



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN
CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**

**“ANÁLISIS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL
LABORATORIO DE LA EIE-CRI DE LA ESPOCH”**

TESIS DE GRADO

**Previo a la obtención del título de
INGENIERO EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**

**Presentado por:
FRANCISCO JAVIER CARPIO VELASCO
PABLO LUCIANO BARAHONA MATUTE**

Riobamba-Ecuador

2011

A mi madre María Eugenia Velasco, por su amor, comprensión mis valores, principios, perseverancia, empeño y su gran apoyo incondicional a lo largo de mi formación humana y académica ya que sin ella no hubiera podido alcanzar mis objetivos.

A mi hermana Verónica y a mi sobrino Sebastián por haberme demostrado un amor inigualable, convirtiéndose en ejemplo de valentía, capacidad, generosidad, superación, incentivo a seguir adelante en todo momento a pesar de las dificultades y tropiezos a lo largo de mi carrera profesional.

Francisco Javier Carpio Velasco

A mi madre Mariana Matute, por todo el apoyo brindado durante mi vida y carrera estudiantil, gracias por su comprensión, cariño y por ser mi sustento.

A mi hermana Aracely Barahona por ser la mejor hermana y darme ejemplo de lucha y superación, por alegrarme mi vida a pesar de los problemas, siempre estará presente en mi corazón como los mejores recuerdos.

A mi Esposa Erika Bravo, por brindarme su amor y comprensión, gracias por su apoyo para lograr alcanzar mis metas.

A mi hijo Pablito, mi felicidad quiero dedicarle esta meta alcanzada, ya que su llegada, me motivo aún más a seguir adelante por el camino del bien.

Pablo Luciano Barahona Matute

TEXTO DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Francisco Javier Carpio Velasco y Pablo Luciano Barahona Matute somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta tesis; y el patrimonio intelectual de la tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Francisco Javier Carpio Velasco

Pablo Luciano Barahona Matute

ÍNDICE GENERAL

PORTADA

DEDICATORIA

FIRMAS

HOJA DE RESPONSABILIDAD

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1	ANTECEDENTES	11
1.2	JUSTIFICACION DEL PROYECTO DE TESIS	12
1.3.	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivos Generales	12
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	HIPOTESIS	13

CAPÍTULO II

CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE TEMPERATURA

2.1	INTRODUCCION	14
2.1.1	Formas de la Energía Térmica	14
2.2.	MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	16
2.2.1	Selección de los Sensores de Temperatura	16
2.3	OPERACIÓN DEL MÓDULO	17
2.4	DESCRIPCION DEL MODULO DE TEMPERATURA	17
2.4.1	Diseño del Horno Eléctrico.....	19
2.4.1.1	Resistencia Calefactora.....	19
2.4.2	Panel de Encendido.....	20
2.4.2.1	Luces Indicadoras Piloto.....	21
2.4.2.2	Pulsador de Parada de Emergencia	21
2.4.3	Circuito Electroneumatico de Enfriamiento	22
2.4.3.1	Cilindros Neumáticos	23

2.4.3.2	Eelectroválvulas	26
2.4.3.2.1	Válvulas Distribuidas.....	26
2.4.3.2.1.1	Elementos y Funcionamiento.....	26
2.5	Sistemas de Adquisición de Datos.....	29
2.5.1	Tarjeta de Adquisición de Datos NI myDAQ.....	30
2.5.1.1	Entradas y Elementos de la NI my DAQ.....	32
2.5.1.1.1	Entrada Analógicas (AI)	32
2.5.1.1.2	Salidas Analógicas	32
2.5.1.1.3	Entrada/Salida Digital.....	32
2.5.1.1.4	Fuentes de Alimentación	32

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL

3.1	INTRODUCCION	33
3.2	SISTEMAS LINEALES DE PRIMER ORDEN	35
3.2.1	Ganancia en Estado Estacionario K	36
3.2.2	Efecto de la Constante de Tiempo sobre la Respuesta del Sistema	37
3.2.3	Sistemas de Primer Orden con Retardos.....	38
3.3	IDENTIFICACION DE LA PLANTA	39
3.4	DISEÑO DEL CONTROLADOR	41

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO

4.1	INTRODUCCION	43
4.2	INTERFACES DESARROLLADAS EN LABVIEW® 8.10.....	45
4.2.1	Panel frontal de la pantalla principal	45
4.2.2	Diagrama de bloques del acondicionamiento	46
4.2.3	Panel frontal del generador PWM y el controlador	47

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE POTENCIA, ACTIVACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO

5.1	CIRCUITO DE POTENCIA Y ACTIVACIÓN	49
-----	---	----

5.1.1	Control por Ciclos Enteros	50
5.1.2	Elementos Principales del Circuito de Potencia	51
5.1.2.1	Triac	51
5.1.2.2	Optoacoplador Moc 3010	52
5.1.2.2.1	Funcionamiento	53
5.1.3	Funcionamiento del Circuito de Potencia.....	53
5.1.4	Activación de las Electroválvulas para el Sistema de Enfriamiento	54
5.2	MEDICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA	55
5.2.1	Medición de las Termocuplas	56
5.2.1.1	Ventajas de las Termocuplas	58
5.2.1.2	Tipos de Termocuplas.....	59
5.2.1.2.1	Termocupla Tipo K.....	60
5.2.1.3	Curva Característica de las termocuplas	61
5.2.1.4	Compensaciones de las termocuplas.....	62
5.2.1.4.1	Compensación de Cero	62
5.2.1.4.2	Cables Compensados	64
5.2.1.5	Linealización de las Termocuplas.....	65
5.2.2	Sensores Pt-100.....	66
5.2.2.1	Aplicaciones de los Detectores de Temperatura Resistivos . ¡Error! Marcador no definido.	
5.2.2.2	Características de los Rtd.....	67
5.2.2.3	Puente de Medida o de Wheatstone para Acondicionamiento de Pt-100	69
5.2.2.4	Cálculos de la Etapa Acondicionadora	71
5.3	Pruebas y Resultados	76

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

RESUMEN

SUMMARY

GLOSARIO

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

INDICE DE FIGURAS

Figura II.1: Módulo de temperatura	18
Figura II.2: Resistencia calefactora	20
Figura II.3: Panel de encendido	21
Figura II.4: Luz piloto a 120 Voltios	21
Figura II.5: Pulsador de emergencia	22
Figura II.6: Circuito de enfriamiento	23
Figura II.7: Cilindro de doble efecto NORGREN	24
Figura II.8: Esquema de la válvula distribuída 5/2	27
Figura II.9: Esquema de la válvula de paso	27
Figura II.10: Válvulas del módulo de temperatura	28
Figura II.11: Ducha de aire	28
Figura II.12: NI myDAQ National Instruments	31
Figura II.13: Composición interna de La NI my DAQ	31
Figura III.14: Sistema de control en lazo cerrado	34
Figura III.15: Respuesta del sistema con ganancia K	37
Figura III.16: Constante de tiempo en la respuesta del sistema	37
Figura III.17: Retardo de un sistema de primer orden	38
Figura III.18: Respuesta ofrecida por la planta para un escalón de amplitud 0.7	39
Figura III.19: Respuesta ofrecida por la dinámica de la planta	40
Figura III.20: Lazo cerrado planta PID	42
Figura III.21: Respuesta al escalón unitario de la planta con el PID	42
Figura IV.22: Pantalla Principal	45
Figura IV.23: Acondicionamiento y amplificación de la señal de entrada	47
Figura IV.24: Diagrama de bloques del PWM	48
Figura V.25: Esquemático del circuito de potencia	50
Figura V.26: Control por cruce cero	50
Figura V.27: Voltaje en la carga vs ángulo de conducción del triac	52
Figura V.28: Esquemático del MOC 3010	52
Figura V.29: Esquemático de activación de las electroválvulas	54
Figura V.30: Voltaje formado por la unión de dos metales	56
Figura V.31: Unión hierro constantán	57

Figura V.32: Termocupla industrial tipo K	61
Figura V.33: Curva de calibración a la unión de 0 grados	61
Figura V.34: Variación del coeficiente Seebeck con la temperatura	62
Figura V.35: Empalme de la termocupla con un conductor de cobre	63
Figura V.36: Cable compensado para la extender la termocupla	64
Figura V.37: Linealidad de las termocuplas	65
Figura V.38: Detectores de temperatura resistivos	66
Figura V.39: Curva de calibración de los RTD	68
Figura V.40: Esquemático del puente de Wheatstone	70
Figura V.41: Diferencial $V_a - V_b$ del puente de Wheatstone	74
Figura V.42: Voltaje total a 100 grados C.	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla III.I. Amplitudes para la ganancia K	40
Tabla III.II. Parámetros del controlador	41
Tabla V.III. Composición química de las termocuplas	59
Tabla V.IV. Comparación entre los sensores de temperatura	77
Tabla V.V. Activación del sistema de temperatura	77

CAPÍTULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1 ANTECEDENTES

La gran mayoría de los procesos industriales requieren controles cada vez más óptimos que permitan tener un dominio sobre todas las variables físicas que estos manejan, entre una de ellas está la temperatura.

La temperatura es una variable preponderante en gran número de procesos industriales; su control debe ser preciso y estable.

El control de temperatura en hornos es uno de las aplicaciones más comunes para controlar procesos de: secado de madera, granos, fundición de acero, cocción de materiales; etc.

Todos los procesos citados tienen en común la medida de la temperatura y difieren en aspectos tecnológicos de su control, de forma especial según sea la forma energética utilizada.

Muchos controles de temperatura se los realiza a través de herramientas virtuales que facilitan el desarrollo de innumerables procesos industriales los cuales al ser monitoreados en tiempo real permiten corregir de manera óptima diversos parámetros del sistema de control y así estabilizarlo de forma oportuna.

El laboratorio de Electrónica de la EIE-CRI en la ESPOCH no cuenta con un módulo educativo de temperatura capaz de ser controlado ni monitoreado para distintos procesos industriales evidenciándose un vacío en la parte experimental para el control de procesos.

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TESIS

La elaboración del módulo de temperatura tiene como finalidad dotar de un módulo didáctico al laboratorio de Control de la ESPOCH, donde los estudiantes puedan apreciar el uso de diferentes tipos de sensores de temperatura como Rtd y termocuplas; así mismo permite la utilización de cilindros neumáticos, electroválvulas, y filtros neumáticos, como también la monitorización, control e ingreso y salida de señales mediante una HMI en LabVIEW® a través de una tarjeta de adquisición de datos.

La construcción del módulo de temperatura cubre las necesidades de aprendizaje de los estudiantes de electrónica en control, permitiendo este módulo reflejar una visión clara y concisa de como se realiza un proceso de control de temperatura a nivel industrial, fortaleciendo así los conocimientos adquiridos mediante prácticas experimentales, siendo muy ilustrativo al momento de impartir clases de instrumentación y sensores , control de procesos industriales y demás materias relacionadas a la área de control a través de un manual de practicas de laboratorio, en el cual se podrán implementar y comprobar los distintos algoritmos de control .

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Generales.

- Analizar, Diseñar y Construir un Sistema de Control de Temperatura para el laboratorio de la EIE-CRI de la ESPOCH

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Construir un panel operador que permitirá ubicar los diferentes elementos del modulo de temperatura.
- Construir un horno de tol y fibra de vidrio para almacenar la temperatura.
- Diseñar un algoritmo para controlar la temperatura.
- Implementar un sistema Electroneumático que será acoplado al horno para forzar su enfriamiento.
- Diseñar e Implementar circuitos de potencia mediante triac's para controlar la activación de la resistencia eléctrica así como de las electroválvulas.
- Construir una tarjeta electrónica para realizar el acondicionamiento de la señal de los sensores Pt100 y Termocupla.
- Diseñar una interfaz en LabVIEW® para monitorear y controlar el módulo de temperatura mediante una tarjeta de adquisición de datos NI My DaQ.
- Realizar un manual de prácticas de laboratorio para explicar las distintas aplicaciones que se pueden hacer con el módulo de temperatura.

1.4. HIPOTESIS.

Con la construcción del modulo educativo de temperatura para el laboratorio de Control de la EIE-CRI de la ESPOCH se desea que el nivel técnico adquirido por los estudiantes en el transcurso de su carrera se encuentre fortalecidos bajo sólidos conocimientos teóricos prácticos dentro del área de control industrial.

CAPÍTULO II

CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE TEMPERATURA

2.1 INTRODUCCIÓN

La física térmica es la disciplina que estudia la temperatura, la transferencia y transformación de la energía.

La temperatura es difícil de definir, ya que no es una variable tan tangible como lo es la presión, dado que en su caso, no podemos referirla a otras variables.

El calor es la transferencia de energía térmica de un lugar a otro.

2.1.1 Formas de transmisión de la Energía Térmica

La energía térmica se transmite de 3 formas distintas:

- Conducción.
- Convección
- Radiación.

Conducción. Es la manera más común en los cuerpos sólidos, ésta es la transferencia de energía cinética entre las partículas del cuerpo cuando ellas chocan, transfiriendo energía cinética, las moléculas con mayor temperatura a las moléculas con menos

Convección. El movimiento de los fluidos (líquidos o gases) provocados por la diferencia de temperaturas y de densidades transfiere calor por convección.

Las corrientes de convección de la atmósfera son las responsables del estado atmosférico de nuestro planeta.

Radiación. Es el proceso por el cual el calor se transfiere mediante ondas electromagnéticas.

El calor radiante se puede reflejar o refractar, es decir, parte de él se absorbe y otra parte se refleja, por lo cuál los cuerpos de color oscuro absorben más rápido el calor que los objetos de color claro.

Un ejemplo común de esta transferencia de energía térmica es la energía solar.

El presente módulo debe tener la capacidad de controlar la temperatura dentro de ciertos valores.

Considerando que se trata de un módulo didáctico el límite inferior será el de la temperatura ambiente, mientras la temperatura se incrementa mediante el control de una resistencia calefactora hasta llegar al límite máximo que será de 100°C que es la temperatura con la que generalmente trabajan módulos comerciales.

2.2. MEDICIÓN DE TEMPERATURA.

Para realizar la medición de la temperatura dentro de los rangos establecidos se pueden utilizar diferentes tipos de elementos. Sin embargo, considerando que se quiere electrónicamente controlar el módulo se necesita que cumpla con algunas características:

- Tener como salida una señal eléctrica.
- Cubrir el intervalo de temperatura acorde a la aplicación.

A continuación se presenta una lista de instrumentos de medición de temperatura:

- Termómetro de vidrio
- Termómetro bimetalico
- Termómetro de bulbo y capilar
- Termopar
- Detector de temperatura resistivo
- Pirómetro de radiación

2.2.1. Selección de los sensores de temperatura.

Considerando que algunos de estos sensores tales como el termómetro de vidrio termómetro bimetalico y termómetro de bulbo y capilar, no entregan una señal eléctrica no sirve para la presente aplicación y por lo tanto no se analiza los mismos.

De la misma manera los pirómetros de radiación que son utilizados para medir elevadas temperaturas, no sirven para la presente aplicación y por lo tanto se descarta su análisis.

Los dispositivos elegidos para el control del sistema de temperatura del horno eléctrico serán la termocupla y el sensor termoresistivo ya que presentan un rango de medición adecuado y rangos de linealidad aceptable.

2.3. OPERACIÓN DEL MÓDULO

El módulo de control de temperatura tiene como objetivo fundamental el dotar al laboratorio de Control de un equipo nuevo con el cual los estudiantes puedan capacitarse mediante la realización de prácticas de laboratorio.

El horno básicamente consta de un calefactor eléctrico de 500 watts de potencia, además consta de un panel de monitoreo donde se puede controlar el encendido del sistema, las fuentes de alimentación y el encendido de las luces piloto, las cuales indicaran el estado encendido o apagado de las electroválvulas encargadas de suministrar la suficiente ventilación al sistema de enfriamiento acoplado en la parte posterior del horno través del cilindro de doble efecto y la ducha de aire, el cual disipara todo el calor almacenado en el interior del horno.

Para detectar la temperatura almacenada en el interior del horno se utilizó los sensores Pt-100 y Termocupla tipo K debido a su amplio rango de medida y linealidad aceptable. Para el acondicionamiento del sensor Pt-100 se utilizo un puente de Wheatstone, esta conexión consiste en que en el proceso de medición, la resistencia propia de línea se compensa automáticamente con la resistencia de línea de la otra rama, y para el acondicionamiento de la termocupla se utilizo únicamente la amplificación del voltaje de sus ramales.

Para el control del modulo de temperatura se utilizo una interfaz realizada en Labview a través de una tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ la cual a través de sus puertos análogos recibe las señales provenientes de los sensores de temperatura, estas señales adquiridas por el programa de control de LabVIEW®, son procesadas y amplificadas a un nivel de adecuado , para posteriormente ser utilizadas por el controlador PID, el cual generará una señal de salida controlada hacia los puertos digitales de la tarjeta de adquisición de datos y así poder manipular la potencia entregada al calefactor del horno y los pulsos eléctricos necesarios para la activación del sistema de enfriamiento forzado

2.4 DESCRIPCION DEL MÓDULO DE TEMPERATURA

El Módulo de control de temperatura está constituido tanto por el horno eléctrico, el sistema de enfriamiento forzado así como también por el panel de encendido mostrados en la figura II.1

1. Horno de tol y fibra de vidrio
2. Resistencia calefactora
3. Electroválvulas
4. Cilindro de doble efecto
5. Ducha de aire neumática
6. Sensores de temperatura
7. Luz indicadora de la puerta del horno
8. Luces indicadoras del sistema de enfriamiento.
9. Pulsante de parada de emergencia.
10. Jack`s para conectores banana.
11. Pulsador indicador del estado de la compuerta del horno.



Figura II.1 Módulo de temperatura

2.4.1. Diseño del Horno Eléctrico

El horno eléctrico básicamente está construido de tol con un revestimiento interno de fibra de vidrio para evitar que el calor se transfiera hacia el exterior.

En el interior del horno se encuentra una resistencia calefactora, así como los sensores de temperatura, en la parte superior interna del horno se encuentran acoplados el cilindro de doble efecto y los conductos para la ducha neumática que sirven tanto para el ingreso como de salida del aire.

Las dimensiones del horno son:

Largo: 70cm

Ancho: 42cm

Profundidad: 30cm

2.4.1.1 Resistencia Calefactora.

La resistencia calefactora cumple el papel de aumentar la temperatura en el interior del horno eléctrico.

Mediante pruebas realizadas con varias resistencias calefactores de diferentes potencias, y buscando acelerar el proceso de calentamiento, se eligió una resistencia calefactora con las principales características que se listan a continuación:

Voltaje de alimentación:	120 V
Corriente máxima de consumo:	4 A con 5% de tolerancia.
Potencia máxima:	500 W
Calibre del conductor:	Nº 16
Longitud de la resistencia:	26cm
Temperatura máxima:	250 ° C.

A continuación, en la Figura II.2 se muestra la resistencia calefactora utilizada en el interior del horno.



Figura II.2 Resistencia calefactora

2.4.2. Panel de Encendido

El panel de encendido esta conformado por los siguientes elementos mostrados en la figura II.3.

Las dimensiones del panel de encendido son:

Largo: 46cm

Ancho: 42cm



Figura II.3 Panel de encendido

2.4.2.1 Luces Indicadoras Piloto

Las luces piloto mostradas en la figura II.4 son usadas como indicadores visuales que indican si las electroválvulas del sistema de enfriamiento han sido activadas.



