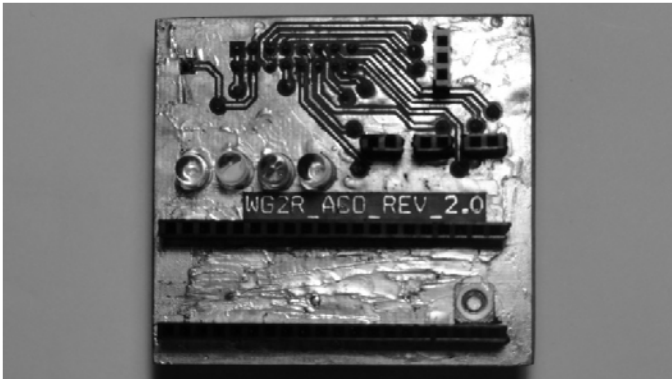
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B13 MODULO JM60



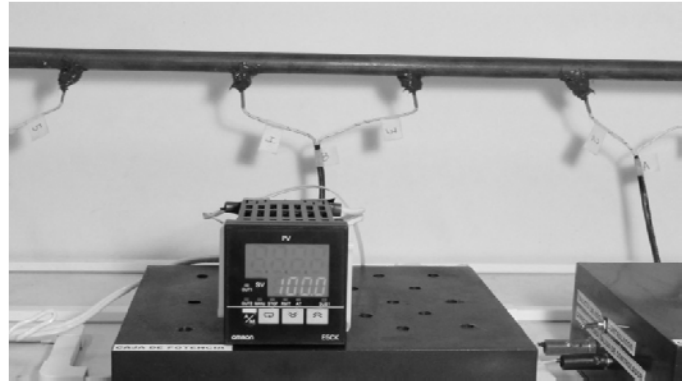
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B14 ACOPLADOR MODULO JM60 Y TARJETA DE ADQUISICIÓN



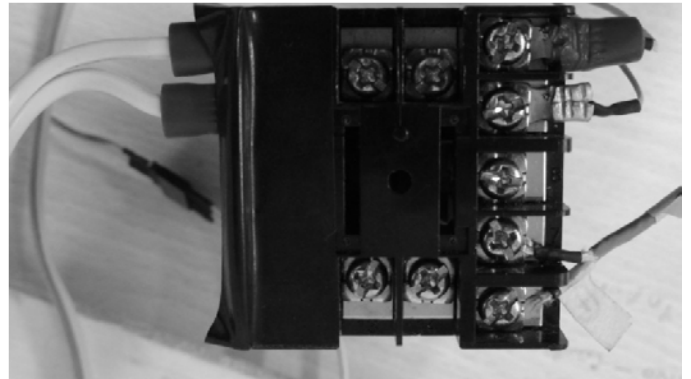
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B15 CONTROLADOR E5CK



FUENTE: EL AUTOR.

FIG. B16 BORNERA CONTROLADOR E5CK.

