

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE INGENIERÍA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DE  
TEMPERATURA PARA EL AMILÓGRAFO BRABENDER**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**EDGAR MAURICIO MAILA MAILA**

**DIRECTOR: DR. LUIS CORRALES**

**Quito, noviembre del 2005**

## DECLARACIÓN

Yo, Edgar Mauricio Maila Maila, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y normatividad vigente.

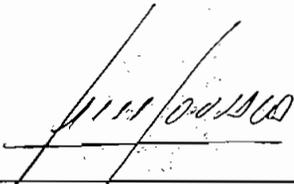


---

Edgar Mauricio Maila Maila

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edgar Mauricio Maila Maila, bajo mi supervisión.



---

Dr. Luis Corrales  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por su guía y presencia constante durante toda mi vida.

Agradezco a los profesores de la Escuela Politécnica Nacional por haberme brindado sus conocimientos y sabiduría para culminar exitosamente la carrera y ser un buen profesional.

Agradezco al ingeniero Pablo Pólit, Jefe del Departamento de Ciencia de los Alimentos y Biotecnología de la E.P.N. por haberme brindado su confianza y dado la oportunidad de realizar el proyecto de titulación.

Mi gratitud para el doctor Luis Corrales por su dedicación e invaluable ayuda.

## DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por el inmenso apoyo, amor y dedicación durante toda mi vida.

# ÍNDICE

	Páginas
RESUMEN .....	i
PRESENTACIÓN.....	ii
 <b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN GENERAL AL PROBLEMA</b>	
1.1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3 OBJETIVO.....	5
1.4 ALCANCE.....	5
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	6
 <b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA CON RTD Y EL TIPO DE CONTROL</b>	
2.1 INTRODUCCIÓN .....	8
2.2 DESCRIPCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA RESISTIVO MEDIANTE CONDUCTORES (RTD).....	8
2.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN CON RTD.....	12

2.3.1	MÉTODO DEL PUENTE DE WHEATSTONE.....	12
2.3.2	MÉTODO DE LA FUENTE DE CORRIENTE.....	14
2.3.3	SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO SELECCIONADO .. .....	15
2.4	<b>SISTEMAS DE CONTROL Y ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL ....</b>	17
2.4.1	SISTEMAS DE CONTROL.....	17
2.4.1.1	Sistema de control en lazo abierto .....	17
2.4.1.2	Sistema de control en lazo cerrado.....	18
2.4.1.3	Diagrama de bloques de un sistema de control .....	18
2.4.2	ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL.....	19
2.4.2.1	Acción de control on/off.....	19
2.4.2.2	Acción de control proporcional.....	20
2.4.2.3	Acción de control integral.....	21
2.4.2.4	Acción de control proporcional – integral .....	22
2.4.2.5	Acción de control proporcional – derivativa.....	23
2.4.2.6	Acción de control proporcional-integral-derivativa.....	23
2.4.3	SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA ACCIÓN DE CONTROL .	24
2.5	<b>SOLUCIÓN PROPUESTA.....</b>	26
2.6	<b>ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....</b>	27
2.6.1	INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LOS BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	27
2.6.2	ESPECIFICACIONES DEL HARDWARE .....	28

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

3.1	INTRODUCCIÓN .....	32
3.2	CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO.....	32

<b>3.3</b>	<b>CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SENSOR DE TEMPERATURA Pt100.....</b>	<b>33</b>
<b>3.4</b>	<b>DISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE LA Pt100 .....</b>	<b>33</b>
	3.4.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DE LA FUENTE DE CORRIENTE.....	34
	3.4.2 DISEÑO DEL CIRCUITO AMPLIFICADOR .....	37
	3.4.3 DISEÑO DEL FILTRO BUTTERWORTH PASABAJOS DE -40 .....	
	DB/DÉCADA .....	41
	3.4.4 DISEÑO DEL CIRCUITO DETECTOR DE RTD .....	44
<b>3.5</b>	<b>CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE LOS ACTUADORES.....</b>	<b>45</b>
<b>3.6</b>	<b>DISEÑO DEL CIRCUITO PARA CONTROL DE LA NIQUELINA.....</b>	<b>47</b>
	3.6.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DETECTOR DE CRUCE POR CERO....	51
<b>3.7</b>	<b>DISEÑO DEL CIRCUITO PARA CONTROL DE LA ELECTROVÁLVULA .....</b>	<b>54</b>
<b>3.8</b>	<b>DISEÑO DEL CIRCUITO PARA EL AGITADOR.....</b>	<b>56</b>
<b>3.9</b>	<b>DISEÑO DEL CIRCUITO PARA LA ALARMA.....</b>	<b>59</b>
<b>3.10</b>	<b>FUENTE DE ALIMENTACIÓN SELECCIONADA.....</b>	<b>60</b>

## **CAPÍTULO 4**

### **DISEÑO DEL HARDWARE Y SOFTWARE PARA EL MICROPROCESADOR PIC 16F877A**

<b>4.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>64</b>
<b>4.2</b>	<b>DISEÑO DE LOS CIRCUITOS PARA LA INTERFAZ CONTROLADOR / USUARIO .....</b>	<b>64</b>
	4.2.1 POLARIZACIÓN PARA EL MICROPROCESADOR PIC16F877A..	65

4.2.2	DISEÑO DEL CIRCUITO PARA LOS PULSADORES .....	65
4.2.3	DISEÑO CIRCUITO DE VISUALIZACIÓN .....	67
4.2.4	DISEÑO DEL CIRCUITO DE SEÑALIZACIÓN .....	67
4.2.5	RESUMEN DE CONEXIONES DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS AL MICROPROCESADOR .....	68
4.3	CONSIDERACIONES PARA EL PROGRAMA .....	69
4.4	DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS PARA EL PROGRAMA.....	70
4.4.1	DISCRETIZACIÓN DE LA ACCIÓN DE CONTROL PID .....	70
4.4.2	GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE RECORTE SÍNCRONO .....	73
4.5	DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL PARA EL MICROPROCESADOR.....	76
4.6	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA .....	76