Figura II.4 Luz piloto a 120 Voltios

2.4.2.2 Pulsador de parada de emergencia.

Los dispositivos de mando son de gran importancia para la comunicación persona - máquina en el área de aplicaciones industriales. Por ejemplo, se hallan montados en pletinas de conmutación, paneles de control, paneles de control por ambas manos, en la

manufactura de ascensores, y en las plantas de manejo de materiales, incluidas cintas transportadoras.

El accionamiento manual de los dispositivos empieza operando secuencias y procesos funcionales.

La figura II.5 muestra el pulsador de parada de emergencia utilizado en el panel de encendido.



Figura II.5 Pulsador de emergencia

2.4.3 Circuito Electroneumático de Enfriamiento.

El sistema de enfriamiento se encarga básicamente de suministrar ventilación en el interior del horno para poder mantener el nivel de temperatura deseada.

En el momento en que las electroválvulas se activan, se suministra aire al interior del horno y se consigue disipar todo el calor innecesario que se almacena.

Para el sistema electroneumático de enfriamiento se ha utilizado un sistema compuesto de los siguientes elementos:

- Cilindro compacto de doble efecto.
- Válvula de 5/2 a 24 Voltios.
- Válvula de 2/2 a 24 Voltios.
- Regulador de presión con manómetro.
- Ducha de aire neumática.

En la figura II.6 se muestra el circuito electroneumático realizado para el sistema de enfriamiento.

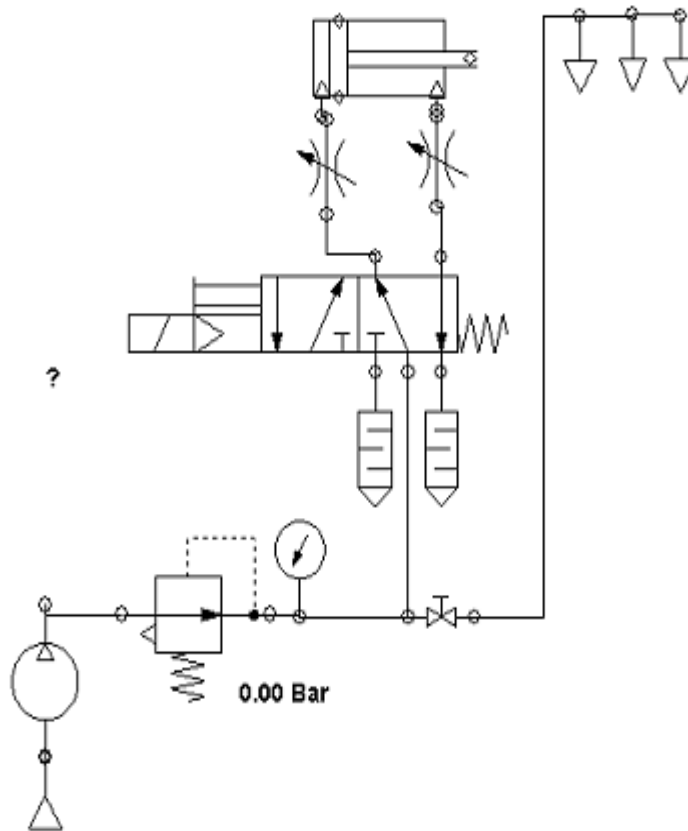


Figura II.6 Circuito de enfriamiento

2.4.3.1 Cilindros Neumáticos.

Estos actuadores neumáticos convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico generando un movimiento lineal, consisten en un cilindro cerrado con un pistón en su interior que se desliza y que transmite su movimiento al exterior mediante un vástago.

Los cilindros neumáticos independientemente de su forma constructiva, representan los actuadores más comunes que se utilizan en los circuitos neumáticos.

Para el modulo de control de temperatura se decidió utilizar un cilindro de doble efecto marca NORGREN el cual se muestra en la figura II.7.



Figura II.7 Cilindro de doble efecto NORGREN

Cilindros de doble efecto. Son aquellos que realizan tanto su carrera de avance como la de retroceso por acción del aire comprimido.

Su denominación se debe a que emplean las dos caras del émbolo, aire en ambas cámaras, por lo que estos componentes sí que pueden realizar trabajo en ambos sentidos.

Entre las principales ventajas que presenta el cilindro utilizado en el modulo de control de temperatura tenemos:

- Se tiene la posibilidad de realizar trabajo en ambos sentidos es decir carreras de avance y retroceso.
- No se pierde fuerza en el accionamiento debido a la inexistencia de muelle en oposición.
- Para una misma longitud de cilindro, la carrera en doble efecto es mayor que en disposición de simple, al no existir volumen de alojamiento

Consumo de aire

El consumo del aire del cilindro es una función de la relación de compresión, del área del pistón y de la carrera, según la ecuación II.1.

$$\text{Consumo de aire} = \text{Relación de compresión} \times \text{área del pistón} \times \text{carrera} \times \frac{\text{Ciclos}}{\text{minuto}}$$

Ecuación II.1

La relación de compresión referida al nivel del mar esta dada por ecuación 2.2

Ecuación II.2

El volumen de aire requerido para una carrera del pistón es:

Ecuación II.3

Sustituyendo los datos para el cilindro utilizado en el modulo de control de temperatura tenemos:

Diámetro= 35mm

Carrera del vástago = 45mm

Presión del aire = 60 Psi

$$V = 0.043 \text{ dm}^3$$

El consumo del aire en condiciones normales de presión y temperatura para nuestro cilindro de doble efecto y despreciando el volumen del vástago es el siguiente:

Ecuación II.4

$$Q = \text{consumo total del aire} \left(\frac{\text{dm}^3}{\text{min}} \right)$$

D = Diametro del cilindro (mm)

l = Carrera(mm)

$$Q = 4.50 \text{ dm}^3 / \text{min}$$

2.4.3.2 Electroválvulas.

Una electroválvula es una válvula electromecánica, diseñada para dirigir el aire comprimido hacia varias vías en el arranque, parada y el cambio del sentido del movimiento del pistón dentro del cilindro, la válvula está controlada por una corriente eléctrica a través de una bobina selenoidal.

Los sistemas más utilizados son las válvulas distribuidas, las válvulas reguladoras de flujo, y las válvulas reguladoras de presión.

2.4.3.2.1 Válvulas Distribuidas

Las válvulas distribuidas dirigen el aire comprimido hacia varias vías en el arranque, la parada y el cambio del sentido del pistón dentro del cilindro.

2.4.3.2.1.1 Elementos y Funcionamiento

Una electroválvula tiene dos partes fundamentales: el solenoide y la válvula. El solenoide convierte energía eléctrica en energía mecánica para actuar la válvula, existen varios tipos de electroválvulas.

En algunas electroválvulas el solenoide actúa directamente sobre la válvula proporcionando toda la energía necesaria para su movimiento.

Es común que la válvula se mantenga cerrada por la acción de un muelle y que el solenoide la abra venciendo la fuerza del muelle.

Esto quiere decir que el solenoide debe estar activado y consumiendo energía mientras la válvula deba estar abierta.

Las electroválvulas pueden ser cerradas en reposo o normalmente cerradas lo cual quiere decir que cuando falla la alimentación eléctrica quedan cerradas o bien pueden ser del tipo abiertas en reposo o normalmente abiertas que quedan abiertas cuando no hay alimentación.

Las válvulas utilizadas en el módulo de control de temperatura presentan las siguientes especificaciones:

Marca: Norgren Chanto

Presión máxima: 0.75 MPa

Voltaje de alimentación: 24VDC

Válvula distribuida de 5/2: Encargada de suministrar aire en dos direcciones para el accionamiento del pistón, la figura II.8 muestra un esquema de la válvula utilizada.

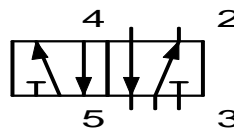


Figura II.8. Esquema de la válvula distribuida 5/2.

Válvula de paso: encargada de suministrar el aire en una sola dirección y es utilizada por la ducha de aire neumática, la figura II.9 muestra un esquema de la válvula utilizada.

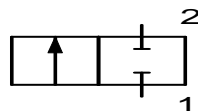


Figura II.9. Esquema de la válvula de paso.

La figura II.10 muestra las válvulas electroneumáticas utilizadas en el módulo de temperatura.



Figura II.10. Válvulas del módulo de temperatura

Ducha de aire: Encargada de suministrar aire en el interior del horno para forzar un enfriamiento, esta compuesta de un set de conductos neumáticos como los mostrados en la figura II.11.



Figura II.11. Ducha de aire

2.5 Sistemas de Adquisición de Datos.

Antes de que un sistema de medición basado en computador pueda medir una señal física, como la temperatura, un sensor o transductor debe convertir la señal física en una eléctrica, sea esta de voltaje o de corriente.

Un dispositivo DAQ puede considerarse como un sistema de medición completo, aunque es sólo un componente del mismo.

LabVIEW® incluye un grupo de VIs que permiten configurar, adquirir datos y enviarlos a los dispositivos DAQ.

Frecuentemente un dispositivo puede ejecutar una variedad de funciones (conversión análogo a digital –A/D-, conversión digital a análogo – D/A-, E/S digital y operaciones de contador /temporizador), cada dispositivo soporta diferentes DAQ y velocidades de generación de señal.

.

No siempre puede conectarse señales directamente a un dispositivo DAQ. En estos casos se debe utilizar accesorios acondicionadores de señal para tratar las señales antes de que el dispositivo DAQ las convierta en información digital.

El software controla el sistema DAQ adquiriendo los datos puros, analizando y presentando los resultados.

Hay diversas opciones para un sistema DAQ:

- El dispositivo DAQ reside en el computador. Puede conectar el dispositivo en la ranura PCI de un computador de escritorio o en la ranura PCMCIA de un computador portátil para un sistema de medición DAQ portátil.
- El dispositivo DAQ es externo y se conecta al computador a través de un puerto existente, como el puerto serial, usb o el puerto Ethernet, lo que significa que se pueden ubicar fácilmente los nodos de medida cerca de los sensores.

El computador recibe los datos puros directamente en el dispositivo DAQ. La aplicación creada en LabVIEW® presenta y manipula los datos en una forma que el usuario pueda entender. El software también controla el sistema DAQ ordenando al dispositivo cuando y desde cuáles canales adquirir datos.

Típicamente el software DAQ incluye controladores y programas de aplicación. Los controladores son únicos para el dispositivo o tipo de dispositivo e incluyen un grupo de comandos que el dispositivo acepta.

Los programas de aplicación como LabVIEW®, envían los comandos de los controladores, como adquirir datos y retornar una lectura de termocupla.

Los programas de aplicación también presentan y analizan los datos adquiridos.

Los dispositivos de medición de NI incluyen el programa controlador NI – DAQ, una colección de Vis que se utilizan para configurar, adquirir datos y enviarlos hacia los dispositivos de medición o de control .

2.5.1. Tarjeta de Adquisición de Datos NI myDAQ.

NI myDAQ es un dispositivo de adquisición de datos cuyo software esta basado en LabVIEW®, permitiendo a los estudiantes manejar señales del mundo real.

NI myDAQ es ideal para la medición de sensores, combinado con NI LabVIEW sobre una computadora, los estudiantes pueden analizar y procesar señales adquiridas y realizar procesos de controles simples y complejos.

La tarjeta NI myDAQ es una tarjeta de adquisición de datos multifuncional para Windows 2000/XP/Vista, MAC OS X, LINUX; posee alto rendimiento y alta velocidad de muestreo.

Las especificaciones de la tarjeta y el soporte de proveedores externos hacen ideal su uso para un amplio rango de aplicaciones en nuestro caso el de la adquisición de datos, para la industria, laboratorios, control de procesos y automatización de sistemas en las fábricas.

En la figura II.12 se muestra una vista frontal de la tarjeta NI myDAQ.



Figura II.12. NI myDAQ National Instruments

La figura II.13 muestra la disposición y la función de los subsistemas de NI myDAQ.

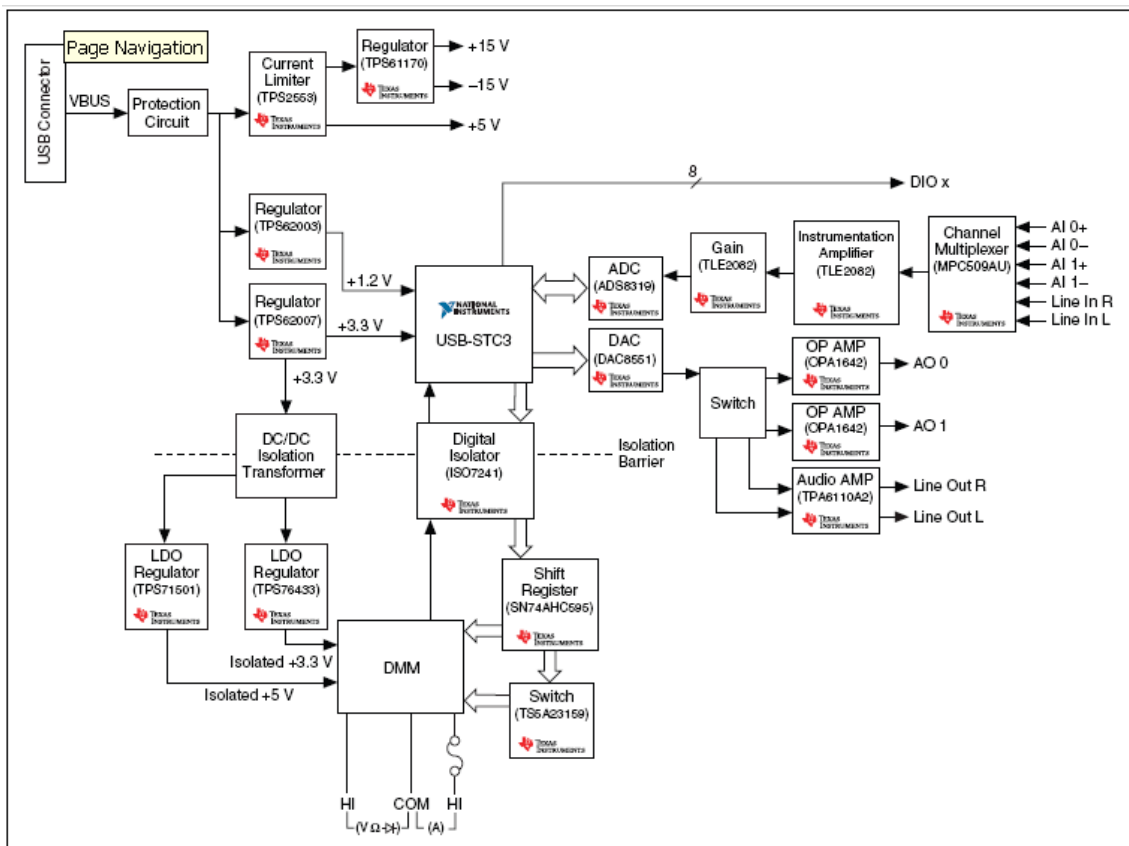


Figura II.13 Composición interna de La NI my DAQ

2.5.1.1 Entradas y elementos de la NI my DAQ

NI myDAQ provee entradas analógicas (AI), salidas analógicas (AO), entradas y salidas digitales (DIO), fuentes de voltaje, y las funciones de un milímetro digital (DMM) en un dispositivo compacto USB.

2.5.1.1.1 Entrada analógicas (AI).

Hay dos canales de entrada analógica en la NI myDAQ, estos canales pueden ser configurados como de tensión diferencial o de entrada de audio. Las entradas analógicas son multiplexados, es decir, un solo convertidor analógico a digital (ADC) se utiliza para probar los dos canales, en modo de uso general, puede llegar a medir señales hasta ± 10 V a 16 bits.

Las entradas analógicas se pueden medir hasta 200 kS / s por canal, por lo que son útiles para la adquisición de diferentes formas de onda.

2.5.1.1.2 La salida analógica (AO).

Hay dos canales de salidas analógicas en la NI myDAQ, estos canales pueden configurarse como salida de tensión o de salida de audio.

Ambos canales tienen un convertidor digital a analógico (DAC), por lo que puede actualizar de forma simultánea.

Con la salida analógica se puede generar una señal e hasta ± 10 Voltios.

2.5.1.1.3 Entrada / salida digital (DIO)

Hay ocho líneas para entrada y salidas digitales (DIO), cada línea puede ser configura y programada para funcionar como salida o entrada digital, las cuales además pueden trabajar como un contador o temporizador.

Las líneas digitales presentan un nivel de 3.3 V LVTTTL y son tolerantes a entradas de 5V, además las salidas digitales no son compatibles con los niveles lógicos CMOS.

2.5.1.1.4 Fuentes de alimentación

Hay tres fuentes de alimentación disponibles en la NI myDAQ, donde dos fuentes de +15 y -15 V pueden ser usados para alimentar componentes analógicos de potencia, tales como amplificadores operacionales y reguladores lineales, además presenta una fuente de 5 V que puede ser utilizada para alimentar dispositivos digitales

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL

3.1 INTRODUCCIÓN

Dado que la mayoría de las técnicas de control parten de un modelo matemático de la planta y que este modelo en raras ocasiones está disponible, es imprescindible realizar la identificación de la planta, para posteriormente aplicar alguna de las técnicas de control existentes.

En esta tesis se propone el diseño de un controlador para un sistema térmico, en el que como primer paso se realiza la identificación del mismo para obtener un modelo matemático aproximado.

Posteriormente se procede al diseño del controlador aplicando una variedad de técnicas y comparando su comportamiento, entre las técnicas aplicadas están: reglas de Ziegler-Nichols.

Una fase importante en el diseño es la identificación que tiene como objetivo obtener un modelo matemático que reproduzca con suficiente exactitud el comportamiento del proceso.

De la exactitud del modelo obtenido dependerá posteriormente el buen comportamiento del controlador diseñado.

La arquitectura del sistema es la típica de un servo sistema de una entrada y una salida, con el controlador en cascada con la planta (Figura III.14).

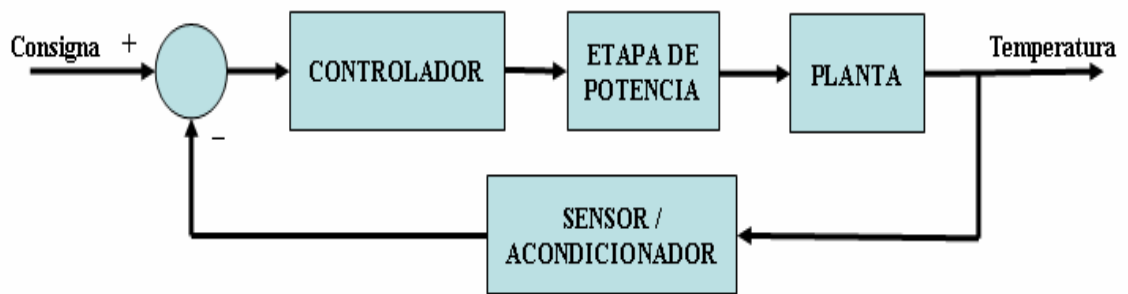


Figura III.14: Sistema de control en lazo cerrado

La planta a controlar está constituida por un sistema térmico y como tal posee una dinámica lenta, siendo esto una ventaja a la hora de realizar prácticas introductorias al control, puesto que el alumno puede ir viendo la evolución del comportamiento del regulador.