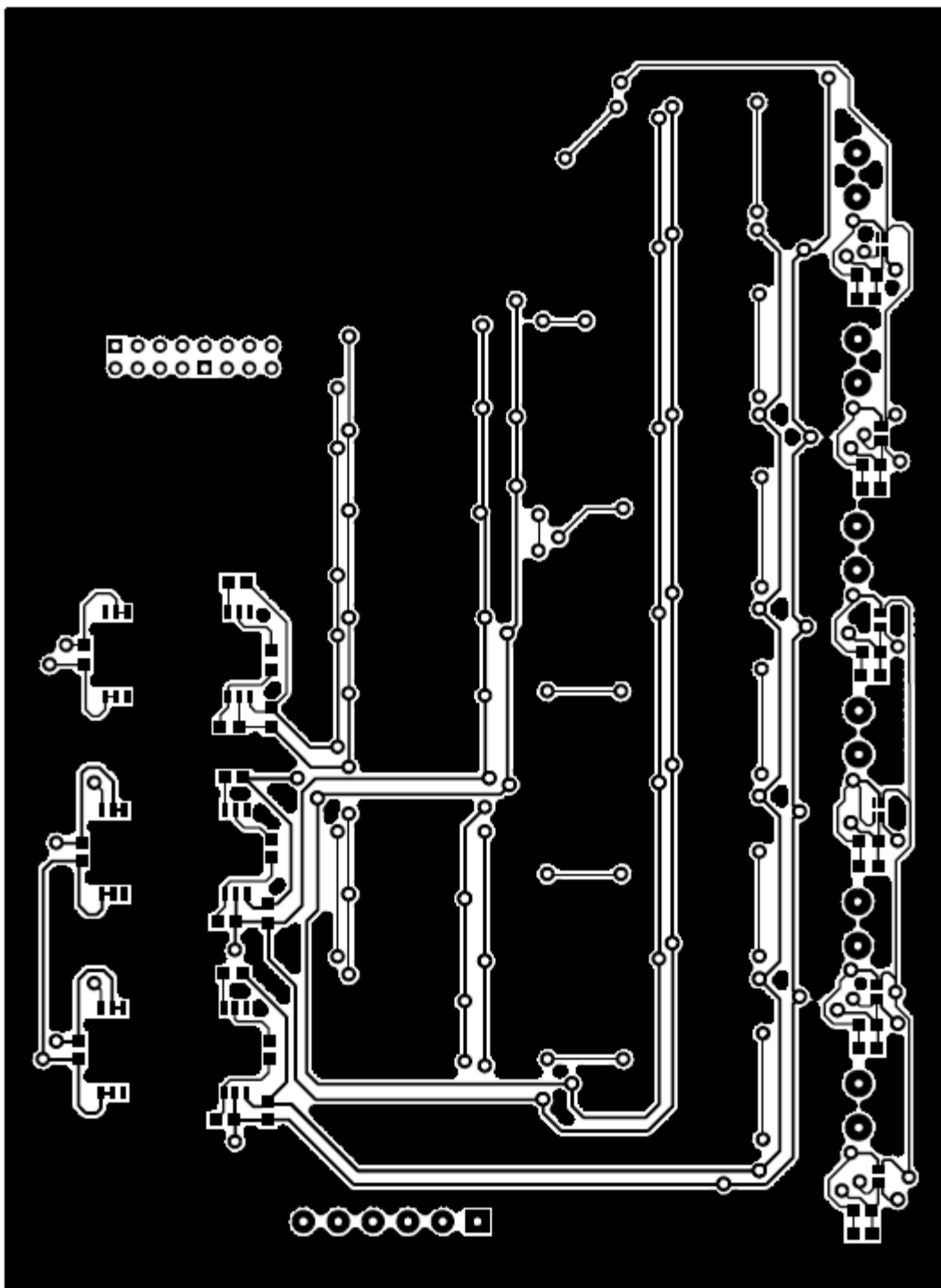


FUENTE: EL AUTOR.