## CAPÍTULO 5

### PRUEBAS DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA

5.1	INTRODUCCIÓN .....	83
5.2	CALIBRACIÓN DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA .....	83
5.3	PRUEBAS DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE LA PT100 .....	83
5.3.1	REPETIBILIDAD .....	83
5.3.1.1	Primera prueba .....	84
5.3.1.2	Segunda prueba.....	85
5.3.2	LINEALIDAD .....	88
5.3.3	HISTÉRESIS.....	89
5.4	PRUEBAS DEL CIRCUITO ACTUADOR.....	91
5.5	PRUEBA DE TODO EL SISTEMA .....	93

5.5.1 FASE DE CALENTAMIENTO .....	94
5.5.2 FASE" MANTENER CONSTANTE" .....	97
5.5.3 FASE DE ENFRIAMIENTO.....	99

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1 CONCLUSIONES .....	108
6.2 RECOMENDACIONES.....	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1**

**PROGRAMA PARA EL MICROPROCESADOR PIC16F877A**

### **ANEXO 2**

**CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA**

### **ANEXO 3**

**HOJA DE DATOS DE LA Pt100**

### **ANEXO 4**

**ANÁLISIS ECONÓMICO**

### **ANEXO 5**

**MANUAL DEL USUARIO**

## RESUMEN

En este trabajo se realiza la automatización de las tres fases de cocción de la mezcla de productos de almidón que se realizan en el Amilógrafo Brabender que se encuentra instalado en el Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología (DECAB) de la EPN. El objetivo funcional y global era generar una curva de temperatura vs tiempo que consta de tres tramos: ascenso, estabilización y descenso que deberán ajustarse a valores límite y pendientes predeterminadas o ajustables por el operador con un error de  $\pm 0.5$  °C.

Para generar la curva se recurrió a un programa desarrollado en un microprocesador que debe, a más de realizar el control propiamente dicho, maneja periféricos de entrada y salida para lectura del valor de la temperatura, detección del estado de pulsadores, manejo de un display de cristal líquido, controla el encendido de leds y las señales de control para cada uno de los actuadores. Para calentar el sistema se debía utilizar una niquelina y para enfriar se recurrió a un compresor de aire. La niquelina fue controlada por ciclo integral y el compresor por control tipo ON-OFF con histéresis.

Las pruebas realizadas demostraron que la respuesta del sistema es lineal durante todo el rango de trabajo. Se calculó que la histéresis tiene una diferencia de  $0.75$  °C para el ascenso y descenso de la temperatura para un mismo rango de trabajo. También se analizó la repetibilidad para la cual se calculó la desviación estándar obteniéndose un valor de  $\pm 0.28$  °C. Los valores obtenidos durante la calibración del equipo estuvieron por lo mismo dentro de los rangos aceptables para esta aplicación.

Pruebas reales realizadas para mezclas de almidón dieron resultados que satisficieron los requerimientos de gradientes de temperatura, estado estable y tiempos de establecimiento planteados por el DECAB.

## PRESENTACIÓN

En el Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología (DECAB) de la EPN se tiene instalado un "Amilógrafo Brabender" que sirve para medir la viscosidad de mezclas de productos de almidón. Para medir la viscosidad de las mezclas tratadas se requiere tres fases de cocción: calentamiento, mantenimiento y enfriamiento; las mismas que se realizan en forma manual. Estas fases requieren cambios controlados de temperatura, fijación de la misma en un valor constante y el posterior enfriamiento. Estas etapas se realizan con el objetivo de medir la viscosidad de las mezclas tratadas y los resultados sirven para evaluar el estado físico – químico de las mismas.

Con estos antecedentes el DECAB vio la necesidad de construir un controlador de temperatura específico para el Amilógrafo Brabender. El controlador se encargara de la variación de potencia que disipa la níquelina y el ingreso de aire frío para generar la curva de temperatura para cada fase. Con este objetivo se diseña e implementa la solución a este problema en particular y sobre esta tarea se reporta en este trabajo.

En el Capítulo 1, se realiza una introducción general al problema; además se describe los parámetros que se necesitan para realizar el control de las fases de cocción de la mezcla de almidón.

En el Capítulo 2, se realiza el análisis del funcionamiento del transductor de temperatura RTD, así como de los principales métodos que existen para medir la temperatura con el mismo; además se analizan las ventajas y desventajas de las acciones básicas de control que se utilizan en control industrial. También se realiza la selección del método más adecuado para medir la temperatura con RTD para este caso en particular y la selección de la acción de control más adecuada para cada fase del proceso de cocción que realiza el Amilógrafo Brabender.

En el Capítulo 3, se realiza el diseño del circuito acondicionador para el RTD. Se diseña los circuitos de control y fuerza para los actuadores (níquelina,

electroválvula y agitador), para que el microprocesador PIC16F877A pueda realizar el control de todo el sistema.

En el Capítulo 4, se realiza el diseño de la interfaz controlador / usuario y se desarrolla el software que se implemento en el microprocesador para realizar el control de todo el sistema.

En el Capítulo 5, se realiza la calibración del controlador de temperatura y las pruebas de todo el sistema implementado con una mezcla de producto de almidón.

En el Capítulo 6, se realizan las conclusiones y recomendaciones en base a la experiencia adquirida durante la elaboración del proyecto.