Existen dos métodos básicos de identificación:

- Identificación analítica (modelado).
- Identificación experimental (identificación clásica).

Para el modelado se requiere un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso, mientras que para la identificación clásica, que es el método más directo, se requiere aplicar al proceso señales especiales como escalones, rampas, impulsos, sinusoides o señales pseudo aleatorias.

Para el tipo de planta que se ha de controlar es suficiente una identificación clásica, utilizando el escalón como señal de prueba.

La función escalón es la señal que más se ha aplicado en la práctica convencional del control automático, obteniéndose con ella modelos sencillos suficientemente exactos.

La respuesta de un proceso tecnológico a la señal escalón puede aproximarse mediante:

- Un modelo de primer orden con o sin retardo,
- Un modelo de segundo orden aperiódico con o sin retardo,
- Un modelo de segundo orden subamortiguado con o sin retardo.

La elección de uno de los modelos anteriores depende de la forma de la respuesta transitoria y del grado de precisión que se desee en el ajuste.

El modelo de primer orden se puede utilizar en procesos simples o en otros más complejos si no se requiere mucha exactitud.

Para la planta térmica propuesta, éste será el modelo elegido, puesto que como se sabe los sistemas térmicos tienden a ofrecer una respuesta monótona creciente sin oscilaciones

3.2. SISTEMAS LINEALES DE PRIMER ORDEN

La respuesta dinámica de muchos sistemas se puede representar mediante la siguiente ecuación diferencial lineal de primer orden:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = bu(t)$$

Ecuación III.1

O de manera equivalente,

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Ku(t)$$

Ecuación III.2

Donde:

$$\tau = \frac{a_1}{a_0}$$

$$K = \frac{b}{a_1}$$

La ecuación se puede escribir en términos del dominio de Laplace:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Ecuación III.3

Donde:

K: es la ganancia del proceso,

τ : es la constante de tiempo.

3.2.1. Ganancia en Estado Estacionario K:

Expresa el cambio último en la variable de salida o respuesta del sistema para un determinado cambio paso en la variable de entrada.

De la función de transferencia de primer orden:

$$G(s) = \frac{K}{s + 1}$$

Ecuación III.4

En la figura III.15 se muestra la respuesta del sistema como función de la ganancia del sistema a lazo abierto K .

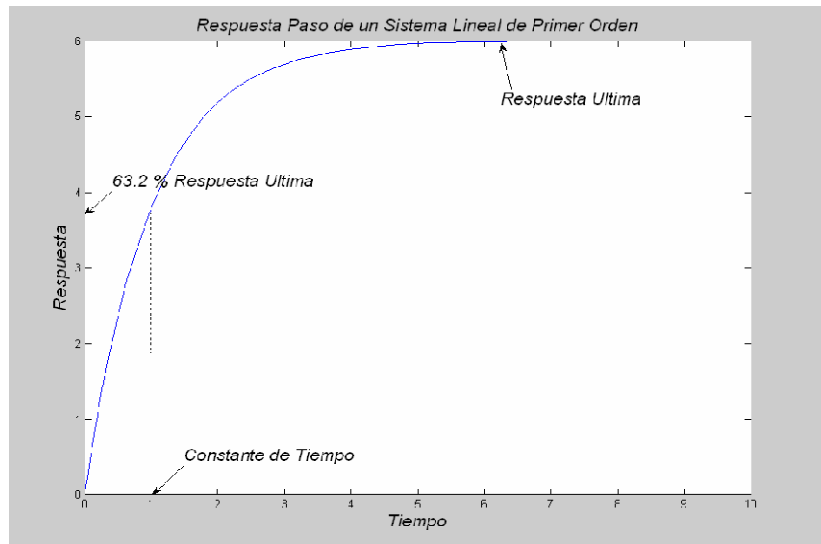


Figura III.15. Respuesta del sistema con ganancia K

3.2.2 Efecto de la Constante de Tiempo sobre la Respuesta del Sistema

Esta constante expresa el tiempo definido por la relación entre la capacidad que tiene el sistema de transportar a una entidad con respecto a la rapidez de cambio o capacitancia de dicha entidad en la respuesta del sistema, es decir que:

$$\tau = \frac{\text{Capacida}}{\text{Capacitancia}}$$

Si la constante de tiempo a lazo abierto se modifica se obtendría una respuesta del sistema semejante a la mostrada en la figura III.16

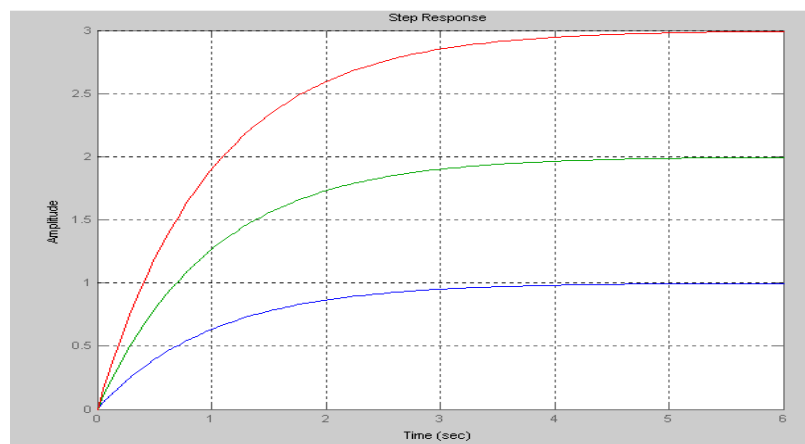


Figura III.16: Constante de tiempo en la respuesta del sistema

Como puede notarse si se aumenta la constante de tiempo a lazo abierto, manteniendo constante la ganancia del sistema, se obtendrán las nuevas condiciones de operación en estado estacionario en mayor tiempo.

Duplicando el valor de la constante de tiempo también se duplica el tiempo para alcanzar el estado estacionario.

3.2.3. Sistemas de Primer Orden con Retardos.

En situaciones reales cuando se modifica el valor de alguna variable no se observa de inmediato el efecto de dicho cambio sobre la respuesta dinámica del sistema.

Es decir, puede transcurrir un cierto tiempo hasta que el sistema empieza a responder o a “sentir” el efecto del cambio realizado.

En la figura III.17 se puede apreciar el tiempo (θ) en que el sistema tarda en responder conocido como **retardo**.

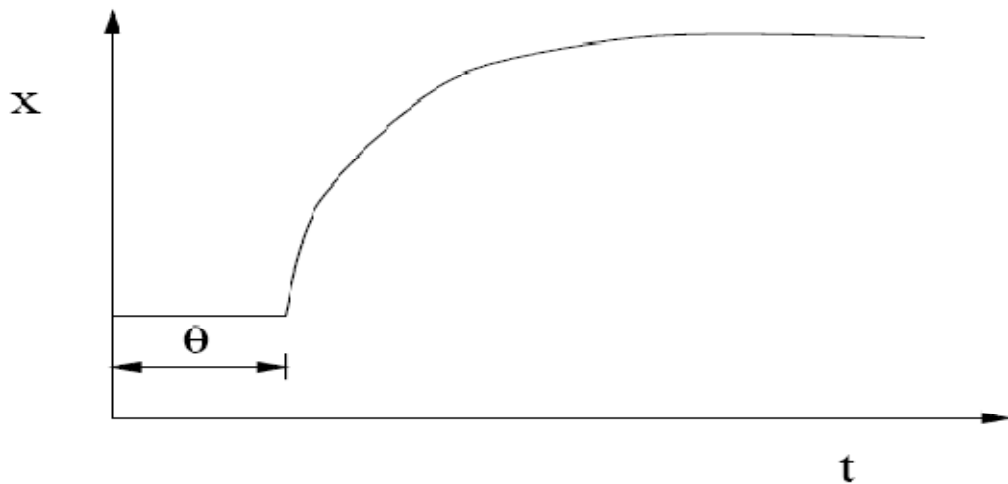


Figura III.17. Retardo de un sistema de primer orden

Una función de transferencia de primer orden con retardo se representa por la siguiente función de transferencia:

$$g(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s}$$

Ecuación III.5

Donde:

$e^{-\theta s}$: es el término usado para representar el retardo.

θ : representa el tiempo de retardo.

3.3. IDENTIFICACION DE LA PLANTA

Tanto la identificación como las pruebas de los controladores diseñados se realizan usando la función Step de LabBIEW®, con el cuál se pueden realizar simulaciones en tiempo real con la planta físicamente disponible.

Para un escalón de amplitud 0.7 voltios, equivalente a 7 °C y tras un tiempo de 15000 segundos la salida de la planta en régimen permanente es de 4.32 voltios equivalente a 43.2 °C y el tiempo de retardo que presenta es de unos 12 segundos, mostrado en la figura III.18.

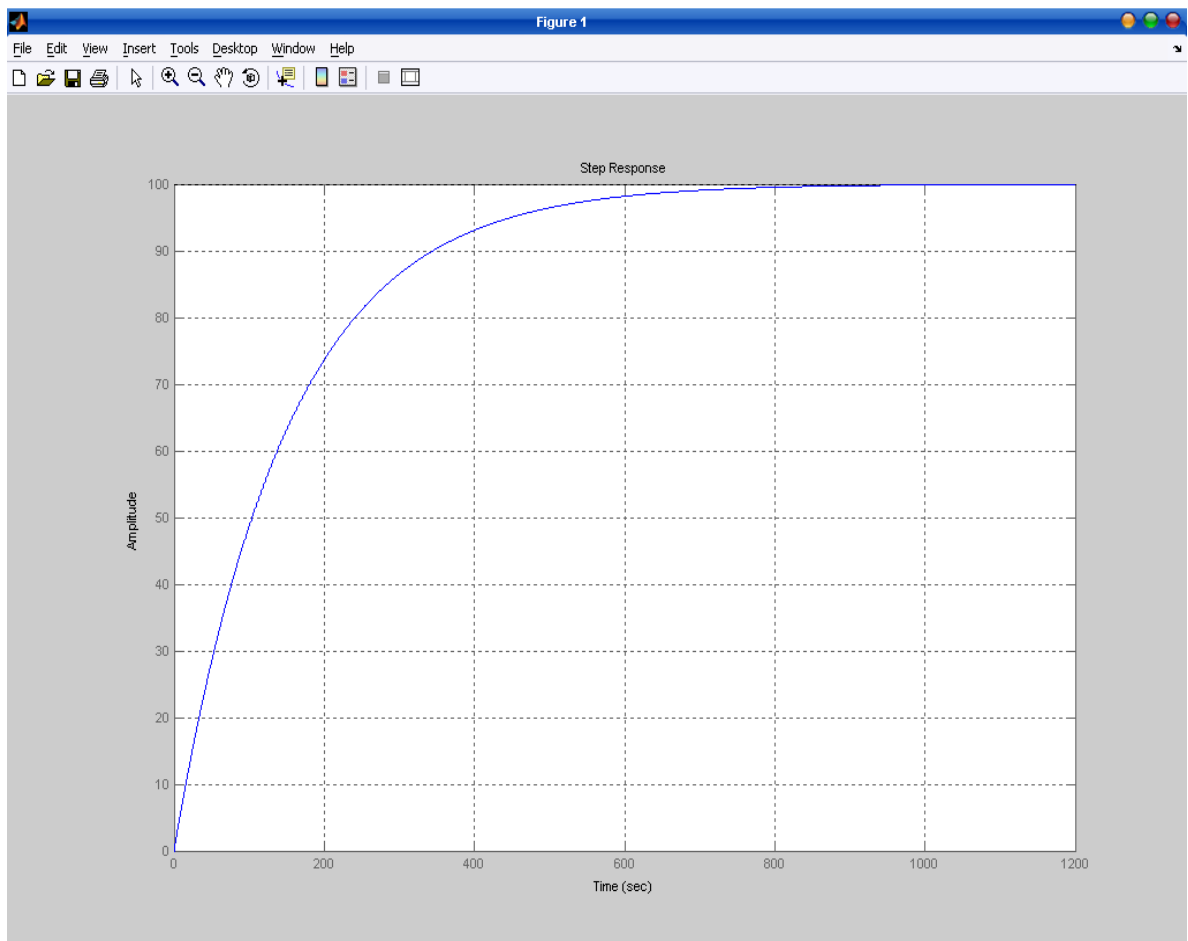


Figura III.18. Respuesta ofrecida por la planta para un escalón de amplitud 0.7

De la misma forma se hacen experimentos para amplitudes de 0.5, 0.6 y 0.8 mostrados en la Tabla III.1

Amplitud escalón	Ganancia (K)	Tiempo de retardo (td)	Constante de tiempo (τ)
0.5	98	12	150
0.6	99.2	13	149.55
0.7	99.49	11	149.65
0.8	99.83	12.5	149.77

Tabla III.I. Amplitudes para la ganancia K.

De los resultados obtenidos se observa que la planta no es lineal en el rango de operación, por lo que se puede obtener una función de transferencia media.

$$Gp = \frac{100e^{-12s}}{150s + 1}$$

Ecuación III.6

La figura III.19 muestra la dinámica de la planta para la ecuación 3.6 realizado en la herramienta Simulink de Matlab.

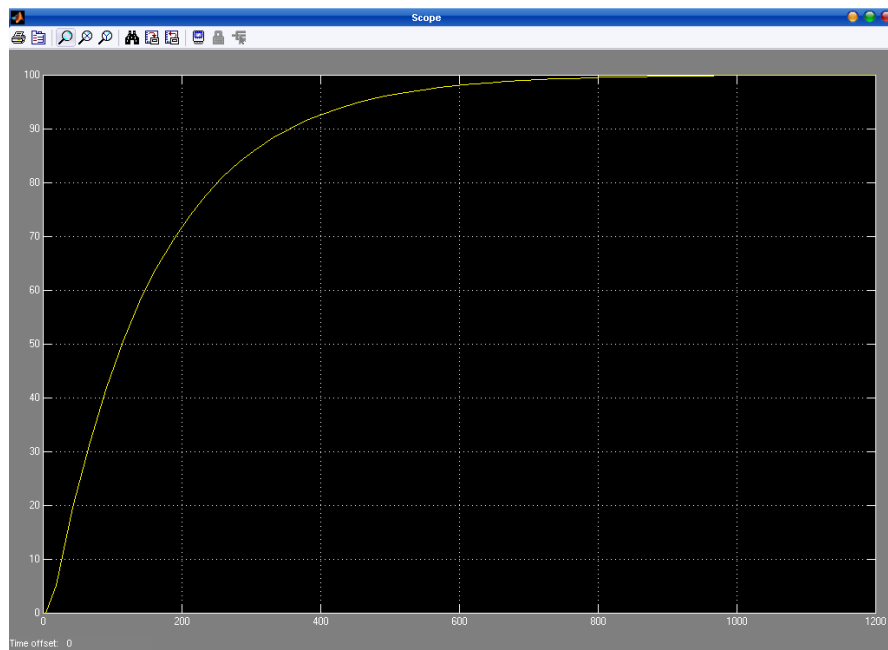


Figura III.19. Respuesta ofrecida por la dinámica de la planta

En el proceso de identificación se ha empleado un tiempo de 1200 segundos, más de 20 minutos para escalón aplicado a la entrada de la planta.

Como se comentó antes, al ser una dinámica lenta los tiempos empleados en las diferentes fases son bastantes elevados.

Esto supone un inconveniente, por lo que cada grupo ha experimentado con un escalón y posteriormente se han recopilado los resultados.

3.4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

Una vez realizada la identificación de la planta se elegirá alguna técnica para el diseño del controlador.

Primero se comienza aplicando alguna técnica empírica de sintonización de parámetros del controlador como por ejemplo, las reglas de Ziegler-Nichols posteriormente se realizan una sintonización fina para mejorar sus prestaciones.

Como el error en régimen permanente requerido ante escalón es cero, se requerirá un controlador PID.

Por Ziegler-Nichols los parámetros del controlador se calculan según la siguiente Tabla III.II.

	Kp	Ti	Td
PID	1.2. $\tau= 15$	2.td= 24	0.5.td=6

Tabla III.II. Parámetros del controlador.

El controlador PID resultante tiene la siguiente expresión

$$G_c = \frac{2160s^2 + 360s + 15}{24 s}$$

En la figura III.20 se muestra un diagrama de bloques de la planta con el controlador PID diseñado:

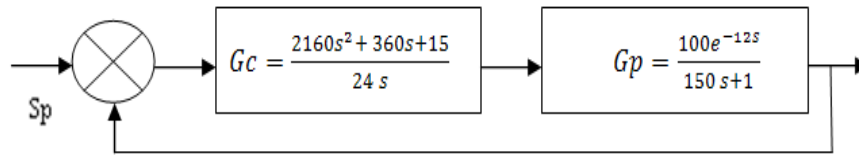


Figura III.20. Lazo cerrado planta PID

A continuación se examina la respuesta escalón unitario del sistema realizado en MATLAB mostrado en la figura III.21.

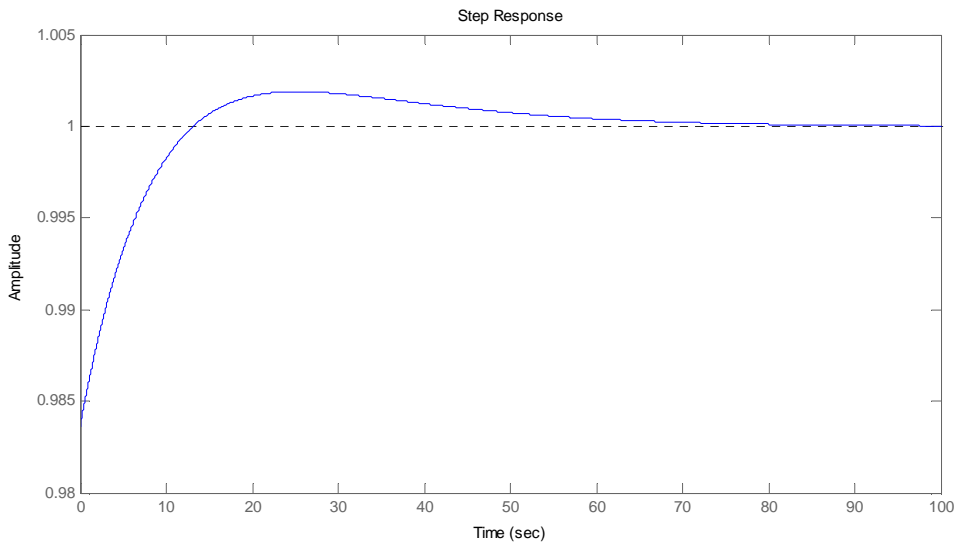


Figura III.21. Respuesta al escalón unitario de la planta con el pid

Observamos como la planta a mejorado sus características al añadirle el controlador PID, el cual presenta un nivel de estabilidad adecuado para el control del modulo de temperatura.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO

4.1. INTRODUCCION

LabVIEW® constituye un revolucionario sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos.

Las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW® se resumen en las siguientes:

- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.

- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

LabVIEW® tiene su mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, un ejemplo de esto pueden ser sistemas de monitoreo en transportación, laboratorios para clases en universidades, procesos de control industrial.

LabVIEW® es muy utilizado en procesamiento digital de señales, procesamiento en tiempo real de aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, entre otras, etc.