ANEXO C

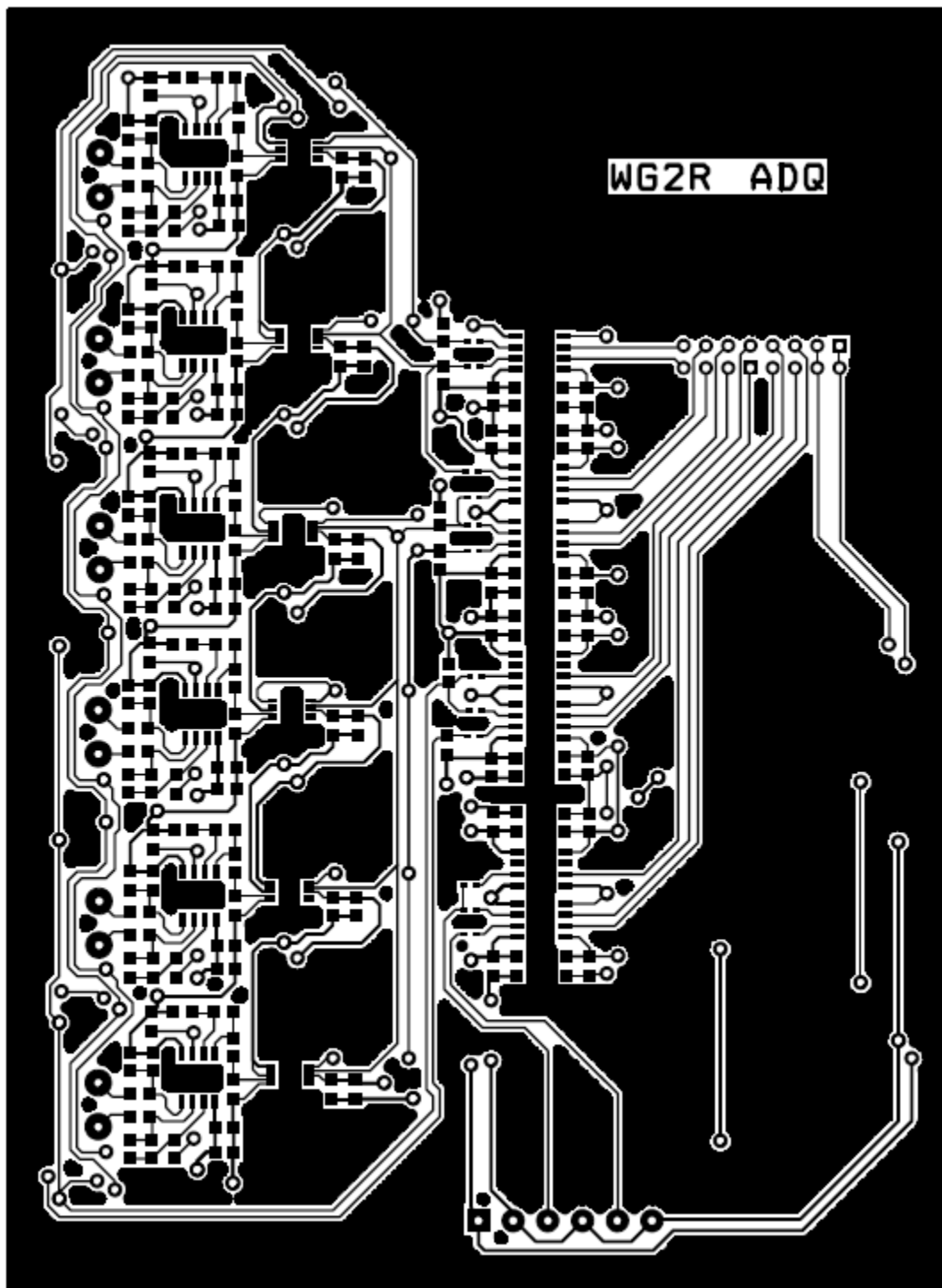
**PCB DE LAS TARJETAS ADQUISICIÓN, DETECTOR CRUCE POR CERO Y ACOPLADOR
MODULO JM60**

FIG. C1 CAPA INFERIOR PCB TARJETA DE ADQUISICIÓN



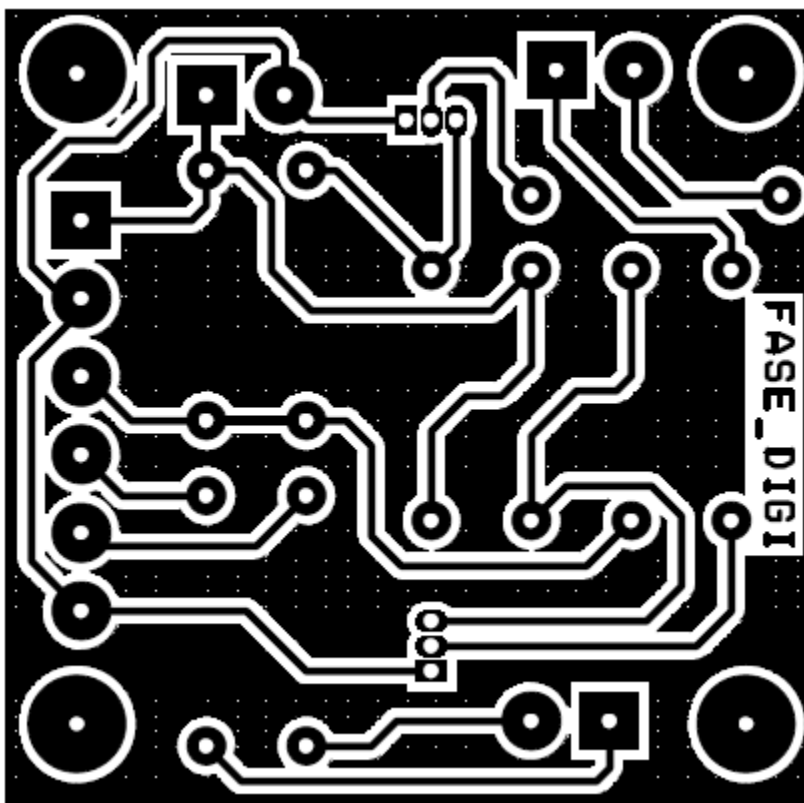
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. C2 CAPA SUPERIOR PCB TARJETA DE ADQUISICIÓN