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN GENERAL AL PROBLEMA**

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN GENERAL AL PROBLEMA

#### 1.1 INTRODUCCIÓN

En el Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología (DECAB) de la EPN se tiene instalado un “Amilógrafo Brabender” que sirve para medir la viscosidad de mezclas de productos de almidón.

Para medir la viscosidad de las mezclas tratadas se requiere tres fases de cocción: calentamiento, mantenimiento y enfriamiento; mismas que se realizan en forma manual.

1. Calentamiento, se refiere a la subida lineal de la temperatura hacia una temperatura máxima predeterminada, con un gradiente de temperatura.
2. Mantenimiento, donde se mantiene constante la temperatura durante un tiempo predeterminado.
3. Enfriamiento, se refiere a la bajada lineal de temperatura hacia una temperatura determinada, con un gradiente de temperatura.

El Amilógrafo Brabender actualmente tiene instalado un sistema de control de temperatura solo para la parte de calentamiento. Este realiza una acción de control de tipo ON-OFF que opera sobre la niquelina, y no realiza ninguna acción de control para controlar la gradiente de temperatura.

Para la fase de mantenimiento de la temperatura en un valor constante y el enfriamiento, el operador apaga la niquelina e ingresa aire frío, o viceversa, de acuerdo a como esté variando la temperatura.

## 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se requiere diseñar y construir para el Amilógrafo Brabender un controlador que regule la variación de potencia que disipa la niquelina y el ingreso de aire frío para generar la curva de temperatura vs tiempo que se muestra a continuación en la Figura 1.1.

El operador fija los valores de la temperatura: mínima, máxima y enfriamiento, las gradientes de temperatura y el tiempo que debe mantenerse constante el valor de la temperatura para realizar el proceso de cocción.

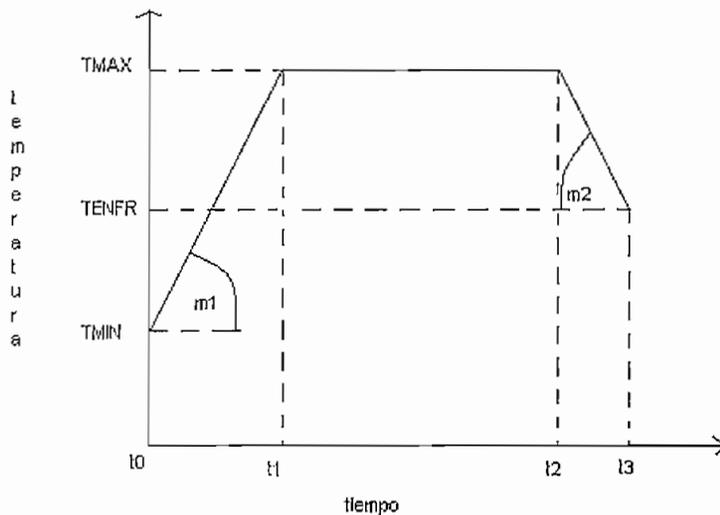


Figura 1.1 Curva temperatura vs tiempo

Tramos de temperatura:

1. Tramo  $[t_0 \text{ a } t_1]$ , es la fase de calentamiento donde la temperatura sube en forma lineal desde la temperatura mínima hasta la temperatura máxima con una gradiente de temperatura ( $m_1$ ).
2. Tramo  $[t_1 \text{ a } t_2]$ , es la fase donde se mantiene constante la temperatura en un valor predeterminado.

3. Tramo [t<sub>2</sub> a t<sub>3</sub>], es la fase de enfriamiento donde la temperatura debe bajar en forma lineal hacia la temperatura de enfriamiento con una gradiente de temperatura (m<sub>2</sub>).

El rango de temperatura y gradiente en el cual trabaja el Amilógrafo Brabender para las diferentes fases son:

	Temperatura	Gradiente
1. Calentamiento	: 25°C a 90°C	0°C/min a 2.1°C/min
2. Mantenimiento	: 90°C	0°C/min
3. Enfriamiento	: 90°C a 55°C	0°C/min a 2.1°C/min

Las pruebas que se realizan con el Amilógrafo Brabender son de tres tipos:

1. Fase de calentamiento.
2. Fase calentamiento + Fase mantener constante la temperatura
3. Fase calentamiento + Fase mantener constante la temperatura + Fase de enfriamiento.

En las tres pruebas anteriormente mencionadas, todos los parámetros de temperatura y gradientes deben ser variables para generar cualquier tipo de prueba. Sin embargo, la tercera prueba es la más utilizada y tiene valores predefinidos que son:

1. Temperatura mínima: 25°C
2. Temperatura máxima: 90°C
3. Temperatura enfriamiento: 55°C
4. Gradiente de calentamiento (m<sub>1</sub>) = Gradiente de enfriamiento (m<sub>2</sub>) = 1.5°C/min
5. Tiempo (fase mantenimiento): 20 minutos

Por lo que se decidió que el controlador debe presentar la opción para realizar esta prueba sin necesidad de cargar los valores de temperatura y gradiente.

Adicionalmente fue disposición del DECAB que se reutilice en este nuevo sistema de control de temperatura, todas las partes/piezas que se encuentran instaladas en el Amilógrafo Brabender; para la fase de enfriamiento se utilice aire ya que en laboratorio se tiene instalado un compresor con este propósito.

Datos de los partes eléctricas del Amilógrafo Brabender a reutilizarse:

Sensor de temperatura	:	Pt100	Rango: 0 a 750° C
Elemento calefactor	:	Niquelina	Vn = 220V P = 500W
Agitador	:	Motor	Vn = 110V P = 1/4Hp

Cabe resaltar el hecho de la obligatoriedad, de uso de un sensor Pt100. Como se comprenderá, este limitante evita el que se pueda buscar otra alternativa. Sin embargo, habrá que demostrar que la Pt100 si es apta para la aplicación que aquí se trata de automatizar.