Para el empleo de LabVIEW® no se requiere gran experiencia en programación, ya que se emplean iconos, términos e ideas familiares a científicos e ingenieros, y se apoya sobre símbolos gráficos en lugar de lenguaje escrito para construir las aplicaciones.

Por ello resulta mucho más intuitivo que el resto de lenguajes de programación convencionales.

LabVIEW® posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW® incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB, DAQ, y comunicación serie, análisis presentación y guardado de datos.

LabVIEW® también proporciona potentes herramientas que facilitan la depuración de los programas.

Los programas desarrollados mediante LabVIEW® se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real.

Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales.

Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs.

Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs.

LabVIEW® posee una extensa biblioteca de funciones, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, etc.

Las estructuras, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle for, while, case,...).

Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, donde cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

4.2. INTERFACES DESARROLLADAS EN LABVIEW®

Mediante LabVIEW® se desarrolló la interfaz para el Control Remoto del Módulo de Temperatura desde la PC y la tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ, dicha interfaz consta de las siguientes pantallas:

4.2.1. Panel frontal de la pantalla principal:

La figura IV.22 muestra la pantalla principal de la interfaz que es la de presentación al usuario.

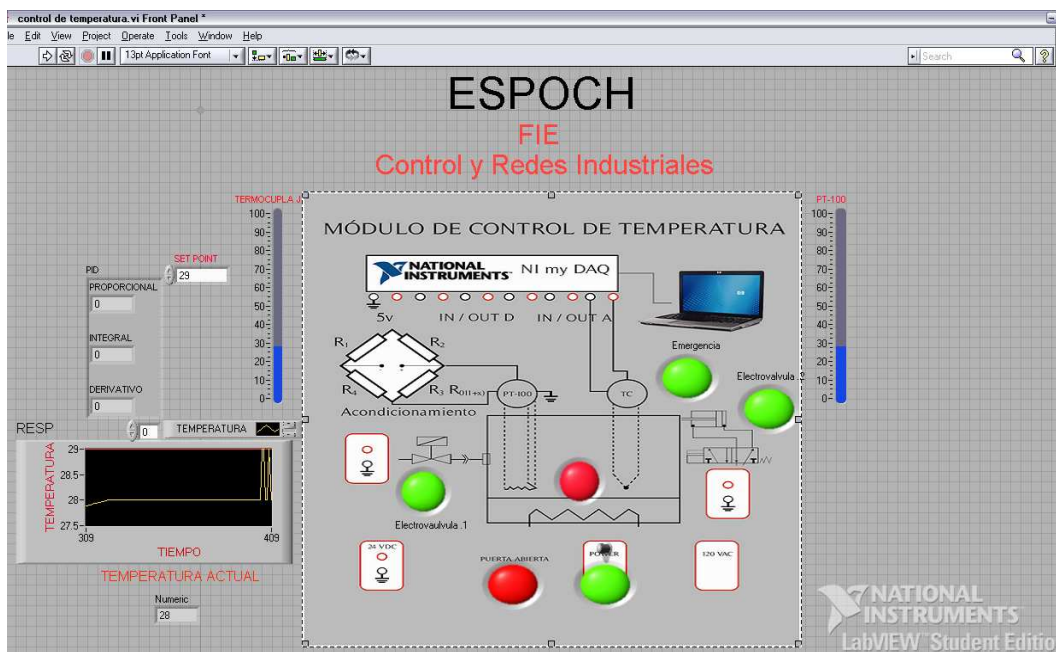


Figura IV.22. Pantalla Principal

Esta pantalla permite realizar las siguientes opciones:

- Observar la temperatura actual recibida desde los sensores tanto de la Termocupla como del Pt-100.
- Ingresar el valor de la temperatura deseada o punto de consigna.
- Ingresar los valores de las constantes de proporcionalidad o ganancia del sistema.
- Observar los led`s indicadores de encendido y apagado tanto del calefactor como del sistema electroneumático de enfriamiento.
- Observar el comportamiento gráfico de la temperatura actual como el valor que desea alcanzar el controlador.
- Observar el encendido del Led indicador de abierto o cerrado de la puerta del horno.

Es decir este Panel está conformado por todos los SubVi`s creados los cuales permiten realizar las tareas en conjunto para el control del módulo, donde todas las señales que ingresan y salen de LabVIEW® se las realiza a través de la herramienta Daq Asistent, la cual permite adquirir las señales ya sean análogas o digitales para su posterior procesamiento.

4.2.2 Diagrama de bloques del acondicionamiento.

Este VI permite acondicionar la señal de entrada proveniente del Pt-100 y la termocupla a través de la Ni Mydaq el cual se encarga de amplificar la señal a un valor adecuado para su posterior muestreo.

Como la temperatura a controlar para fines didácticos va desde 0 a 100 grados centígrados, los controles del Vi se encargan de realizar 100 muestras por cada rango de temperatura en milivoltios ingresada.

La herramienta Select permite comparar si la señal ingresada es mayor a cero, esto permite evitar que se ingresen señales negativas causadas por interferencias o ruido en las uniones del sensor Pt-100 con el puente de Wheatstone, o en las uniones de la termocupla con la tarjeta de adquisición de datos.

La figura IV.23 muestra el acondicionamiento del sensor Pt-100 y Termocupla tipo K.

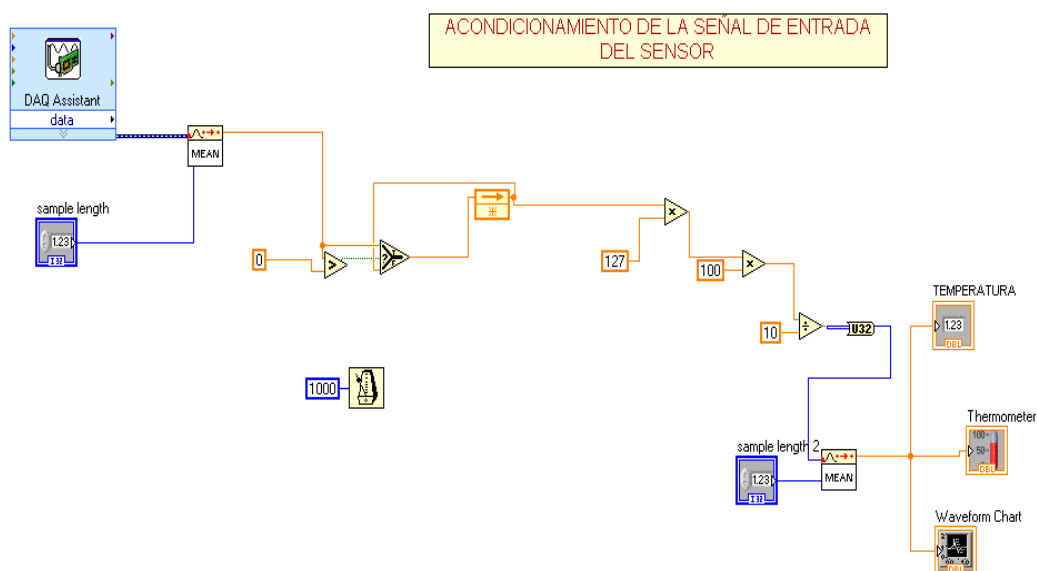


Figura IV.23. Acondicionamiento y amplificación de la señal de entrada

4.2.3. Panel frontal del generador PWM y el controlador

Este Vi se encarga básicamente de generar una señal PWM para el control del circuito de potencia que posteriormente controlará el encendido y apagado del calefactor del horno.

El PWM irá modificando su ciclo de trabajo, de acuerdo a la señal proveniente del controlador la cual indicara a que ciclo de trabajo deberá operar, manteniendo su frecuencia constante.

Este Vi esta formado por varias herramientas del Signal Processing las cuales se encargan de generar los niveles en que la salida estará en nivel alto o bajo y generar un ciclo de trabajo adecuado.

Labview consta una serie de librerías para el diseño de controladores entre ellas está la librería Control Design la cual posee un bloque PID, en donde ingresaremos los datos de los parámetros de las ganancias del sistema hallados en el capítulo 3, como el valor de consigna, valor actual de la temperatura, así como el tiempo de muestreo.

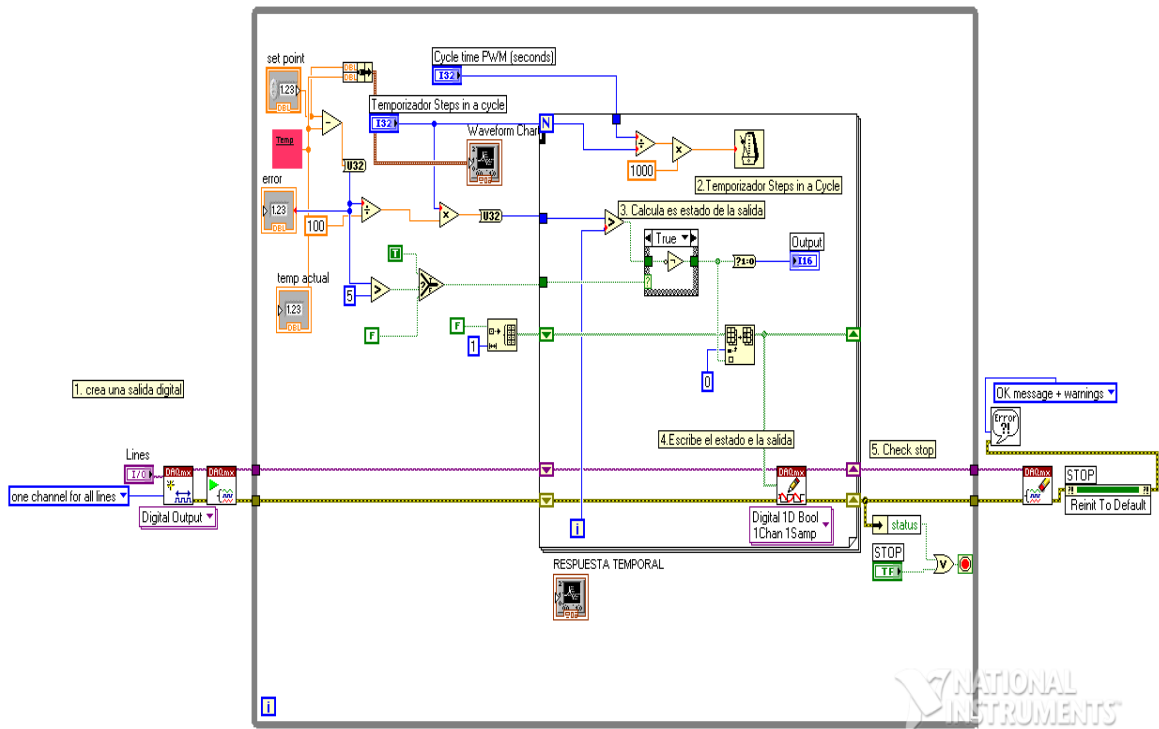


Figura IV.24. Diagrama de bloques del PWM

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE POTENCIA, ACTIVACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO

5.1. CIRCUITO DE POTENCIA Y ACTIVACIÓN

El circuito de potencia está formado por un triac y un optoacoplador cuya señal de salida actuará directamente sobre el elemento calefactor mediante señales de pulsos proveniente de la interfaz de control de LabVIEW®, con lo cual se controla la potencia que se entrega a la carga.

El aislamiento entre la circuito de control y la etapa de potencia lo proporciona generalmente un optoacoplador MOC-3010, la conmutación propiamente dicha puede ser realiza por transistores bipolares, MOSFET`s de potencia, triacs etc.

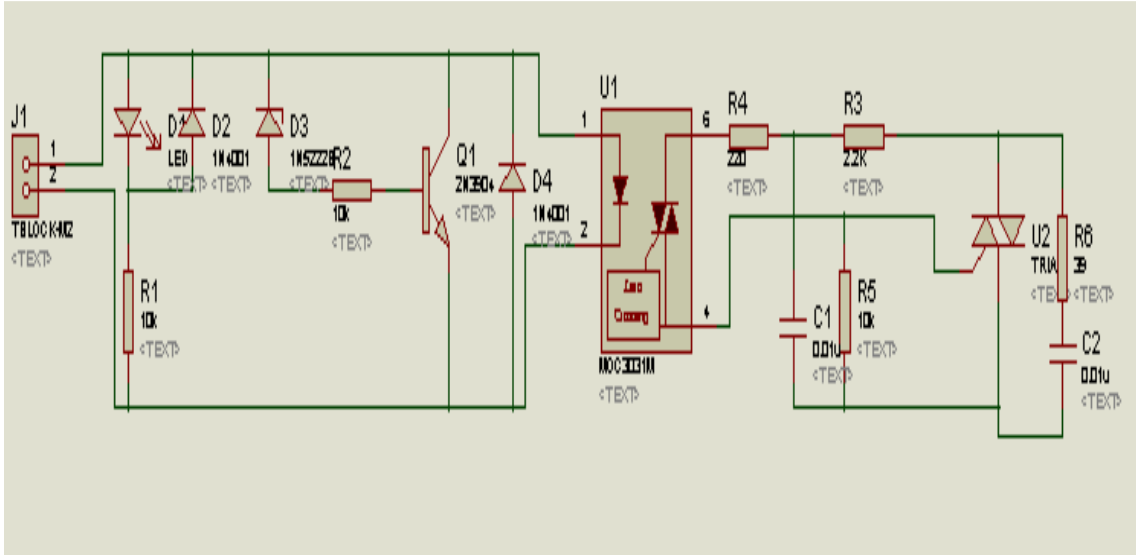


Figura V.25. Esquemático del circuito de potencia.

5.1.1 Control por Ciclos Enteros.

También es llamado por cruce cero, en este control como su nombre lo indica, conmuta cuando la tensión tiene valor instantáneo cero y la energía entregada dependerá de la relación entre el tiempo de conducción y no conducción, tomando como base un período de varios ciclos.

Es análogo a un control por modulación de ancho de pulsos, donde el "pulso" es en realidad un conjunto de ciclos enteros.

Los circuitos para este tipo de control son algo más complejos que los de control por fase, aunque con los circuitos integrados específicos, o circuitos digitales programados (PIC) esta diferencia se va minimizando.

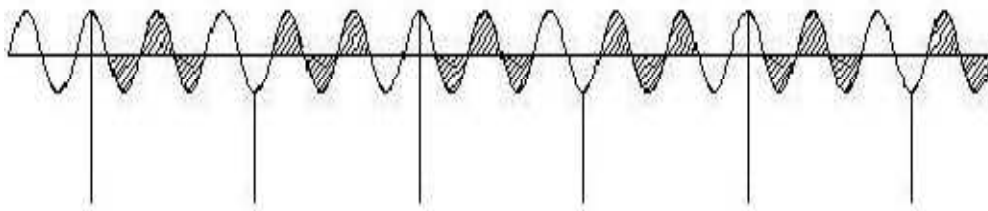


Figura V.26. Control por cruce cero

5.1.2 Elementos principales del circuito de potencia

El circuito de potencia encargado de encender y apagar al calefactor consta de varios elementos los cuales se detalla a continuación.

5.1.2.1 Triac

El TRIAC es un interruptor de silicio de tres terminales que se puede disparar (hacer conducir) con impulsos positivos y negativos de la puerta cuando los potenciales del ánodo son positivos o negativos respectivamente, es decir pueden conducir en las dos semiondas de la corriente alterna.

Un rele de estado sólido en este caso un triac ofrece varias ventajas notables con respecto a los tradicionales relés y contactores electromecánicos:

- Son más rápidos, livianos y confiables.
- No se desgastan.
- Son inmunes a los choques y a las vibraciones.
- Pueden conmutar a altas corrientes y a altos voltajes sin producir arcos ni ionizar al aire circundante.
- Generan muy poca interferencia.
- Proporcionan varios kilovatios de aislamiento entre la entrada y la salida.

El control de los tiempos de disparo del triac nos permite regular la tensión aplicada al calefactor.

La figura V.27 muestra la relación del ángulo de conducción versus el voltaje aplicado a la carga para un triac típico.

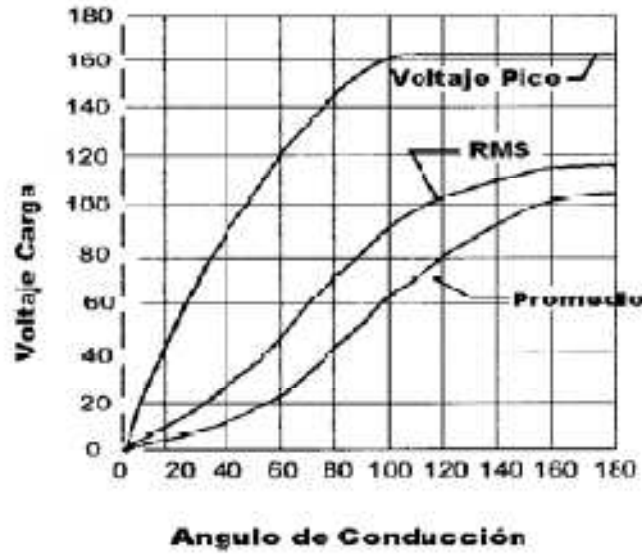


Figura V.27. Voltaje en la carga vs ángulo de conducción del triac

Las curvas muestran la tensión pico a pico, la tensión efectiva o RMS y el promedio de ambas.

5.1.2.2 Optoacoplador Moc 3010.

Es un componente electrónico que combina en el mismo empaque un LED y un fotodetector, mostrado en la figura V.28.

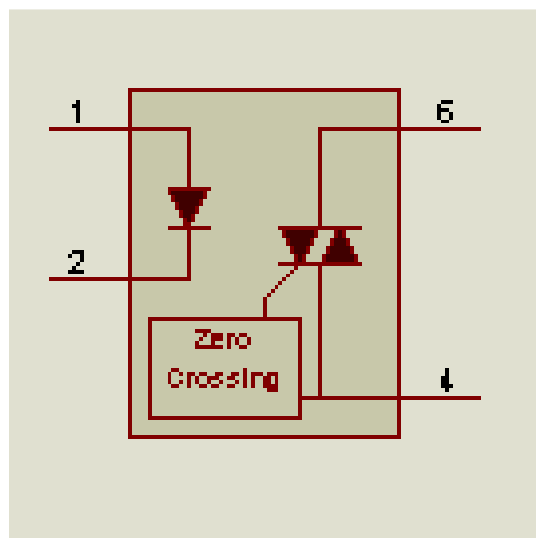


Figura V.28. Esquemático del MOC 3010

5.1.2.2.1. Funcionamiento:

El Led emite un rayo de luz cuando es excitado por una corriente proveniente de un circuito de control.

Este es recibido por el detector, es cual es activado por dicho estimulo, haciendo que el circuito de salida o de potencia en el cual este conectado entre en funcionamiento.

La principal ventaja de un optoacoplador es el aislamiento eléctrico entre los circuitos de entrada y salida ya que el único contacto entre ellos es un rayo de luz.

5.1.3. Funcionamiento del Circuito de Potencia.

Al aplicar un voltaje de control en la entrada del circuito, circula una corriente de polarizacion a través de led del optoacoplador y este emite una luz infrarroja en el interior de capsula.

Dicha radiación es captada por el fotodetector y convertida en corriente que se utiliza para impulsar directamente al triac encargado de conmutar la potencia de la carga.