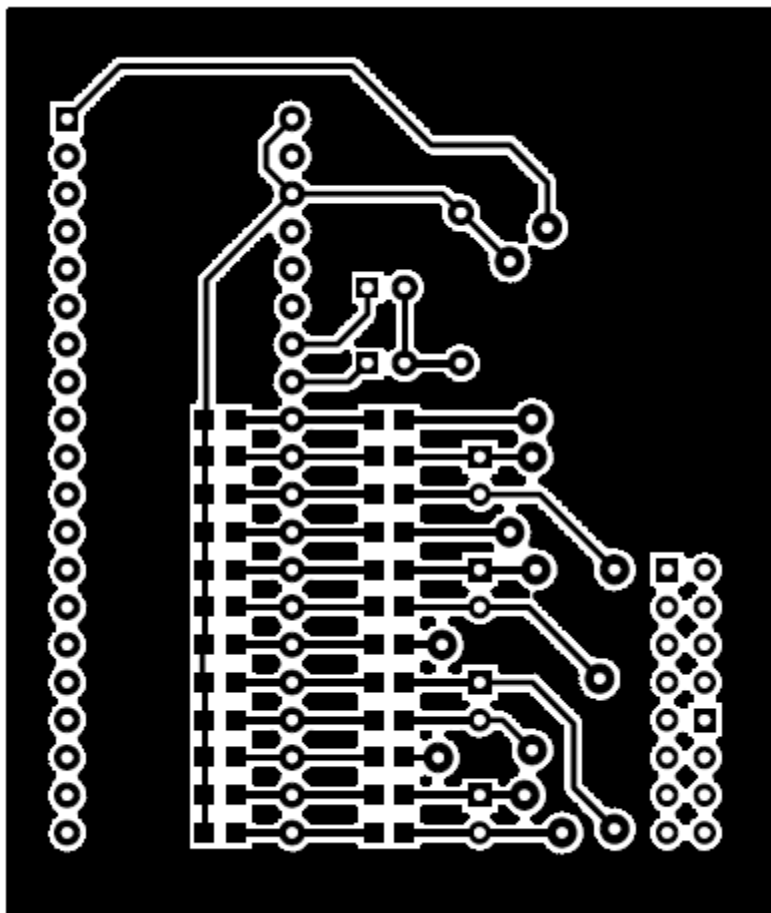
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. C3 PCB TARJETA DE DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO



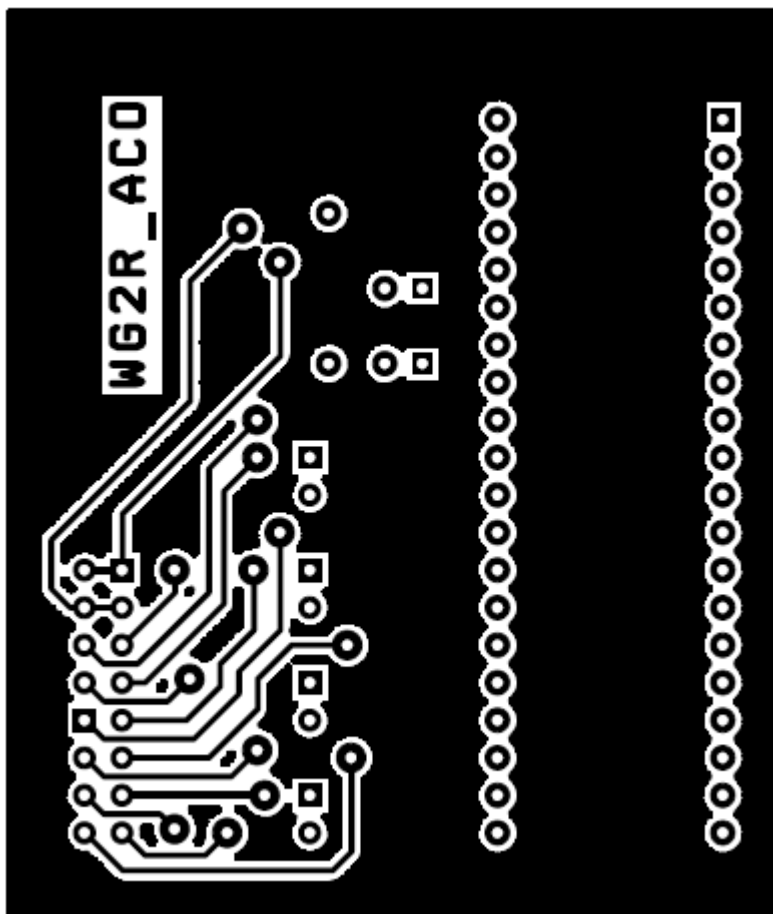
FUENTE: EL AUTOR.