### 1.3 OBJETIVO

Diseñar un controlador de temperatura específico para el Amilógrafo Brabender perteneciente al Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología.

### 1.4 ALCANCE

1. Diseñar un controlador de temperatura que funcione sobre un rango comprendido entre 25° C a 90° C y que permita cambios de temperatura ascendentes y descendentes con gradientes variables pero que incluya una de 1,5° C/min .

2. Diseñar un controlador que posibilite mantener constante la temperatura en  $90^{\circ}\text{C}$  durante un intervalo de tiempo que puede ser modificado por el operador.
3. Automatizar las tres fases de cocción.
4. Diseñar el controlador para manejar la niquelina que funciona a voltaje nominal de 220 V.

Luego de diseñado, construido el controlador de temperatura, instalado en el Amilógrafo Brabender y realizadas las pruebas de su funcionamiento; el Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología (DECAB) de la EPN será el encargado de su recepción y aceptación así como de emitir la respectiva carta de aceptación del sistema de control que aquí se ha definido.

### 1.5 JUSTIFICACIÓN

El Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología (DECAB) de la EPN presta servicios a la comunidad realizando análisis y estudio de muestras de diferentes productos alimenticios. Dentro de las pruebas que se realizan se encuentra la medición de la viscosidad que es un parámetro importante para evaluar el estado físico – químico de las muestras. El DECAB debe instalar el controlador de temperatura con las características anteriormente mencionadas para garantizar que sus resultados sean correctos.

Con la automatización de las tres fases de cocción el operador ya no tendrá que estar presente durante toda la prueba y podrá dedicarse a otras tareas productivas.

## **CAPÍTULO 2**

### **SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA CON RTD Y EL TIPO DE CONTROL**

## **CAPÍTULO 2**

### **SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA CON RTD Y EL TIPO DE CONTROL**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se realiza el análisis del funcionamiento del transductor de temperatura RTD, así como de los principales métodos que existen para medir la temperatura con el mismo; además se analizan las ventajas y desventajas de las acciones básicas de control que se utilizan en control industrial.

El objetivo que se persigue en este capítulo es hacer la selección del método más adecuado para medir la temperatura con RTD para este caso en particular. Adicionalmente realizar la selección de la acción de control más adecuada para cada fase del proceso de cocción que realiza el Amilógrafo Brabender.

#### **2.2 DESCRIPCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA RESISTIVO MEDIANTE CONDUCTORES (RTD)**

La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de la característica de resistencia en función de la temperatura propia del elemento de detección. El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino de un conductor adecuado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.

El material del conductor se caracteriza por el llamado "coeficiente de temperatura de resistencia" que expresa, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

La relación entre estos factores se presenta a continuación en la expresión lineal siguiente:

$$R_{rtd} = R_o(1 + \alpha t) \quad \text{Ec. [2.1]}$$

En la que:

$R_o$  = Resistencia en ohmios a  $0^\circ \text{C}$

$R_{rtd}$  = Resistencia en ohmios a  $t^\circ \text{C}$

$\alpha$  = Coeficiente de temperatura de la resistencia

Si la relación resistencia-temperatura no es lineal la ecuación general pasa a:

$$R_{rtd} = R_o(1 + \alpha t + \beta t^2 + \delta t^3 + \dots) \quad \text{Ec. [2.2]}$$

En la que  $\alpha, \beta, \delta, \dots$ , son coeficientes de temperatura de la resistencia.

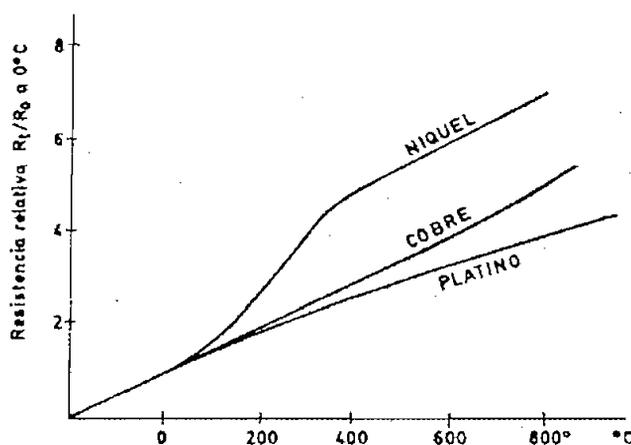


Figura 2.1 Curvas de resistencia relativa de varios metales en función de la temperatura.

En la Figura 2.1 pueden verse las curvas de resistencia relativa de varios metales en función de la temperatura.

Los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer las siguientes características:

1. Poseer un alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será más sensible.
2. Poseer una alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada tanto mayor será la variación por grado (mayor sensibilidad).
3. Tener una relación lineal resistencia-temperatura.
4. Poseer una rigidez y ductilidad, lo que permitirá en los procesos de fabricación, estirar y enrollar el conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).
5. Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

Los materiales que se usan normalmente en las sondas de resistencia son el platino y el níquel.

El platino es el material más adecuado desde el punto de vista de precisión y de estabilidad pero presenta el inconveniente de su costo. En general la sonda de resistencia de platino utilizada en la industria tiene una resistencia de 100 ohmios a  $0^{\circ}\text{C}$ .

El níquel es más barato que el platino y posee una resistencia más elevada con mayor variación por grado, sin embargo, tiene como desventaja la falta de linealidad en su relación resistencia-temperatura y las variaciones que experimenta su coeficiente de resistencia según los lotes fabricados.