Las resistencias R1 y R3 limitan la corriente a través del led indicador D3 y un led del optoacoplador a un valor seguro.

Los demás elementos cumplen funciones auxiliares como por ejemplo, los diodos D2 y D4 protegen los led's en caso de una inversión de la polaridad del voltaje de control y el transistor 2N3904 bloquea el paso de corriente hacia el optoacoplador cuando este es superior a 15 V, este umbral lo determina el diodo Zener. Esta regulación se la hace con el fin de proteger el led del optoacoplador.

En voltajes normales, con voltajes de entrada positivos (superiores a 5V e inferiores a 15 voltios), los diodos D1, D2, D4 y el transistor Q1 2N3904 permanecen en estado OFF y solamente circula corriente a través de los led's.

Cuando el voltaje de control supera la barrera de los 15 V, el diodo D1 se dispara, y permite la circulación de corriente en la base del transistor Q1 2N3904 a través de la resistencia R2.

Como resultado transistor Q1 2N3904 conduce y bloquea el paso de corriente hacia el optoacoplador. Algo similar sucede cuando se aplica un voltaje de entrada invertido. En este caso conducen los diodos D2 y D4 evitando que la tensión inversa de entrada quede aplicada a los led's.

La máxima tensión inversa que puede ser aplicada a los led's antes de destruirse es del orden de los 3 a 6 voltios.

El circuito de salida utiliza un triac de compuerta aislada gobernado por el diac del optoacoplador. Una vez disparado el optoacoplador por efecto del voltaje de control aplicado a la entrada, circula una corriente por el mismo y por la compuerta del triac, provocando que este entre en conducción, permitiendo a la vez que circule corriente a través del calefactor.

La red formada por la resistencia R7 y el capacitor C1, llamada red snubber, evita que los cambios rápidos en el voltaje de entrada disparen inadvertidamente al triac mientras este último se encuentre en estado OFF.

5.1.4. Activación de las Electroválvulas para el Sistema de Enfriamiento

La figura V.29 muestra el diseño realizado en Proteus para la activación de las electroválvulas del sistema de enfriamiento.

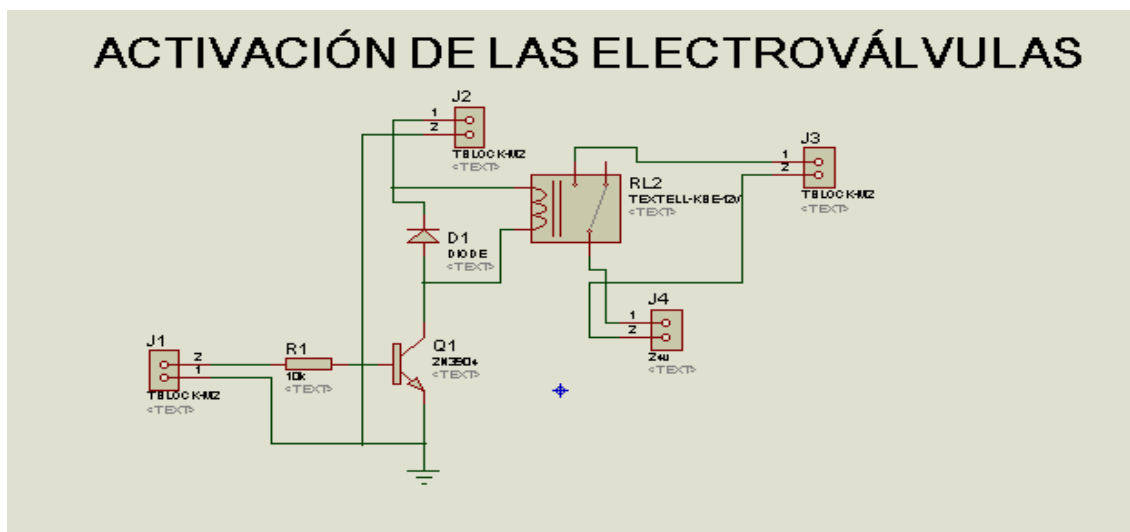


Figura V.29. Esquemático de activación de las electroválvulas

La tarjeta de activación de las electroválvulas consta de un transistor BJT 2N3904 que recibe en la base un pulso positivo del puerto DI1 de la tarjeta NI myDAQ y entrega en su salida, el colector, un nivel negativo, el cual hace que la bobina del relé se polarice correctamente y por lo tanto se unen los contactos común (COM) y normalmente abierto (NO).

El funcionamiento del relé es muy simple, cada vez que se polarice correctamente su bobina en este caso 5VDC, los contactos mecánicos de salida cambian de posición, es decir, si en estado de reposo están unidos el terminal común y el normalmente cerrado, en el momento de aplicar voltaje a la bobina se unen el común y el normalmente abierto, cuando se retira la alimentación los contactos vuelven al estado de reposo.

5.2. MEDICION Y ACONDICIONAMIENTO DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

La temperatura interviene en la mayor parte de los fenómenos físicos y por tanto es natural que exista un gran número de dispositivos que puedan usarse para la medida de la misma, así como también, diferentes formas de acondicionamiento

Los acondicionadores de señal, adaptadores o amplificadores, en sentido amplio, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser presentada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar.

Normalmente, son circuitos electrónicos que ofrecen, entre otras funciones, las siguientes:

- Amplificación.
- Filtrado.
- Adaptación de impedancias.

Todo conductor eléctrico presenta una resistencia que depende de su temperatura, por tanto, se puede utilizar la resistencia eléctrica como variable termométrica. Existen tres tipos de elementos para medir la temperatura:

- Detectores de Temperatura Resistivos [PT-100].

- Termistores (semiconductor) [NTC, PTC].
- Termopares [J, K, T].

Para el estudio de la temperatura se elige la Termocupla y el Detector de Temperatura Resistivo PT-100.

A continuación se detallan las características, el funcionamiento y el esquema de conexión tanto para la Termocupla y el RTD

5.2.1. Medición de las Termocuplas

Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo.

Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura, a lo cual se lo conoce como el efecto Seebeck, quien en 1821 estudió su comportamiento.

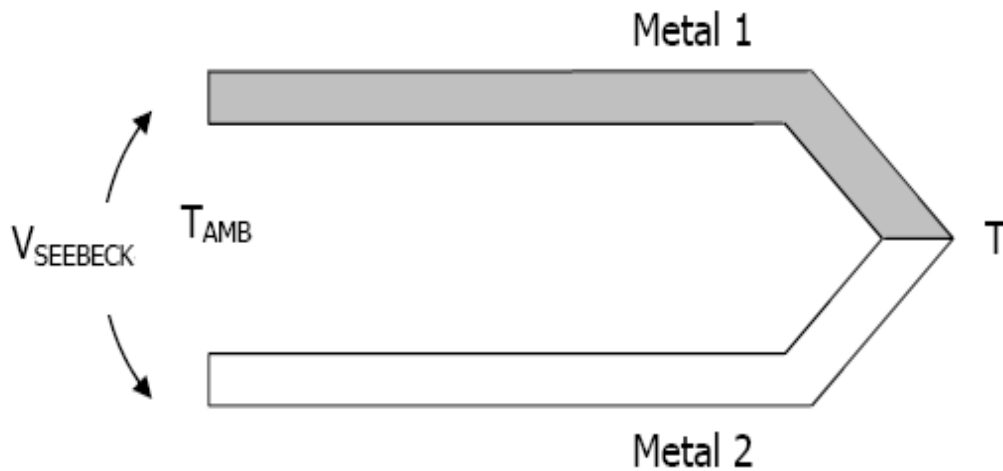


Figura V.30. Voltaje formado por la unión de dos metales

Por ejemplo, una termocupla "tipo J" está hecha con un alambre de hierro y otro de constantán (aleación de cobre y níquel). Al colocar la unión de estos metales a 750 °C, debe aparecer en los extremos 42.2 milivolts.

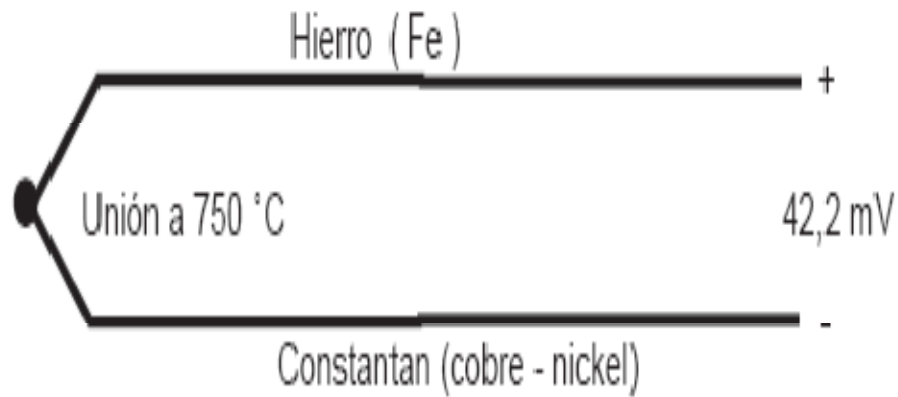


Figura V.31. Unión hierro constantán

Normalmente las termocuplas industriales se consiguen encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable ú otro material (vaina), en un extremo está la unión y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido adentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

Efecto Seebeck

El Efecto Seebeck es la suma de dos efectos independientes:

- El Potencial de Contacto debido a la unión metal-metal.
- El Doble Voltaje de Thomson debido a que cada uno de los dos metales tiene una diferencia de Temperatura entre sus extremos.

El Potencial de Contacto metal-metal VC.

La unión de dos metales diferentes (Elementos metálicos y/o aleaciones) genera una diferencia de potencial que depende de la Temperatura.

En general el voltaje que aparece entre los metales es tan pequeño (del orden de milivoltios), que para la mayoría de las aplicaciones eléctricas puede considerarse que los metales están a un mismo potencial.

Sin embargo, este pequeño voltaje es también responsable de corrosiones y oxidaciones en los metales, por ejemplo: en los bornes de plomo de las baterías de un carro, donde se unen con los cables de cobre.

En un metal los electrones de la última capa de sus átomos están tan poco ligados a estos que permanecen sumergidos dentro de todo el metal como electrones “casi-libres”.

No son enteramente libres porque no pueden salir del metal. Simplificando podemos considerar que los electrones dentro del metal están bajo la acción de un potencial producido por el material, que es prácticamente constante.

Efecto Thomsom

Descubierto por William Thomsom en 1847, consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor homogéneo con temperatura no homogénea por el que circula una corriente.

El calor liberado es proporcional a la corriente, se absorbe calor cuando la corriente del punto mas frío a más caliente y se libera cuando fluye del más caliente al más frío.

5.2.1.1. Ventajas de las Termocuplas

Las termocuplas tienen muchas ventajas y son los sensores más frecuentes para la medida de las temperaturas.

- Tienen un alcance de medida grande, no solo en su conjunto, que va desde -270 grados Centígrados hasta 300 grados Centígrados, sino también en cada modelo particular.
- Su estabilidad a largo plazo es aceptable y su fiabilidad elevada.

- Para temperaturas bajas tienen mayor exactitud que las RTD, y por su tamaño tienen velocidades de respuesta rápidas.
- Son robustos simples y de gran flexibilidad de utilización.
- Al no necesitar excitación no tienen problemas de autocalentamiento.

5.2.1.2. Tipos de Termocuplas

Aunque el termopar puede construirse con dos metales diferentes cualesquiera, la necesidad de una elevada sensibilidad (coeficiente de Seebeck alto), estabilidad a lo largo del tiempo, linealidad, etc. ha llevado a que tan sólo se utilicen determinados materiales dando lugar a diferentes tipos.

Tipo	Composición (+) (-)	Campo de medida recomendado (°C)	Coef. Seebeck μV/°C @25°C	Atmósferas de aplicación
J	Fe - Constantán	0 – 760	51	Reductora, inerte
K	Chromel - Alumel	-200 – 1250	40	Inerte, subcero
N	Nicrosil - Nisil	0 – 1260	26	Oxidante
T	Cu - Constantán	-200 – 350	41	Oxidante, inerte reductora, subcero
R	13%Pt 87%Rh - Pt	0 – 1450	6	Oxidante, inerte Altas temp.
S	10%Pt 90%Rh - Pt	0 – 1450	6	Oxidante, inerte Altas temp.
B	30%Pt 70%Rh - 6%Pt 94%Rh	800 – 1800	9	Oxidante, inerte Altas temp.

Tabla V.III. Composición química de las termocuplas.

Los termopares J, K, N y T se denominan termopares de metales base porque están hechos de metales comunes.

El tipo **K** es muy utilizado por encima de 538°C debido a las limitaciones del termopar de tipo J.

El cromo tiende a oxidarse ante la presencia de oxígeno lo que puede llevar a importantes derivas en el margen de 816 a 1038°C.

El tipo **N** se utiliza en aplicaciones donde el termopar de tipo K tiene problemas de oxidación.

Los termopares R, S y B se conocen como termopares de metales nobles porque están hechos de platino y rodio.

Se utilizan cuando las temperaturas a medir son muy elevadas y exceden los márgenes que se pueden alcanzar con los metales base o cuando hay problemas de oxidación o de corrosión.

Finalmente las tipo T eran usadas hace algún tiempo en la industria de alimentos, pero han sido desplazadas en esta aplicación por los Pt100

5.2.1.2.1 Termocupla Tipo K

El termopar tipo **K**, figura V.32 utilizada en el modulo de control de temperatura presenta las siguientes características:

- Es apropiado para atmósferas inertes o reductoras.
- Compuesta de hierro y constantan.
- El rango de medida recomendado va de 0 grados a 720 grados centígrados.
- Las atmósferas oxidantes disminuyen la vida útil debido a la presencia de hierro en el termopar que, además, se oxida muy rápidamente por encima de 538°C.

- No es adecuado para bajas temperaturas (por debajo de 0°C).



Figura V.32. Termocupla industrial tipo K

5.2.1.3. Curvas Características de las Termocuplas.

La tensión entre los terminales del termopar depende de los metales y de la diferencia de temperatura entre las dos uniones.

La figura V.33 muestra las curvas de calibración de varios termopares suponiendo que la temperatura de una de las uniones está a 0 °C, esta tensión es repetible pero no es lineal.

Para mostrar con más claridad esta no linealidad en la figura V.34 se ha representado la variación del coeficiente de Seebeck con la temperatura.

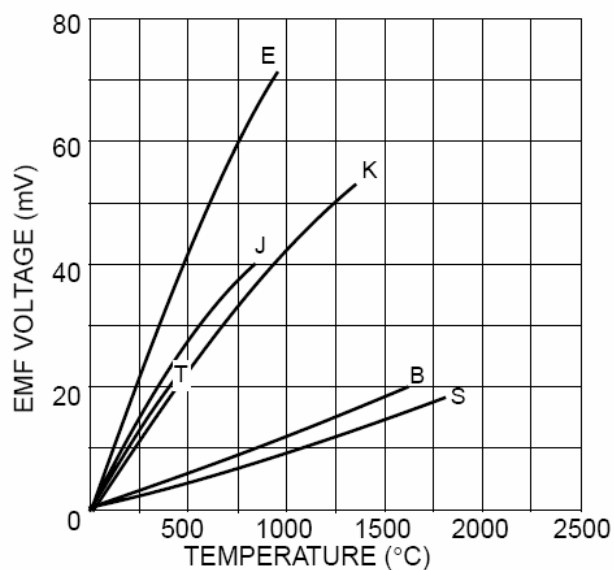


Figura V.33. Curva de calibración a la unión de 0 grados

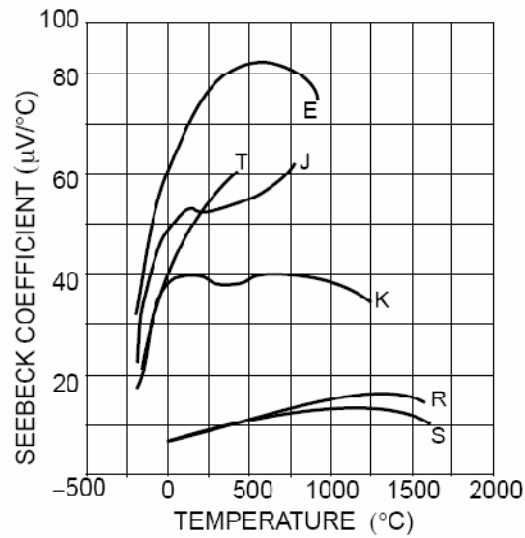


Figura V.34. Variación del coeficiente Seebeck con la temperatura

5.2.1.4. Compensaciones de las termocuplas.

El principal inconveniente de las termocuplas es su necesidad de compensación, esto se debe a que en algún punto, habrá que empalmar los cables de la termocupla con un conductor normal de cobre.

En ese punto se producirán dos nuevas termocuplas con el cobre como metal para ambas, generando cada una un voltaje proporcional a la temperatura de ambiente (T_a) en el punto del empalme.

Antiguamente se solucionaba este problema colocando los empalmes en un baño de hielo a cero grados para que generen cero voltaje ($T_a = 0$ y luego $V(T_a) = 0$).

5.2.1.4.1 Compensación de Cero

Actualmente todos los instrumentos modernos miden la temperatura en ese punto (mediante un sensor de temperatura adicional) y la suman para crear la compensación y obtener así la temperatura real.

El punto de empalme (llamado "unión ó juntura de referencia") es siempre en el conector a la entrada del instrumento pues ahí está el sensor de temperatura. De modo que es necesario llegar con el cable de la termocupla hasta el mismo instrumento.

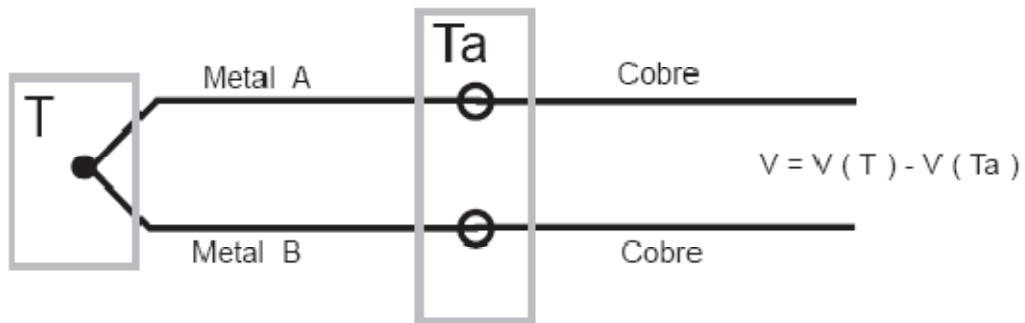


Figura V.35. Empalme de la termocupla con un conductor de cobre

La termocupla, hecha de metal A y metal B está sometida a una temperatura T. En los extremos de la termocupla se coloca un voltímetro con puntas de prueba de cobre a temperatura de ambiente Ta.

Recorriendo el circuito se encuentra el voltaje V que marca el voltímetro:

$$V = V_{cu, a}(Ta) + V_{a,b}(T) + V_{b,cu}(Ta)$$

$$V = [V_{b, cu}(Ta) + V_{cu,a}(Ta)] + V_{a,b}(T)$$

$$V = V_{b,a}(Ta) + V_{a,b}(T)$$

$$V = V_{a,b}(T) - V_{a,b}(Ta)$$

El voltaje que nos interesa saber para conocer el valor de la temperatura T es $V_{a,b}(T)$, este se consigue despejándolo:

$$V_{a,b}(T) = V + V_{a,b}(Ta)$$

Luego conociendo Ta se busca en la tabla de la termocupla el valor de $V_{a,b}(Ta)$ y se suma a V medido en el voltímetro con lo que se obtiene $V_{a,b}(T)$.