FIG. C4 CAPA INFERIOR PCB TARJETA DE ACOPLADOR MODULO JM60



FUENTE: EL AUTOR.

FIG. C5 CAPA INFERIOR PCB TARJETA DE ACOPLADOR MODULO JM60



FUENTE: EL AUTOR.

ANEXO D

LISTA DE COMANDOS DEL CONTROLADOR INDUSTRIAL E5CK DE OMRON

Fuente: Manual de Usuario, Omron E5CK

SETTING LIST

Mode	Parameter Name	Setting Range	Unit	Default	Remarks	Setting
Protect	<i>SECr</i> Security	0 to 6	None	1		
	<i>PEyP</i> [A/M] key protect	ON/OFF	None	OFF		
Manual	Manual MV	-5.0 to 105.0 *1	%	0.0		
Level 0	Set point	Set point lower limit to Set point upper limit	EU	0		
	<i>r-S</i> Run/Stop	Run/Stop	None	RUN		
Level 1	<i>Rt</i> AT Execute/Cancel	OFF/AT-1/AT-2	None	OFF	During running	
	<i>SP-0</i> Set point 0	Set point lower limit to Set point upper limit	EU	0	Multi-SP	
	<i>SP-1</i> Set point 1	Set point lower limit to Set point upper limit	EU	0	Multi-SP	
	<i>RL-1</i> Alarm value 1	-1999 to 9999	EU	0		
	<i>RL-2</i> Alarm value 2	-1999 to 9999	EU	0		
	<i>RL-3</i> Alarm value 3	-1999 to 9999	EU	0		
	<i>P</i> Proportional band	0.1 to 999.9	%FS	10.0		
	<i>i</i> Integral time	0 to 3999	sec	233		
	<i>d</i> Derivative time	0 to 3999	sec	40		
	<i>C-Sc</i> Cooling coefficient	0.01 to 99.99	None	1.00	At heating and cooling control	
	<i>C-db</i> Dead band	-19.99 to 99.99	%FS	0.00	At heating and cooling control	
	<i>oF-r</i> Manual reset value	0.0 to 100.0	%	50.0		
	<i>HYS</i> Hysteresis (heat)	0.01 to 99.99	%FS	0.10		
	<i>CHYS</i> Hysteresis (cool)	0.01 to 99.99	%FS	0.10	At heating and cooling control	
	<i>CP</i> Control period (heat)	1 to 99	sec	20		
	<i>C-CP</i> Control period (cool)	1 to 99	sec	20	At heating and cooling control	
	Level 2	<i>r-l</i> Remote/Local	RMT/LCL	None	LCL	
<i>SP-rU</i> SP ramp time unit		M(Minutes) / H(Hours)	None	M		
<i>SP-rt</i> SP ramp set value		0 to 9999	EU	0		
<i>LbR</i> LBA detection time		0 to 9999	Sec	0		
<i>au-S</i> MV at stop		-5.0 to 105.0 *1	%	0.0		
<i>au-E</i> MV at PV error		-5.0 to 105.0 *1	%	0.0		
<i>oL-H</i> MV upper limit		MV lower limit + 0.1 to 105.0 *2	%	105.0		
<i>oL-L</i> MV lower limit		-5.0 to MV upper limit - 0.1 *3	%	-5.0		
<i>oL</i> MV change rate limit		0.0 to 100.0	%/sec	0.0		
<i>iNF</i> Input digital filter		0 to 9999	sec	0		
<i>RLH1</i> Alarm 1 hysteresis		0.01 to 99.99	%FS	0.02		
<i>RLH2</i> Alarm 2 hysteresis		0.01 to 99.99	%FS	0.02		
<i>RLH3</i> Alarm 3 hysteresis		0.01 to 99.99	%FS	0.02		
<i>iNSH</i> Input shift upper limit		-199.9 to 999.9	°C/°F	0.0	Temperature input	
<i>iNSL</i> Input shift lower limit		-199.9 to 999.9	°C/°F	0.0	Temperature input	

*1 During heat and cooling control, the lower limit becomes -105.0%.

*2 During heat and cooling control, the setting range becomes 0.0 to 105.0%.

*3 During heat and cooling control, the setting range becomes -105.0 to 0.0%.