El cobre tiene una variación de resistencia uniforme, estable y barato, pero tiene el inconveniente de su baja resistividad.

Metal	Resistividad $\mu\Omega/cm$	Coefficiente temp. $\Omega/\Omega^{\circ}C$	Intervalo útil de temp. $^{\circ}C$	$\phi$ min de kilo mm	Costo relativo	Resist. Sonda a $0^{\circ}C.\Omega$	Precis- ión $^{\circ}C$
Platino	9.83	0.00392	-200 a 950	0.05	Alto	25,100,130	0.01
Níquel	6.38	0.0063 a 0.0066	-150 a 300	-	Medio	100	0.50
Cobre	1.56	0.0425	-200 a 120	-	Bajo	10	0.10

Tabla 2.1 Características de sondas de resistencia

En la Tabla 2.1 se indican las características de las sondas de resistencia de platino, y níquel y de cobre.

En la Figura 2.2 se presenta un RTD donde puede observarse las bobinas que llevan enrollado el hilo de resistencia están encapsuladas y situadas dentro de un tubo de protección o vaina, de material adecuado al fluido del proceso (acero, acero inoxidable 316, hastelloy, monel, etc).

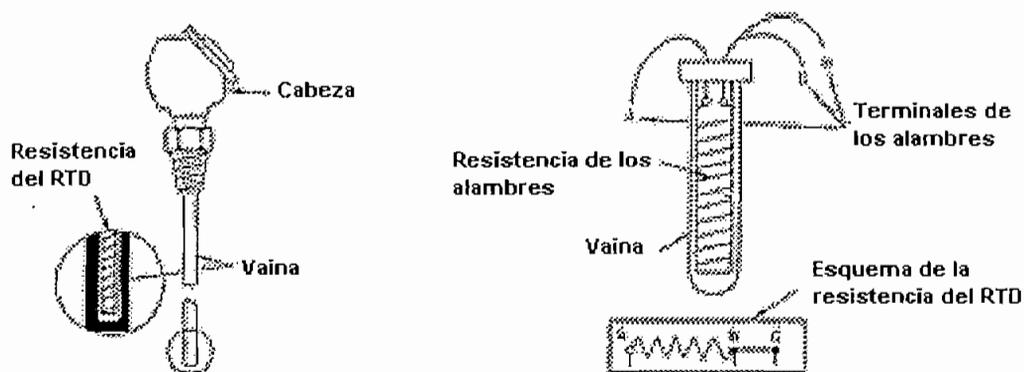


Figura 2.2 Partes que constituyen el RTD

## 2.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN CON RTD

### 2.3.1 MÉTODO DEL PUENTE DE WHEATSTONE

La variación de la resistencia de las sondas es medida con el puente de wheatstone dispuestos en montajes denominados de dos hilos, tres hilos o cuatro hilos, según sean los hilos de conexión de la sonda de resistencia al puente y, por supuesto, dependiendo del grado de exactitud que se quiera obtener.

El montaje a dos hilos que se muestra en la Figura 2.3 la sonda de resistencia se conecta a uno de los brazos del puente y se varía  $R_3$  hasta que se anula la desviación del galvanómetro. En ese momento se cumple la ecuación:

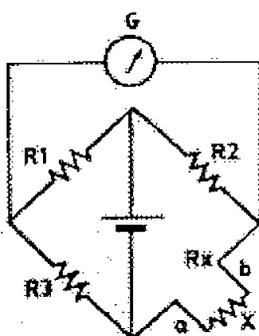


Figura 2.3 Montaje a 2 hilos

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{x} \quad \text{Ec. [2.3]}$$

De la Ecuación [2.3] despejamos  $x$ :

$$x = R_2 * \frac{R_2}{R_1} \quad \text{Ec. [2.4]}$$

Donde  $x$  es el valor de la sonda de resistencia

Es el montaje más sencillo, pero presenta el inconveniente que la resistencia de los hilos  $a$  y  $b$  de conexión de la sonda al puente varía cuando cambia la temperatura, y esta variación falsea por lo tanto el valor correcto de la medición, sin importar si estos hilos sean de baja resistencia (gran diámetro), sean conocidas las longitudes que pueden haber entre el campo y la sonda y el

panel donde esté el instrumento receptor, que añaden una cierta resistencia al brazo de la sonda.

En efecto la ecuación [2.3] pasa a:

$$\frac{R1}{R3} = \frac{R2}{x + K(a+b)} \quad \text{Ec.[2.5]}$$

Donde:

$x$  = valor de resistencia desconocida

$k$  = coeficiente de resistencia por unidad de longitud

$a$  y  $b$  = longitudes de los hilos de conexión de la sonda del puente.

El montaje de dos hilos se emplea con resistencias moderadas del hilo de conexión y cuando la lectura no necesita ser demasiado exacta.

El montaje a tres hilos que se muestra en la Figura 2.4 la sonda está conectada mediante tres hilos al puente. De este modo la medida no es afectada por la longitud de los conductores ni por la temperatura, ya que esta influye a la vez en los dos brazos adyacentes del puente, siendo la única condición que la resistencia de los hilos  $a$  y  $b$  sean exactamente la misma.

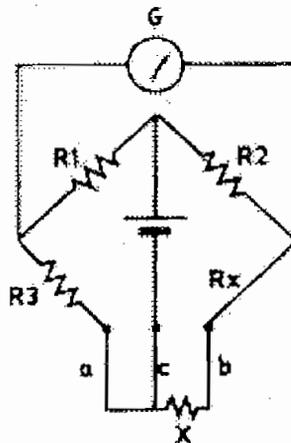


Figura 2.4 Montaje a 3 hilos

En efecto, en la Figura 2.4 puede verse que la ecuación correspondiente es:

$$\frac{R1}{R3 + Ka} = \frac{R2}{x + Kb} \quad \text{Ec. [2.6]}$$

y como  $Ka=Kb$ , haciendo  $R2/R1=1$  puede ajustarse a un valor igual a  $x$  para que el galvanómetro no indique tensión.