Ahora con este valor se busca en la tabla el valor de T.

Los instrumentos para TC miden Ta en su conector y suman esta cantidad $V_{a,b}(Ta)$ automáticamente para hacer la compensación de cero.

5.2.1.4.2. Cables Compensados

Cuando el instrumento está muy retirado del lugar de medición, no siempre es posible llegar con el mismo cable de la termocupla al instrumento.

Esto ocurre especialmente cuando se están usando termocuplas R, S ó B hechas con aleación de platino de muy alto precio.

La solución de este problema es usar los llamados "cables compensados" para hacer la extensión del cable. Estos exhiben el mismo coeficiente de Seebeck de la termocupla (pero hechos de otro material de menor precio) y por lo tanto no generan termocuplas parásitas en el empalme.

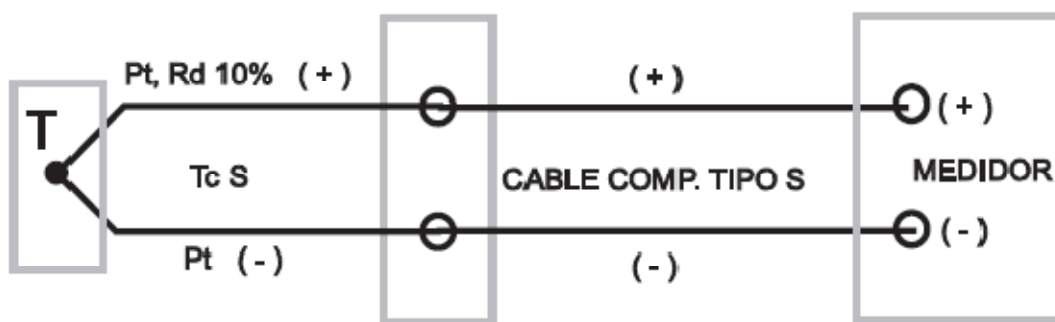


Figura V.36. Cable compensado para la extender la termocupla

Los cables compensados tienen una polaridad de conexión (+) y (-) que al conectarse con la termocupla se debe respetar. Un error típico, es conectar al revés el cable en la termocupla y en el instrumento, de esta forma se genera un error en la lectura del orden de la temperatura de ambiente en el empalme.

En el caso particular de las lanzas usadas en la fundición de aceros, la termocupla se conecta en la punta con un cable compensado forrado en asbesto, que va por dentro de la lanza hasta el lado del mango.

Ahí se empalma con otro cable compensado con revestimiento de goma más flexible que llega hasta la entrada del instrumento.

Es importantísimo que estos dos cables compensados sean para el tipo de termocupla que se está usando y además estén conectados con la polaridad correcta (+) con (+) y (-) con (-), de otra forma será imposible obtener una medición sin error.

Siempre se debe consultar al proveedor ó fabricante del cable compensado por los colores que identifican los cables (+) y (-), pues las normas de estos colores varían con el tipo de termocupla y país de procedencia del cable.

La unión de la termocupla al cable de compensación debe realizarse por empalme directo a presión, no debe de realizarse por soldadura ya que se podrían introducir termopares nuevos y en consecuencia tensiones de error.

5.2.1.5. Linealización de las Termocuplas

La dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura no es lineal, no es una recta , es deber del instrumento electrónico destinado a mostrar la lectura, efectuar la linealización, es decir tomar el voltaje y conociendo el tipo de termocupla, ver en tablas internas a que temperatura corresponde este voltaje.

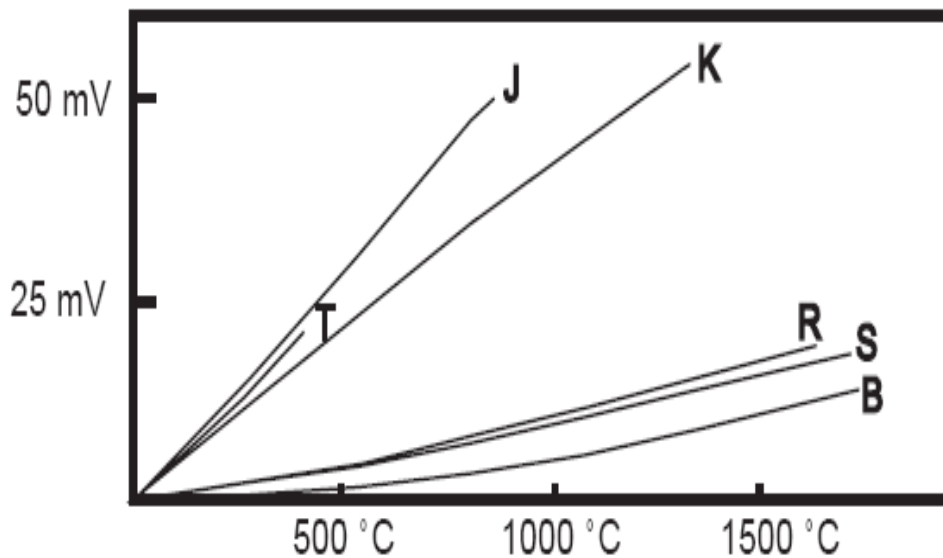


Figura V.37. Linealidad de las termocuplas.

5.2.2. Sensores Pt-100

Este sensor de temperatura basado en la variación de una resistencia eléctrica se suele designar con sus siglas inglesas RTD (Detector de Temperatura Resistivo).

El fundamento de la RTD es la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura.

Esta dependencia se puede expresar de la forma:

$$R_t = R_0 (1 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + \dots + a_n \cdot T^n)$$

Ecuación IV.1

Donde:

- R_t : Resistencia del sensor a la temperatura t expresada en $^{\circ}\text{C}$ (W).
- R_0 : Resistencia a la temperatura de referencia de 0°C (W).
- a_n : Coeficiente térmico dependiente del material empleado ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).
- T : Temperatura de trabajo ($^{\circ}\text{C}$).

Para el metal empleado en este sensor (platino) y para el margen de medida, prevalece el término lineal ($a_1 \cdot T$) sobre las demás variables, con una proporción de más de 10 a 1.

Se puede decir, por tanto, que existe una linealidad aceptable dentro del margen de medida.

El principio de medición de temperatura por resistencia, se basa en la capacidad de los metales de variar su resistividad en función de la temperatura, siendo ésta directamente proporcional con la temperatura.

Aprovechando esta propiedad se construyen sondas analógicas de temperatura.



Figura V.38. Detectores de temperatura resistivos

5.2.2.1. Aplicaciones de los detectores de temperatura resistivos.

Las RTD se utilizan en múltiples aplicaciones tales como:

- Sector del automóvil (medida de los gases de escape, temperatura del aire de entrada al motor, temperatura interior y exterior),
- Electrodomésticos.
- Edificación (temperatura de los gases de la chimenea, combustión de la caldera).
- Control de hornos industriales a gas y eléctricos

5.2.2.2. Características de los Rtd

Las características que deben de tener los materiales empleados para las RTD son:

- Alto coeficiente de temperatura.
- Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la temperatura mayor será la variación por grado centígrado, con un valor óhmico suficientemente alto se pueden emplear hilos de conexión largos y con poca masa, para tener una respuesta térmica rápida.
- Relación lineal temperatura-resistencia.
- Rigidez y ductilidad (adaptabilidad).
- Estabilidad de las características en la vida útil.

Los materiales más comúnmente utilizados para la construcción de termómetros de resistencia metálica son el platino, el níquel y el cobre, pues contienen una alta variación de resistencia.

El platino es el metal más utilizado pues aunque el níquel presenta mayor sensibilidad el platino es más lineal y sobre todo tiene una resistividad mayor.

Esto último permite tener una sonda con un valor óhmico suficientemente alto para permitir el empleo de hilos de conexión largos y, a la vez, con poca masa, para tener una respuesta térmica rápida.

Los fabricantes ofrecen para cada RTD su curva de calibración como la que se muestra en la figura V.39.

Un valor típico es el que presentan a 0°C, que para el platino es de 100 Ω, lo que da origen al nombre de Pt100.

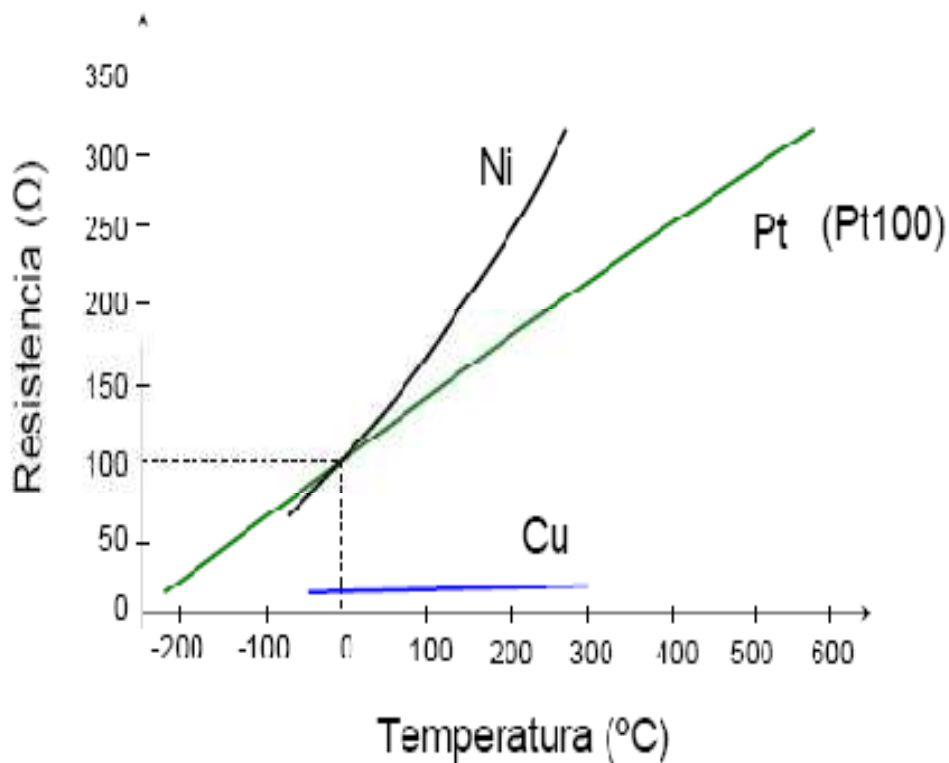


Figura V.39. Curva de calibración de los RTD

El RTD utilizado está constituido de platino ya que presenta las siguientes ventajas frente a los RTD's basados en metales como el níquel o el cobre:

- Es el mejor material por ser fácil de obtener de forma pura, ser químicamente inerte.
- Puede ser utilizado en un gran número de entornos sin deterioro.
- Puede utilizarse con un alto rango de temperaturas (entre -200 °C y 850 °C).
- Tiene una relación resistencia-temperatura muy lineal (entre -200 °C y + 500 °C) y posee un buen grado de repetibilidad.
- Su coeficiente térmico α es $3,85 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

5.2.2.3. Puente de Medida o de Wheatstone para Acondicionamiento de Pt-100

La conexión del sensor o transductor de temperatura PT-100 se realiza mediante la conexión de los tres hilos (o método de Siemens).

Esta conexión consiste en que en el proceso de medición (en el puente de Wheatstone) la resistencia propia de línea se compensa automáticamente con la resistencia de línea de la otra rama.

De esta manera el puente se equilibra sin que tenga importancia la longitud del cable de extensión entre el elemento sensor y el puente de medición.

Las ventajas de la estructura del esquema de la figura V.40. respecto una convencional son:

- RL1 y RL2 se compensan en las dos ramas y R3 establece un camino común.
- Muy utilizado en la industria, pues consigue una cierta independencia con la longitud de la línea y minimiza el conexionado.

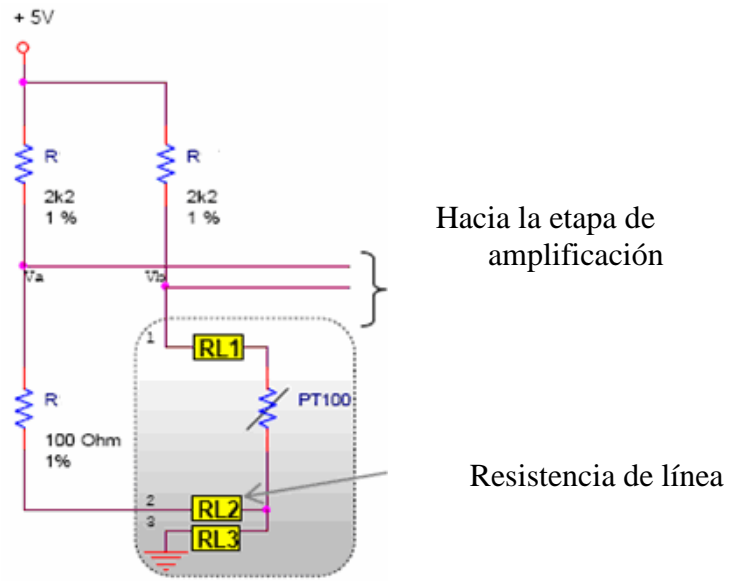


Figura V.40. Esquemático del puente de Wheatstone

La forma más habitual de transformar la variación de resistencia de la PT-100 a señal eléctrica es la utilización de un puente de Wheatstone con el método de deflexión, donde en uno de las ramas de los divisores de tensión se conecta la PT-100 y entre los terminales Va y Vb se mide la diferencia de tensión.

El objetivo de implementar esta estructura es obtener en la termoresistencia a temperatura 0 °C el valor correspondiente a 100 ohmios y una tensión diferencial (Vb - Va) de 0 V.

Por lo tanto, para mantener en equilibrio el puente, el valor de R4 tiene que ser de 100 ohmios.

Si lo que se mide es la tensión entre Va y Vb, se obtiene que la tensión de salida del puente corresponde a la siguiente ecuación:

$$K = \frac{R_4}{R_2} = \frac{R_1}{R_{PT100}}$$

Ecuación. IV.2

$$V_s = V_b - V_a = V_{CC} \left[\frac{R_{PT100}(1+X)}{R_{PT100}(1+X)R_1} - \frac{R_2}{R_4 + R_2} \right] = V_{CC} \left[\frac{kx}{(K+1)(K+1+X)} \right]$$

Ecuación IV.3

Para determinar el valor de las resistencias del puente, hay dos condiciones que se deben cumplir: que la tensión de salida sea 0 V a 0 °C y que el error no supere la cota establecida.

Sin embargo, si k es suficientemente grande, se podrá aproximar a la dependencia lineal obteniendo como resultado la ecuación IV.4.

$$V_{sa} \cong V_{cc} \frac{KX}{(k+1)^2}$$

Ecuación IV.4

Para conocer como tiene que ser el valor de k y conseguir esta linealidad, se debe conocer el error relativo debido a la falta de linealidad, y relacionando las ecuaciones IV.3 y IV.4, se obtiene la ecuación IV.5.

De esta manera se observa que el error relativo es directamente proporcional a x e inversamente proporcional a k .

$$\varepsilon_r = \frac{V_{sa} - V_s}{V_{sa}} = \frac{x}{K+1}$$

Ecuación IV.5

5.2.2.4 Cálculos de la Etapa Acondicionadora:

Se desea medir la temperatura en el margen de 0 °C a +100 °C, de tal forma que se obtenga una tensión de salida de 0 V a 10 V, con un error inferior al 1% de la lectura más 0,3% del margen de medida.

Se dispone de una PT-100 que a 0 °C tiene 500 W, $\alpha = 0,00385$ °C⁻¹ y una potencia termoeléctrica $d = 5$ mW/K en las condiciones de medida.

A continuación, se detallan las especificaciones tomadas para el diseño de la etapa acondicionadora.

Los rangos de temperatura son:

$$T \text{ min } 0 \text{ C} \quad V_s = 0 \text{ V}$$

$$T \text{ max. } 100 \text{ C} \quad V_s = 10 \text{ V}$$

Donde la diferencia entre la indicación del instrumento y el verdadero valor se denomina error absoluto.

Para que el error relativo (ϵ_r) debido a la falta de linealidad no supere la cota establecida, deberá cumplirse:

$$x = \alpha_0 T$$

Ecuación IV.6

$$\epsilon_r = \frac{x}{K + 1} = \frac{0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} 100^\circ\text{C}}{K + 1} < 0,01$$

Ecuación IV.7

Despejando k de la ecuación IV.7 se obtiene $k > 18,25$.

Partiendo de que la termoresistencia PT-100 a 0 °C tiene una resistencia de 100 W (RPT100=100 ohmios), para mantener el equilibrio del puente, R4=100 ohmios.

Conociendo que $k > 18,25$, se coge como referencia para este estudio el valor normalizado superior más próximo al teórico, R1= 2200 ohmios y R2= 2200 ohmios respectivamente.

El efecto de autocalentamiento provocará un aumento de la temperatura, expresado en la siguiente ecuación:

$$\Delta T = \frac{P}{\delta} = \frac{\left[\frac{V_{cc}}{R_1 + R_t} \right]^2 R_t}{\delta}$$

Ecuación IV.8

Donde:

P: Potencia disipada (W)

d: Potencia termoeléctrica (mV/K)

Vcc: Tensión de alimentación del puente de medida (V)

Rt: Resistencia del sensor a la temperatura t en °C (W).

El máximo autocalentamiento se producirá cuando la potencia disipada sea máxima.

Para conocer cuándo se produce ésta, en función de Rt, se puede igualar a cero la derivada primera, como se indica en la ecuación IV.9.

$$\frac{dP}{dR_t} = 2 \frac{V_{cc}}{R_1 + R_t} \left[\frac{-V_{cc}}{(R_1 + R_t)^2} \right] R_t + \left[\frac{V_{cc}}{R + R_t} \right]^2 = 0$$

Ecuación IV.9

y se obtiene la condición Rt=R3. Calculando la derivada segunda, se obtiene que para este valor Rt es negativa, y por tanto esta condición corresponde a un máximo.

Dado que en el margen de medida nunca se cumplirá la condición Rt=R3, el máximo autocalentamiento se producirá a + 100 °C, que es cuando Rt alcanza su valor máximo, que es:

$$R_t = R (1 + a \cdot T) = 100 \Omega (1 + 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 100 \text{ } ^\circ\text{C}) \cong 138.5 \Omega.$$

Ecuación IV.10

Se desea obtener como resultado el valor de tensión de alimentación (Vcc) del puente de Wheatstone que haga no rebasar el error de medida (0,3 %):

$$\frac{\left[\frac{V_{cc}}{2200\Omega + 120\Omega} \right]^2 120\Omega}{5m \text{ W/K}} < (0.3)(10^{-2})[100^\circ\text{C} - (0^\circ\text{C})] = 0.30^\circ \text{ C}$$

Ecuación IV.10

Como VCC ha de ser inferior a 5,8 V, para el presente estudio se impone que VCC corresponda a 5 V, ya que este valor de tensión es facilitado por la fuente de voltaje de NI myDAQ.