Mode	Parameter Name	Setting Range	Unit	Default	Remarks	Setting
Setup	$\overline{L}n-t$ Input type	0 to 21	None	2		
	$\overline{L}n-H$ Scaling upper limit	Scaling lower limit +1 to 9999 *4	EU	-100	Analog input	
	$\overline{L}n-L$ Scaling lower limit	-1999 to SP setting upper limit -0.1*4	EU	0	Analog input	
	dP Decimal point	0 to 3	None	0	Analog input	
	$d-U$ °C/°F selection	°C/°F	None	°C	Temperature input	
	$\overline{L}n-i$ Parameter initialize	Yes/No	None	NO		
	$\overline{O}U1$ Control output 1 assignment	Heat/Cool/Alarm 1/Alarm 2/Alarm 3/LBA	None	HEAT		
	$\overline{O}U2$ Control output 2 assignment	Heat/Cool/Alarm 1/Alarm 2/Alarm 3/LBA	None	AL-1		
	$SUB1$ Auxiliary output 1 assignment	Alarm 1/Alarm 2/Alarm 3/LBA/S.ERR/E333	None	AL 2		
	$AL1$ Alarm 1 type	1 to 11	None	2	Output assignment needed	
	$AL1n$ Alarm 1 open in alarm	N-O/N-C	None	N-O	Output assignment needed	
	$AL2$ Alarm 2 type	1 to 11	None	2	Output assignment needed	
	$AL2n$ Alarm 2 open in alarm	N-O/N-C	None	N-O	Output assignment needed	
	$AL3$ Alarm 3 type	1 to 11	None	2	Output assignment needed	
	$AL3n$ Alarm 3 open in alarm	N-O/N-C	None	N-O	Output assignment needed	
	$\overline{O}REU$ Direct/Reverse operation	OR-D/OR-R	None	OR-R		
	Expansion	$SL-H$ Set point upper limit	Set point lower limit +1 to scaling upper limit *2	None	1300 *4	
$SL-L$ Set point lower limit		Scaling lower limit to Set point upper limit -1 *2	None	-200 *4		
$\overline{E}nt$ PID/ON/OFF		PID / ON/OFF	None	PID		
ST ST		OFF/ON	None	OFF		
$ST-b$ ST stable range		0.1 to 999.9	°C/°F	15.0	ST-ON	
$ALFR$ α		0.00 to 1.00	None	0.65		
$RE-U$ AT calculated gain		0.1 to 10.0	None	1.0		
$rEST$ Standby sequence reset setting method		0/1	None	0		
rEt Automatic return of display mode		0 to 99	Sec	0		
$AL-H$ AT hysteresis		0.1 to 9.9	%FS	0.2		
$LbAb$ LBA detection width	0.0 to 999.9	%FS	0.2			
Option	$\overline{E}u-n$ Multi-SP function	0/1	None	0		
	$\overline{E}u-1$ Event input assignment 1	STOP/MAN	None	STOP		
	Sbc Communication stop bit	1/2	bits	2		
	LEn Communication data length	7/8	bits	7		
	$PrEY$ Communication parity	None/Even/Odd	None	EVEN		
	bPS Communication baud rate	1.2/2.4/4.8/9.6/19.2	kbps	9.6		
	$U-nO$ Communication unit No.	0 to 99	None	0		
	$\overline{E}r-t$ Transfer output type	SP/SP-M/PV/O/C-O	None	SP		
	$\overline{E}r-H$ Transfer output upper limit	*5	*5	*5		
	$\overline{E}r-L$ Transfer output lower limit	*5	*5	*5		

*4 When temperature input is selected, the sensor range selected in the "input type" parameter (setup mode) corresponds to the scaling upper and lower limit value.

*5 Set the transfer output type parameter according to the following table.

Transfer Output Type	Transfer Output Lower Limit to Transfer Output Upper Limit
SP :Set point	Set point lower limit to Set point upper limit
SP-M :Set point during SP ramp	Set point lower limit to Set point upper limit
PV :Process value	Scaling lower limit to scaling upper limit
O :Manipulated variable (heat)	-5.0 to 105.0%
C-O :Manipulated variable (cool)	0.0 to 105.0%

- The output ranges of the SP setting, set point or process value when temperature input is selected are the ranges supported by the selected sensor.
- When the heating side manipulated variable or cooling side manipulated variable is selected, the transfer output lower limit in a heating and cooling control becomes "0.0".