El montaje a cuatro hilos que se muestra en la Figura 2.5 se utiliza para obtener mayor precisión posible en la medida, como es el caso de calibración de patrones de resistencia en laboratorio. Se basa en efectuar dos mediciones de la resistencia de la sonda cambiando las conexiones de modo tal que la sonda pase de un brazo del puente al adyacente. De este modo se compensan las resistencias desiguales de los hilos de conexión y el valor de la resistencia equivale al promedio de los valores determinados en las dos mediciones.

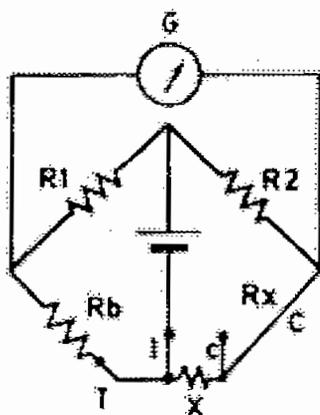


Figura 2.5 Montaje a 4 hilos

### 2.3.2 MÉTODO DE LA FUENTE DE CORRIENTE

La técnica de usar la fuente de corriente con el sensor acoplado al voltímetro diferencial que se muestra en la Figura 2.6 alivia problemas asociados con el puente.

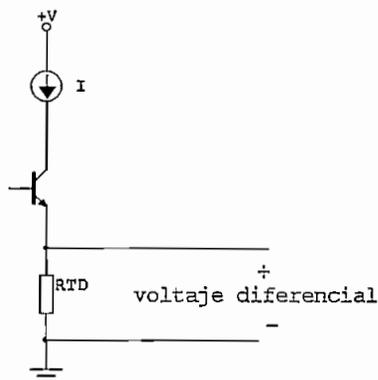


Figura 2.6 Fuente de corriente para RTD

La salida de voltaje leída por el voltímetro diferencial es directamente proporcional a la resistencia del RTD. La medición del voltímetro digital indica solamente la caída de voltaje en el RTD y es insensible a la longitud de los alambres de la carga.

Para mejorar las condiciones de operación de esta técnica es recomendable asegurarse que la fuente de corriente constante tenga valores pequeños, para minimizar el calentamiento adicional que produce el efecto Joule.

### 2.3.3 SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO SELECCIONADO

El método del puente de wheatstone presenta baja sensibilidad a la variación de la resistencia del RTD, además la relación entre el voltaje de salida del puente y la variación de la resistencia del RTD no es del todo lineal.

Para solucionar este problema se decide implementar el método de la fuente de corriente debido que la salida de voltaje leída por el voltímetro diferencial es directamente proporcional a la resistencia del RTD. La medición del voltímetro digital indica solamente la caída de voltaje en el RTD.

El montaje del RTD se lo realiza con el método de dos hilos debido a la simplicidad del montaje con respecto a los otros métodos, además por que el sensor se encuentra a una distancia máxima de un metro con respecto a su circuito de acondicionamiento de señal. Esta distancia esta dentro del rango

que específica, para su instalación, el fabricante ya que esta puede ser instalada sin ningún problema a unos 30 metros con respecto al circuito acondicionador. El alambre que recomienda el fabricante para la extensión de hasta 30 metros es de tipo AWG 18 de cobre.

Por estas razones se escoge este método ya que la influencia de la resistencia de los cables no va a influir mucho en el resultado de la medición.

En la siguiente Figura 2.7 se muestra el circuito equivalente del RTD, para determinar exactamente la resistencia eléctrica  $R(t)$  del RTD sin que influya en la lectura la resistencia de los cables  $R_c$ .

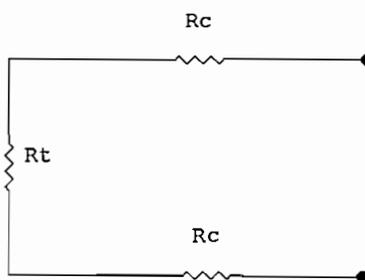


Figura 2.7 Circuito equivalente del RTD

Por ejemplo si la  $T_1 = 80^\circ C$

Reemplazando la temperatura en la ecuación [2.1] resulta:

$$R_{rtd} = 100(1 + 0.00392 * 80)$$

$$R_{rtd} = 131.36\Omega$$

Considerando la resistencia de los cables  $R_c$ , entonces la resistencia total del RTD es:

$$R_{rtd} = R(t) + R_c + R_c \quad \text{Ec.}[2.7]$$

La resistencia del cable AWG 18 es  $0.0193 \Omega/m$ .

Entonces, la resistencia del cable  $R_c$  es:

$$R_c = (0.0193\Omega/m) * 1m = 0.0193\Omega$$

Entonces, reemplazando  $R_c$  en la Ecuación [2.7] se tiene:

$$R_{rd} = (131.36 + 0.0193 + 0.0193)\Omega$$

$$R_{rd} = 131.39\Omega$$

Con el valor calculado de la resistencia  $R_{rd}$  se realiza el cálculo de la nueva temperatura.

Despejando T de la Ecuación [2.1]

$$T_2 = \left( \frac{131.39}{100} - 1 \right) / 0.00392$$

$$T_2 = 80.076^\circ C$$

Realizando la comparación entre las temperatura en los dos casos se calcula el error que se comete al utilizar el método de dos hilos con respecto a los otros métodos.

$$E = T_2 - T_1$$

$$E = 80.076 - 80^\circ C = 0.076^\circ C$$

El error obtenido es de  $76m^\circ C$  el cual es tolerable para este caso en particular. Por lo mismo, no es necesario aplicar los otros métodos que son más complejos y encarecen el costo de implementación para esta aplicación.