La sensibilidad o mínima variación de tensión por grado detectado corresponde a:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T^a} = \frac{5V - 0V}{100^{\circ}C - 0^{\circ}C} = 0,05 \text{ V}/^{\circ}C$$

Ecuación IV.11

Mediante los siguientes semi-puentes que se muestran a continuación y con los datos obtenidos anteriormente, se consiguen los valores Va y Vb con la finalidad de conocer la ganancia total del sistema.

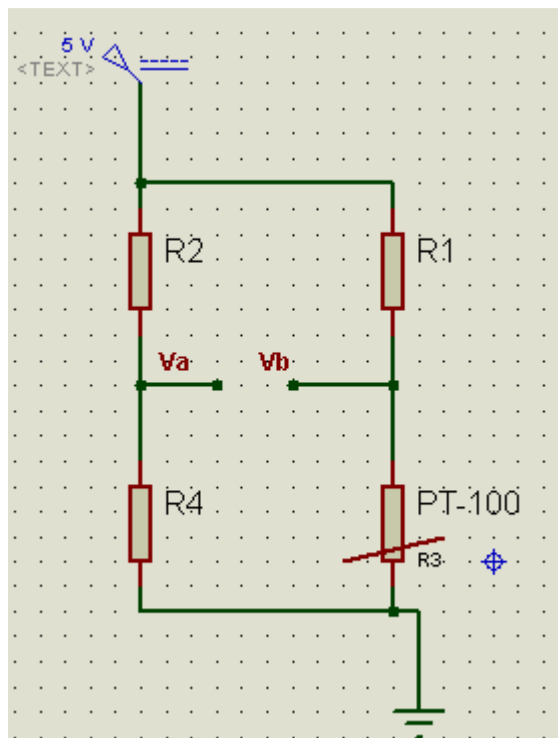


Figura V.41. Diferencial Va-Vb del puente de Wheatstone

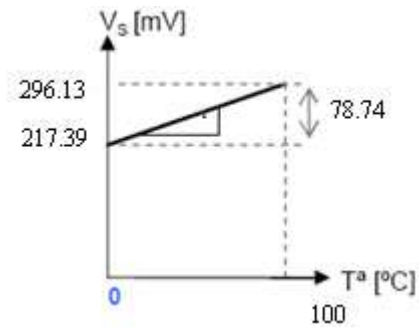


Figura V.42. Voltaje total a 100 ° C

Semi-puente A

$$V_a = V_{cc} \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$

$$V_a = 5 \frac{100}{2200 + 100}$$

$$V_a = 217.39 \text{ mV}$$

Semi-puente B

$$R_3 = 100\Omega(1 + 0.00385 \times 100^\circ\text{C})$$

$$R_3 = 138.5\Omega$$

$$V_b = V_{cc} \left(\frac{R_3}{R_3 + R_1} \right)$$

$$V_b = 5 \left(\frac{138.5}{2200 + 138.5} \right)$$

$$V_b = 296.13 \text{ mV}$$

$$V_t = 296.13 - 217.39$$

$$V_t = 78.74 \text{ mV}$$

Ganancia requerida

$$A = \frac{10 \text{ V}}{78.74 \text{ mV}}$$

$$A = 127$$

5.3. Pruebas y Resultados

Las pruebas de funcionamiento fueron realizadas para determinar el comportamiento del módulo y sus componentes principales como son en el horno eléctrico a través de la resistencia calefactora y la interfaz realizada en LabVIEW®, así también se realizó pruebas para la medición de la señal que entregan los sensores de temperatura que se encuentran en el interior del horno. .

Para que el módulo entre en funcionamiento se debe realizar los siguientes pasos:

- Conectar la NI myDAQ con la PC y procede a encender el sistema mediante el botón de arranque.
- Enseguida se visualiza la temperatura que los sensores tanto Pt-100 como la termocupla están marcando a través de un indicador de LabVIEW®.
- Se procede a ingresar el punto de consigna o valor de temperatura a la cual se desea que el horno se mantenga.
- Se visualiza en un indicador grafico como el controlador intenta alcanzar y mantener la temperatura y como el sistema de enfriamiento entra en funcionamiento cuando se ha superado el valor de la temperatura deseada.

Dentro de la interfaz de Labview se muestra los Led`s de control tanto para indicar que la puerta del horno está abierta así como también para indicar que el botón de emergencia ha sido activado, lo que ocasiona que los pulsos entregados tanto al calefactor como a las electroválvulas se mantengan en estado apagado

Al correr el programa en LabVIEW® se verifico que las luces pilotos funcionan adecuadamente así también el pulsador de emergencia y la señal que entregan los sensores de temperatura es la correcta.

Si también se verificó que la señal entregada al calefactor del horno como a las electroválvulas es la correcta y que los tiempos de activación son muy rápidos.

En las pruebas realizadas a los sensores de temperatura se determinó que tanto la termocupla tipo k como el Pt-100 presenta un nivel aceptable de diferencia entre sus valores medidos, como se demuestra en la tabla V.4

Pt-100	100 ° C	75 ° C	50 ° C	35 ° C	23 ° C
Termocupla	98 ° C	74 ° C	48.7 ° C	33.4 ° C	24 ° C

Tabla V.IV. Comparación entre los sensores de temperatura.

A realizar las pruebas de seguridad entre la interfaz realizada en LabVIEW® y el panel de encendido del horno se verificó que cumple con lo establecido en la programación para la activación y desactivación del sistema, como lo demuestra la siguiente tabla de la tabla V.5.

Puerta del Horno	Paro de Emergencia	Botón Inicio	Estado del sistema
ON	ON	ON	OFF
OFF	ON	OFF	OFF
OFF	ON	ON	ON

Tabla V.V. Activación del sistema.

CONCLUSIONES

- Una vez finalizado el proyecto se ha cumplido con los objetivos, se ha analizado diseñado y construido un modulo de control de temperatura controlado por medio de una tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ que permite la utilización de entradas y salidas digitales, así como su programación a través de LabVIEW®. 8.10
- El módulo de temperatura esta básicamente conformado por una parte mecánica constituida por el horno eléctrico y el sistema de enfriamiento forzado, así como también por una interfaz de control desarrollada en LabVIEW® 8.10
- Este módulo que utiliza sensores de temperatura tanto termoresistivos como termocupla satisface plenamente las necesidades para analizar el comportamiento de la variable temperatura en el interior del horno eléctrico.
- El control de la variable temperatura se la realiza mediante un PID encargado de estabilizar el sistema y mantenerlo en la temperatura deseada.
- El sistema de enfriamiento encargado de disipar el calor en el interior del horno eléctrico esta conformado por un conjunto electroneumático de válvulas y un cilindro de doble efecto así como también por una ducha de aire.
- El análisis, diseño y programación de Labview permite el desarrollo e implementación de aplicaciones de control industrial mediante la comunicación con tarjetas de adquisición de datos.
- La aplicación del módulo de temperatura constituye un importante aporte para el aprendizaje de los estudiantes en el campo de instrumentación, sensores y sistemas de control.

RECOMENDACIONES

- Antes de la utilización del modulo de control de temperatura se deben analizar los componentes del que está conformado, ya sean fuentes de alimentación, terminales de entrada y salida, e interconexión de los mismos con interruptores y luces piloto para evitar su mala utilización y deterioro.
- Se debe realizar un manteniendo periódico que garantice la vida útil de este equipo. Esto comprende la revisión y comprobación de sus partes, análisis de conexiones eléctricas entre otros.
- Tener cuidado en las conexiones eléctricas y en elementos electrónicos, ya que una errónea conexión y daño en estos elementos resulta en un mal funcionamiento del equipo.
- En los sensores de temperatura Pt-100 y termocupla realizar la correcta conexión con la Ni myDAQ ya que podría ocasionar que se ingresen niveles de voltaje no deseados o superiores a los que se soporta en los puertos de entrada de la tarjeta adquisición e datos.
- Tener cuidado con la tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ, debido a que si se produce una sobrecarga de voltaje o erróneamente se conecta una alimentación mayor de la necesaria puede ocasionar daños en sus elementos internos.

RESUMEN

Se realizó el análisis, diseño y construcción de un módulo de control de temperatura para el laboratorio de control de la Escuela de Ingeniería en Electrónica en Control y Redes Industriales de la ESPOCH

En la investigación aplicamos el método analítico que parte de la identificación del problema, su planteamiento, la formulación de la hipótesis y su posterior aplicación. Los materiales utilizados para la realización del módulo de temperatura consta en su parte mecánica de un horno de tol y fibra de vidrio, de una resistencia eléctrica de 500 watts de potencia, un panel de control donde se encuentran ubicadas las fuentes de alimentación, y luces piloto tipo alarma de color rojo y verde, dentro de la parte del sistema de enfriamiento tenemos electroválvulas, regulador de presión, un cilindro de doble efecto y una ducha de aire neumática, dispone de un sensor Pt-100 y una termocupla tipo K para medir la temperatura, además se dispone de un puente de Wheastone para el acondicionamiento de la señal. El software utilizado para la interfaz es LabVIEW® 8.10, así como una tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ encargada de realizar la comunicación entre la interfaz de control y el horno eléctrico.

Los resultados obtenidos en el módulo de temperatura demuestran que presenta un 98% de estabilidad lo que indica que es un sistema bastante confiable, además presenta tiempos de respuesta muy rápidos para alcanzar y mantener el punto de consigna deseado, logrando controlar la variable temperatura.

La construcción del módulo de temperatura constituye un importante aporte para el aprendizaje de los estudiantes en el campo del Control Industrial. Permite observar la utilización de diferentes sensores de temperatura y actuadores, su cableado y programación en el software. Además, es una herramienta clara de simulación de procesos existentes en la industria actual logrando así que el nivel técnico adquirido por los estudiantes en el transcurso de su carrera se encuentre fortalecido.

Se recomienda integrar el módulo didáctico de control de temperatura en las materias de instrumentación, sensores y sistemas de control.

SUMMARY

Analysis, design and construction of a temperature control module were carried out for the control laboratory of Electronics Engineering School in Control and Industrial Networks of the ESPOCH.

In the investigation the analytical method was applied which starts from the problem identification, its exposition, the hypothesis formulation and its later application. The materials used for the accomplishment of the temperature module consist in its mechanical part by a toloven and glass fiber. It has an electrical resistance of 500 watts of power, a Control Panel where the power supplies are located and pilot lights and alarm in red and green color, within the cooling system we have electro-valves, pressure controller, a double effect cylinder and a pneumatic air shower, it has a Pt-100 sensor and a thermocouple of K type to measure the temperature, in addition it has a Wheastonebridge to the signal preparation. The software used for the interface is LabVIEW® 8.10, as well as a data acquisition card NI myDAQ in charge of doing the communication between the control interface and the electrical oven.

The results obtained in the temperature module present a 98% of stability which means that it is a quite reliable system, in addition presents very fast response times to reach and maintain the wished setpoint, managing to control the temperature variable.

The construction of a temperature module constitutes an important contribution for the students' learning in the industrial Control field. It permits to observe the use of different temperature sensors and actuators, its wiring and programming in software.

In addition it is a clear simulation tool of existing processes in the present industry getting that the technical level acquired by the students in the course of their career is fortified.

It is recommended to integrate the didactic module of temperature control in the following subjects: instrumentation, sensors and control systems

GLOSARIO

Acondicionamiento: proceso de mejorar la salida de una señal amplificándola hasta un nivel adecuado para su posterior procesamiento.

Daq: Tarjeta de adquisición de datos tales como señales de voltaje o audio para aplicaciones electrónicas y de automatización.

Energía térmica: Energía irradiada producto del contacto de varios cuerpos al interactuar entre sí.

Error: Es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real.

Proceso: Operación que conduce a un resultado determinado.

Planta: Es el elemento físico que se desea controlar. Planta puede ser: un motor, un horno, un sistema de disparo, un sistema de navegación, un tanque de combustible, etc.

Retardo: Lentitud en un sistema para alcanzar el punto de consigna.

Sensor: Dispositivo que a partir de la energía del medio en que se mide proporciona una salida de señal transductible que es función de la magnitud que se pretende medir.

Sensibilidad: Expresa la repercusión que tiene en la salida del sensor un incremento en la magnitud de entrada.

Sistema: Consiste en un conjunto de elementos que actúan coordinadamente para realizar un objetivo determinado.

Señal de salida: Es la variable que se desea controlar (posición, velocidad, presión, temperatura, etc.). También se denomina variable controlada.

Señal de referencia: Es el valor que se desea que alcance la señal de salida.

Señal de Control: Es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya, o elimine, el error.

Señal analógica: Es una señal continua en el tiempo.

BIBLIOGRAFIA GENERAL

- 1.- BOLTON, W; Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería; 3a. ed.
Guadalajara-México; Alfaomega; 2006; Pp.100-150
- 2.- CREUS SOLÉ, ANTONIO; Neumática e Hidráulica;
México -México; Alfaomega; 2007; Pp.37-214
- 3.- DORF, RICHARD C; Sistemas de Control Moderno; 10 ed.
Los Ángeles-Estados Unidos; Prentice Hall; 2000; Pp.70
- 4.- OGATA, KATSUHIKO; Ingeniería de Control Moderna; 3a. ed.
Guadalajara-México; McGraw- Hill; 1998; Pp.55-224
- 5.- PALLAS, RAMÓN; Adquisición y Distribución de Señales; 2a. ed.
Madrid-España; Columbus; 1993; Pp.52-112
- 6.- PROAKIS, J.G; Tratamiento Digital de Señales; 3a. ed.
Los Ángeles-Estados Unidos; Prentice Hall; 1999; Pp.112-125
- 7.- RASHID, MUHAMMAD H; Electrónica de Potencia; 3a. ed.
México-México; Pearson Prentice; 2004; Pp.70

1.- **SISTEMAS SCADA**

www.personal.redestb.es/efiguera/memoria.htm.

2011-06-14

www.colsein.com.co

2011-06-14

2.- **ALGORITMO DE CONTROL PID**

http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo

2011 -08 -02

<http://www.ijee.dit.ie/articles/Vol16-3/ijee1129.pdf>

2011-06-10

3.- **SENSORES DE TEMPERATURA**

<http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/instindustrial/teorico/080>

[306- Sensores-parte II.temperatura.pdf](#)

2011-03-14

[http://www.danfoss.com/Latin_America_spanish/BusinessAreas/Industrial](http://www.danfoss.com/Latin_America_spanish/BusinessAreas/IndustrialControls/Products_pdf/Temperature+Sensors.htm)

[alControls/Products_pdf/Temperature+Sensors.htm](#)

2011-06-01

4.- **VÁLVULAS**

www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml

2011-06-01

ANEXOS

Módulo de Control de Temperatura

Prácticas de Laboratorio N° 1

Sensor Pt-100

Objetivos de la Práctica.

- Analizar el comportamiento del sensor Pt-100.
- Medir la señal entregada por el sensor Pt-100.
- Determinar la forma de acondicionamiento de un sensor Pt-100

Información preliminar:

El fundamento del Pt-100 es la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura.

El principio de medición de temperatura por resistencia, se basa en la capacidad de los metales de variar su resistividad en función de la temperatura, siendo ésta directamente proporcional con la temperatura.

El platino es el metal más utilizado pues aunque el níquel presenta mayor sensibilidad el platino es más lineal y sobre todo tiene una resistividad mayor.

Un valor típico es el que presentan a 0°C, que para el platino es de 100 Ω , lo que da origen al nombre de Pt100.

Acondicionamiento:

La forma más habitual de transformar la variación de resistencia de la PT-100 a señal eléctrica es la utilización de un puente de Wheatstone con el método de deflexión, donde en uno de las ramas de los divisores de tensión se conecta la PT-100 y entre los terminales Va y Vb se mide la diferencia de tensión.

El objetivo de implementar esta estructura es obtener en la termoresistencia a temperatura 0 °C el valor correspondiente a 100 ohmios y una tensión diferencial (Vb - Va) de 0 V, como se muestra en la figura 1

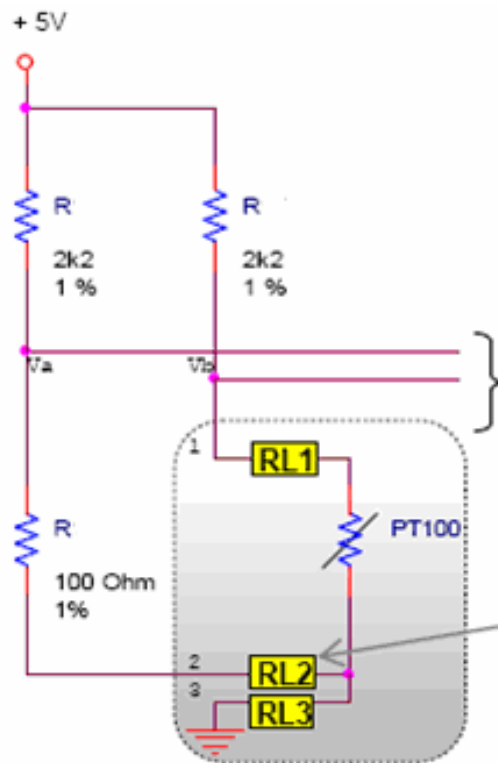


Figura1. Pt-100 de tres hilos.

Procedimiento de la práctica:

1. Conectar la NI myDAQ con la PC y proceder a encender el sistema mediante el botón de arranque.
2. Conectar los cables negro y rojo entre la salida del puente de Wheatstone y la entrada a la NI my DAQ ubicadas en el panel de encendido
3. Visualizar la temperatura que el sensor Pt-100 están marcando a través de un indicador numérico de LabVIEW.
4. Observar como al aumentar la temperatura en el interior del horno el sensor comienza a variar su medida de una forma casi lineal.
5. Conectar un multímetro en la misma salida del puente de Wheatstone y anotar los valores que este marca conforme aumenta la temperatura en la tabla.

Temperatura °C	100	75	50	25
Voltaje [mV]				

Conclusiones:

Básicamente con el puente de Wheatstone se logra obtener en la termoresistencia a temperatura 0 °C el valor correspondiente a 100 ohmios y una tensión diferencial ($V_b - V_a$) de 0 V, es decir mientras el valor medido por el Pt-100 siga variando, la salida del puente será una señal de voltaje distinta de cero.

Módulo de Control de Temperatura

Prácticas de Laboratorio N° 2

Medir señales usando el osciloscopio NI ELVISmx con NI myDAQ

Objetivos de la Práctica.

- Determinar las funciones de la librería NI ELVISmx.
- Graficar señales desde el PC a través de el osciloscopio virtual de la NI myDAQ
- Medir señales de corriente, voltaje o continuidad de circuitos electrónicos.

Información preliminar.








Con NI ELVISmx, el dispositivo NI myDAQ tiene un Express VI asociado a LabVIEW.

Este Express VIs te permite adquirir y medir señales de entrada como voltaje, corriente o el valor de resistencias de un circuito electrónico a través de la PC sin necesidad de usar un multímetro.

Esto te capacita a desarrollar aplicaciones de LabVIEW sin realizar una programación demasiado extensa.

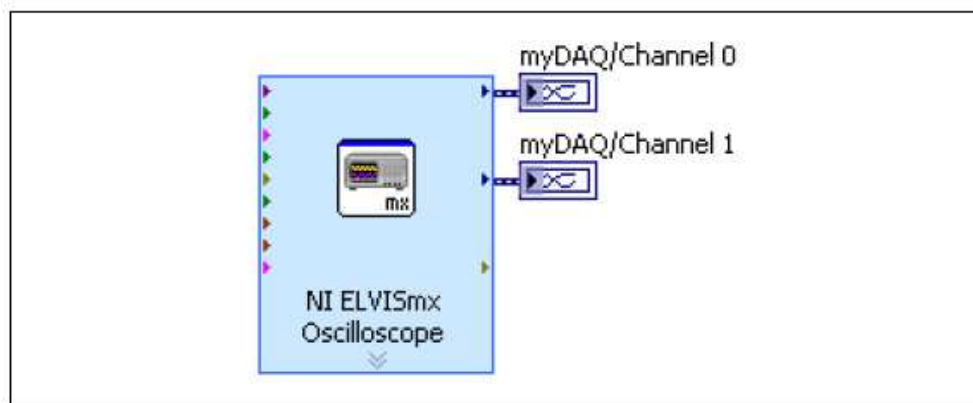
Para acceder al NI ELVISmx Express VIs, abre un diagrama de bloques en Labview y selecciona **Measurement I/O»NI ELVISmx** de la paleta de funciones.

La tabla muestra los NI ELVISmx Express Vis disponibles:

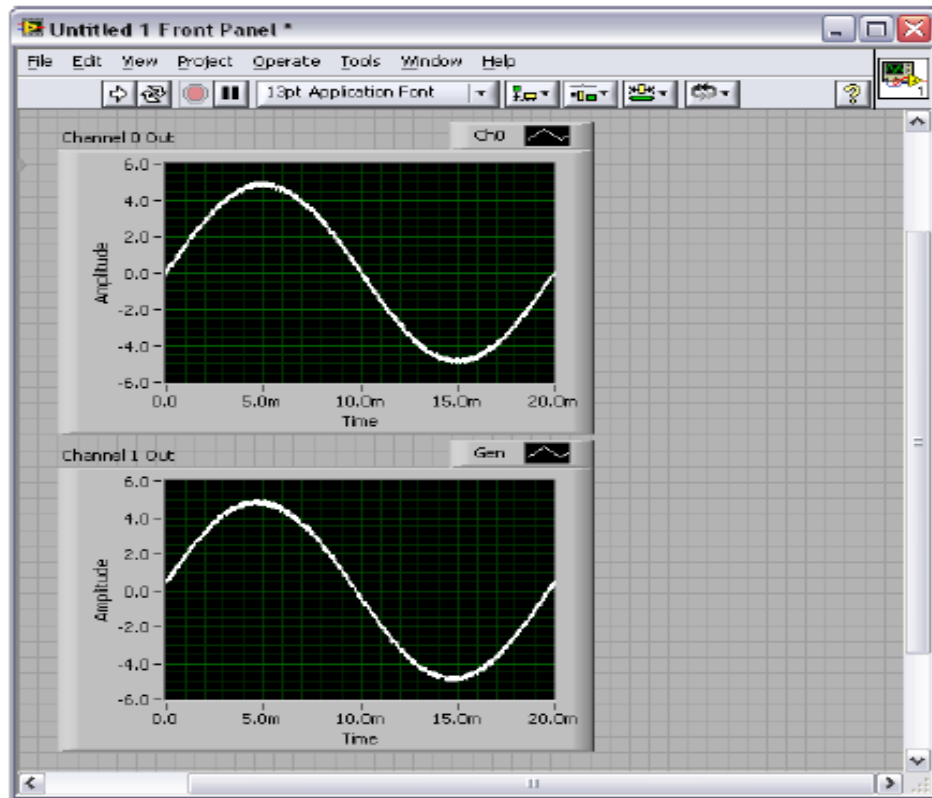
NI ELVISmx Express VI			
 NI ELVISmx Arbitrary Waveform Generator	 NI ELVISmx Bode Analyzer	 NI ELVISmx Digital Reader	 NI ELVISmx Digital Writer
 NI ELVISmx Digital Multimeter	 NI ELVISmx Function Generator	 NI ELVISmx Oscilloscope	—

Procedimiento de la práctica 2

1. Abrir LabVIEW.
2. Click en Blank VI., seleccionar **Window»Show Block Diagram**
3. Para abrir la paleta ELVISmx Express VI , click derecho sobre la ventana del diagrama de bloques para abrir la paletas de funciones y seleccionar **Measurement I/O»NI ELVISmx**
4. Conectar las señales que desees medir a las puntas del dispositivo NI myDAQ.
5. En el tab Configuración seleccione para medir canal 0 o canal 1.
6. si es necesario click en AUTO SETUP para automáticamente configurar los parámetros del osciloscopio.
7. en el diagrama de bloques, pick derecho sobre el Terminal de salida Channel 0 y seleccionar **Create»Graph Indicador**, esto crea un **indicador gráfico** sobre el panel frontal para visualizar la señal de dato.



8. click sobre el botón RUN para comenzar a adquirir la las mediciones.



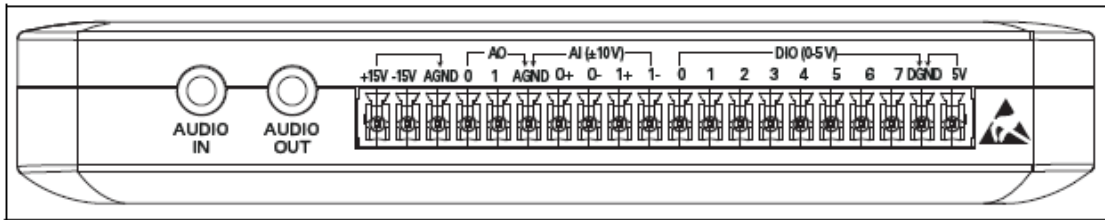
Conclusiones:

Como podemos apreciar el Elvismx de la NI my Daq se convierte en una herramienta muy importante a la hora de medir señales desde un PC, es decir se convierte en un instrumento que actúa tanto como un osciloscopio permitiéndonos observar las formas de señales de entrada así también se lo puede utilizar como multímetro digital

Componentes de la NI myDAQ

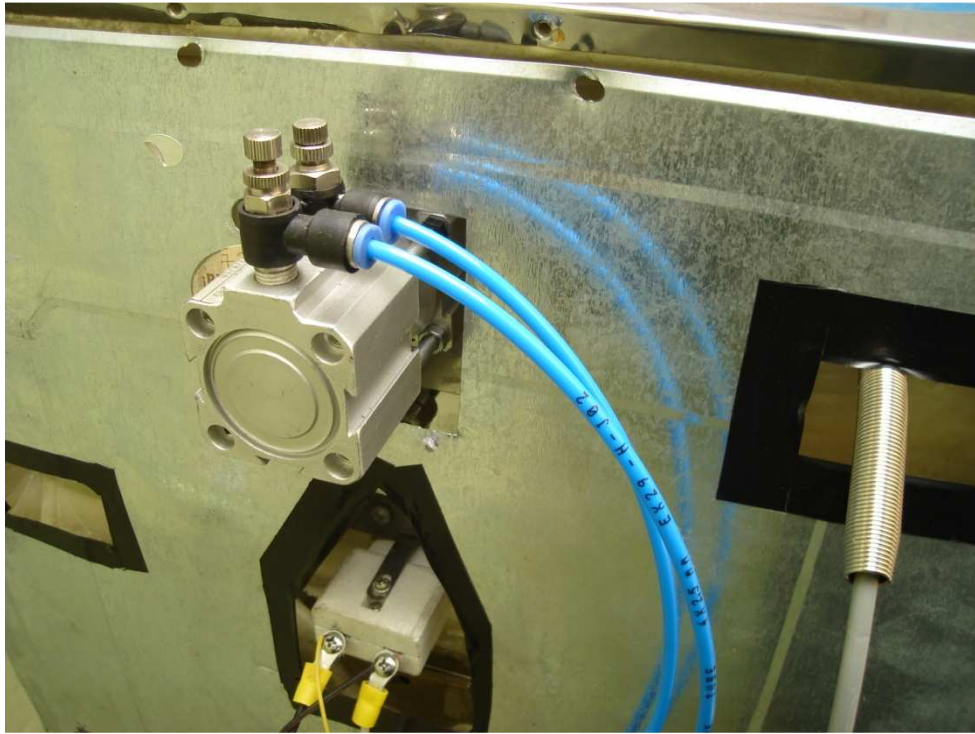
Texas Instruments Integrated Circuit (IC)	Part Number	Description
Current-Limited Power Distribution Switch	TPS2553	This is used for applications where precision current limiting is required or heavy capacitive loads and short circuits are encountered.
Regulator	TPS61170	This is a monolithic high-voltage boost regulator with an integrated 1.2 A, 40 V power MOSFET.
Regulator	TPS62007	The TPS6200x devices are a family of low-noise synchronous step-down DC-DC converter that is ideally suited for systems powered from a one-cell Li-ion battery or from a two- to three-cell NiCd, NiMH, or alkaline battery.
Regulator	TPS62003	
LDO Regulator	TPS71501	These are low-dropout (LDO) voltage regulators, offering the benefits of low noise, low-dropout voltage, low-power operation, and miniaturized packages.
LDO Regulator	TPS76433	
Digital Isolator	ISO7241A	This is a quad-channel digital isolator with multiple channel configurations and output enable functions.
Shift Register	SN74AHC595	This device contains an 8-bit serial-in, parallel-out shift register that feeds an 8-bit D-type storage register.
Switch	TS5A23159	This is a dual single-pole double-throw (SPDT) analog switch designed to operate from 1.65 V to 5.5 V.
Operational Amplifier	TLC2262	This is a dual low-noise rail-to-rail operational amplifier.
Operational Amplifier	TL062C	This JFET operational amplifier features high input impedance, wide bandwidth, high slew rate, low input offset, and input bias currents.

Distribución de los puertos de la NI myDAQ.

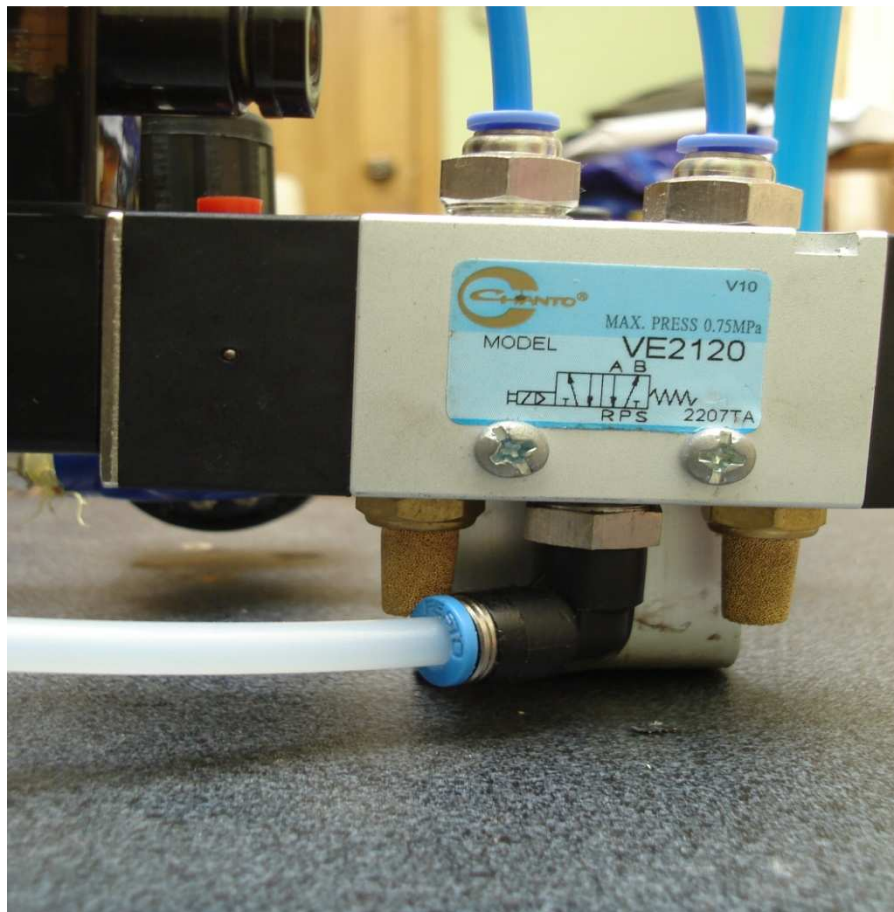


Signal Name	Reference	Direction	Description
AUDIO IN	—	Input	Audio Input —Left and right audio inputs on a stereo connector
AUDIO OUT	—	Output	Audio Output —Left and right audio outputs on a stereo connector
+15V/-15V	AGND	Output	+15 V/-15 V power supplies
AGND	—	—	Analog Ground —Reference terminal for AI, AO, +15 V, and -15 V
AO 0/AO 1	AGND	Output	Analog Output Channels 0 and 1
AI 0+/AI 0-; AI 1+/AI 1-	AGND	Input	Analog Input Channels 0 and 1
DIO <0..7>	DGND	Input or Output	Digital I/O Signals —General-purpose digital lines or counter signals
DGND	—	—	Digital Ground —Reference for the DIO lines and the +5 V supply
5V	DGND	Output	5 V power supply

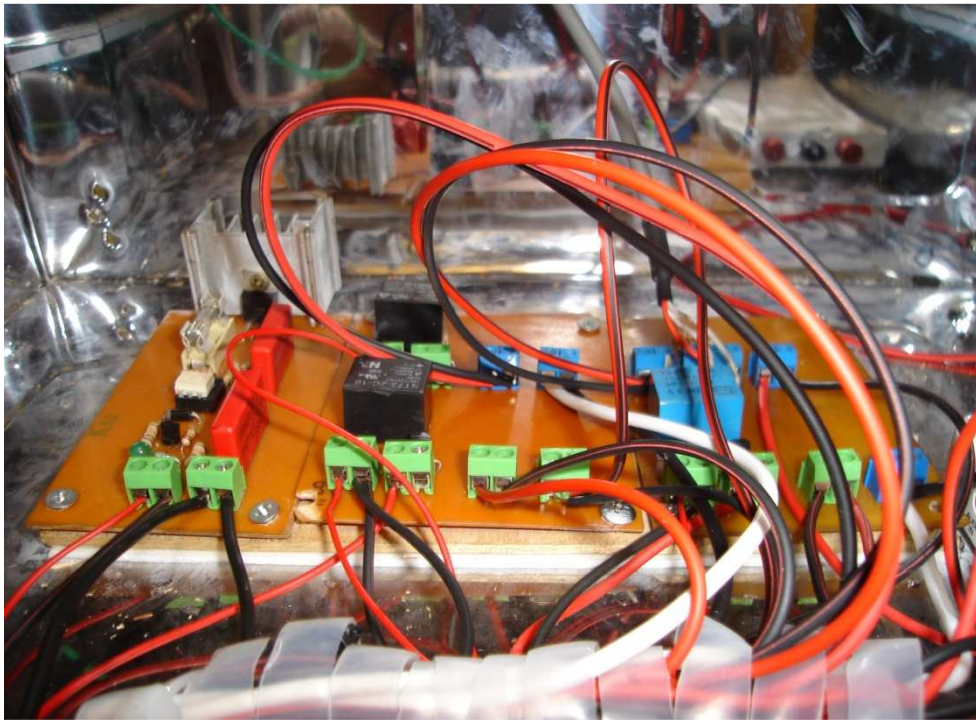
Parte posterior del módulo de temperatura



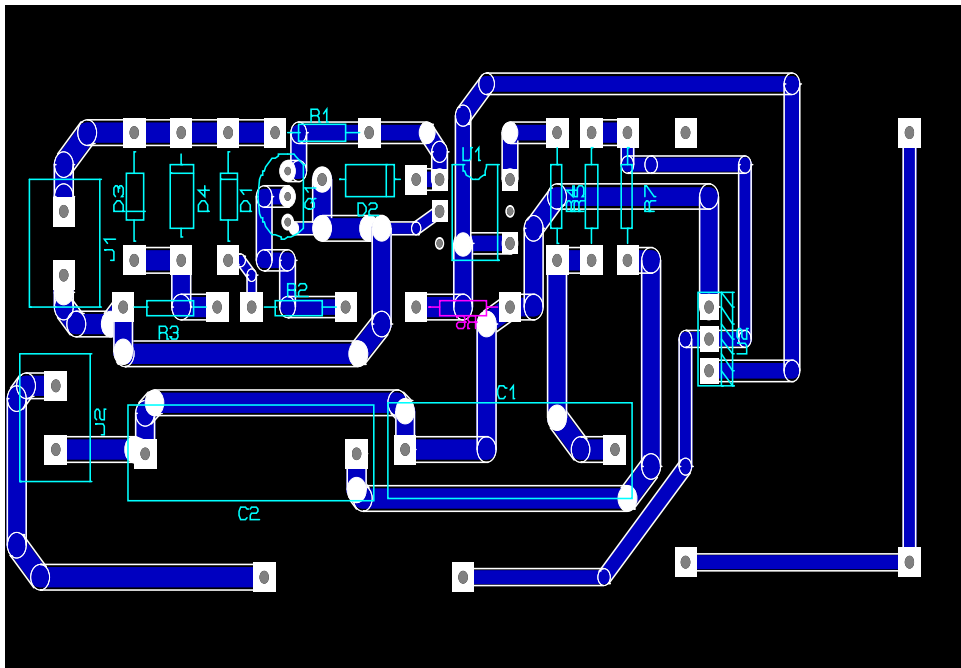
Electroválvula del sistema de enfriamiento.



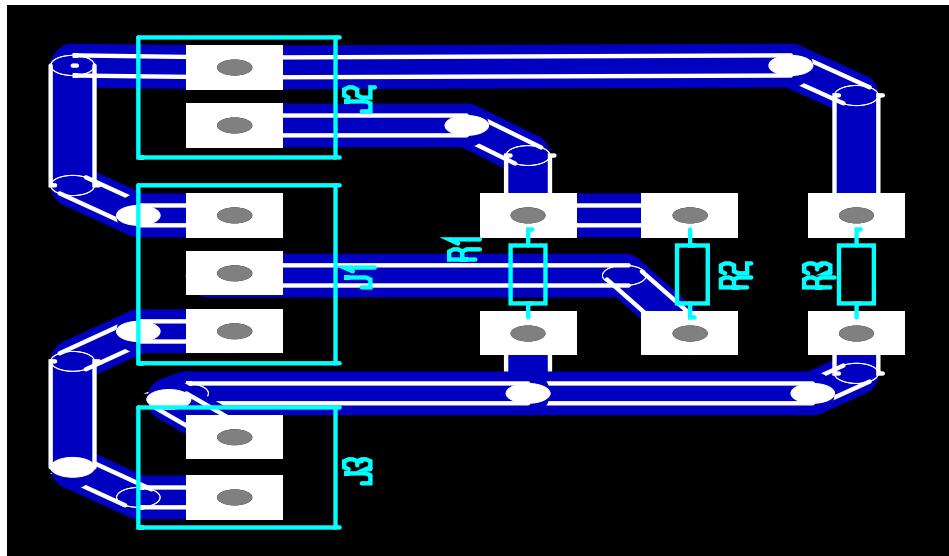
Placa de Activación y Potencia



Diseño del circuito impreso del circuito de potencia



Diseño del circuito impreso del circuito Puente de Wheastone



Diseño del circuito impreso del circuito de activación de las electroválvulas