## 2.4 SISTEMAS DE CONTROL Y ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL

### 2.4.1 SISTEMAS DE CONTROL

#### 2.4.1.1 Sistema de control en lazo abierto

Son los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En otras palabras, en un sistema de control de lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones un sistema en control de lazo abierto no realiza la tarea deseada.

#### 2.4.1.2 Sistema de control en lazo cerrado

En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente.

#### 2.4.1.3 Diagrama de bloques de un sistema de control

En la siguiente Figura 2.8 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control que consiste en un controlador automático, actuador, una planta y un sensor (elemento de medición).

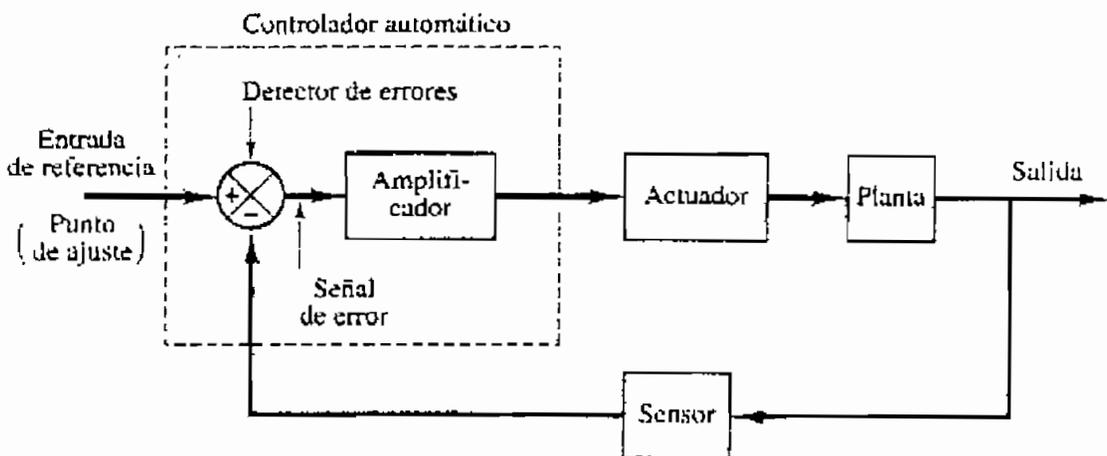


Figura 2.8 Diagrama de bloques de un sistema de control

El controlador detecta la señal de error, que por lo general está en un nivel de potencia muy bajo, y la amplifica a un nivel lo suficiente alto. La salida de un controlador automático alimenta a un actuador.

El actuador es un dispositivo de potencia que produce la entrada para la planta de acuerdo con la señal de control, a fin que la señal de salida se aproxime a la señal de entrada de referencia.

Una Planta puede ser parte de un equipo, talvez un conjunto de partes de una máquina que funcionan juntas, el propósito de la cual es ejecutar una operación en particular.

La Realimentación se puede atribuir a un dispositivo que sensa el estado de la planta y la traduce en una señal que entienda el controlador.

El sensor es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, tal como un desplazamiento a un voltaje que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia.

Transmisor es un dispositivo que manipula la señal que entrega el sensor y las convierte a voltajes o corrientes normalizados.

## **2.4.2 ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL**

### **2.4.2.1 Acción de control on/off**

Es un sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación solo tiene dos posiciones fijas que en muchos casos, son simplemente encendido y apagado.

El control de dos posiciones o de encendido o apagado es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control industrial que no requieren de un seguimiento muy fino de la variable de interés. En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques para el controlador de dos posiciones.

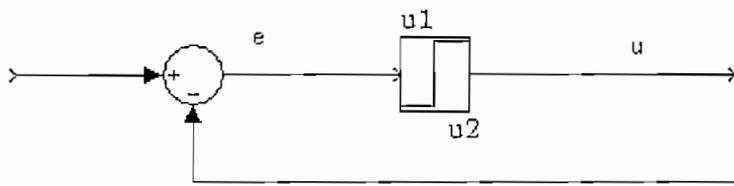


Figura 2.9 Diagrama de bloques de un controlador ON-OFF

$$u(t)=U1 \quad \text{para } e(t)>0$$

$$u(t)=U2 \quad \text{para } e(t)<0$$

Supongamos que la señal de salida del controlador es  $u(t)$  y que la señal de error es  $e(t)$ . En el control de posiciones, la señal  $u(t)$  permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo de si la señal de error es positiva o negativa.

#### 2.4.2.2 Acción de control proporcional

En el modo de control proporcional la posición del dispositivo corrector final es proporcional a la señal de error. En la Figura 2.10 se presenta el diagrama de bloques de tal controlador.

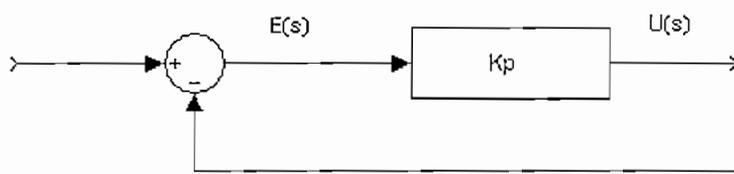


Figura 2.10 Diagrama de bloques de un controlador proporcional

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

$$u(t) = K_p e(t) \quad \text{Ec.[2.8]}$$

ó bien, en cantidades transformadas por el método de laplace.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad \text{Ec.}[2.9]$$

En donde  $K_p$  se considera la ganancia proporcional.

Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación el controlador proporcional, es en esencia un amplificador con una ganancia ajustable.

### 2.4.2.3 Acción de control integral

En un controlador con acción de control integral, el valor de la salida del controlador  $u(t)$  se cambia a una razón proporcional a la señal de error  $e(t)$ . En la Figura 2.11 se presenta el diagrama de bloques de un controlador integral.

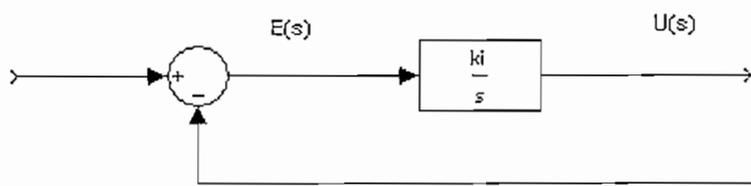


Figura 2.11 Diagrama de bloques de un controlador integral

Es decir,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \text{Ec.}[2.10]$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

En donde  $K_i$  es una constante ajustable. La función de transferencia del controlador integral es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad \text{Ec.}[2.11]$$

Si se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $u(t)$  varía dos veces más rápido. Para un error de cero, el valor de  $u(t)$  permanece estacionario.

#### 2.4.2.4 Acción de control proporcional – integral

En la Figura 2.12 se muestra un diagrama de bloques de este controlador

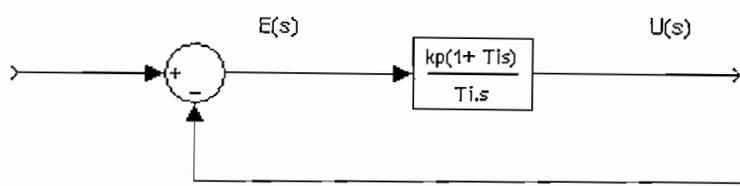


Figura 2.12 Diagrama de bloques control proporcional- integral

La acción de control de un controlador proporcional – integral (PI) se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ec.[2.12]}$$

ó la función de transferencia del controlador es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{Ec.[2.13]}$$

En donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_i$  se denomina tiempo integral. Tanto  $K_p$  como  $T_i$  son ajustables. El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de  $K_p$  afecta las partes integral y proporcional de la acción de control.

El inverso del tiempo integral  $T_i$  se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto.

### 2.4.2.5 Acción de control proporcional – derivativa

En la Figura 2.13 se muestra un diagrama de bloques de este controlador.

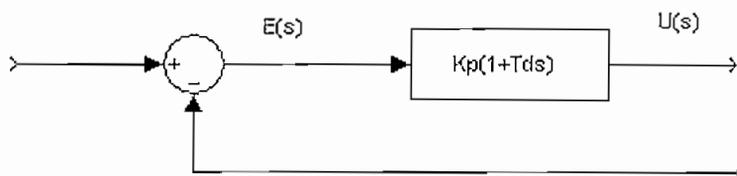


Figura 2.13 Diagrama de bloques de un controlador proporcional-derivativo

La acción de control de un controlador proporcional – derivativa (PD) se define mediante.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ec.[2.14]}$$

y la función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad \text{Ec.[2.15]}$$

En donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_d$  es una constante denominada tiempo derivativo. Tanto  $K_p$  como  $T_d$  son ajustables. La acción de control derivativa, en ocasiones denominada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. El tiempo derivativo  $T_d$  es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional.

### 2.4.2.6 Acción de control proporcional-integral-derivativa

La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional –integral-derivativa.

Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante. En la Figura 2.14 se presenta el diagrama de bloques de este controlador.

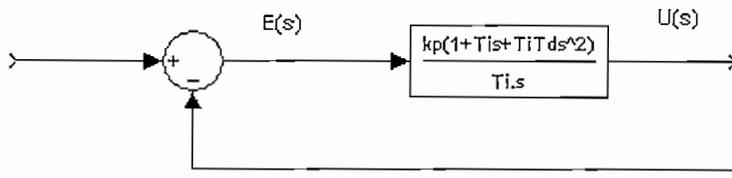


Figura 2.14 Diagrama de bloques del controlador proporcional-integral-derivativo.

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ec.[2.16]}$$

La función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \text{Ec.[2.17]}$$

En donde  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  es el tiempo integral y  $T_d$  es el tiempo derivativo.

### 2.4.3 SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA ACCIÓN DE CONTROL

Generalmente hablando, las características del proceso a controlarse determinan que acción de control debe escogerse para este proceso. En la selección de la acción de control se toma en cuenta cuatro características del proceso importantes: retardo de reacción, atraso de transferencia, atraso de transporte y magnitud de disturbio en la carga.

1. Retardo de reacción. La variable controlada es la temperatura de la mezcla cuando se incrementa repentinamente la cantidad de calor, la temperatura de la mezcla no se incrementa instantáneamente. La razón de este retardo es que el recipiente de la mezcla tiene lo que se

denomina capacidad térmica y la niquelina lo que se denomina resistencia térmica.

La capacidad térmica es la cantidad de energía calorífica que debe incrementarse antes que la temperatura pueda aumentar un cierto valor, está depende del tamaño del recipiente y la cantidad presente de mezcla en el recipiente.

Para este caso en particular el retardo de reacción es moderado debido a que el recipiente es pequeño y por ende la cantidad de mezcla en volumen no es grande.

La resistencia térmica es la oposición al transporte de la energía de un punto a otro, esta depende de la conductibilidad térmica y área de la niquelina.

2. Atraso de transferencia. La temperatura de la mezcla no puede comenzar a subir hasta que la temperatura del aire recirculante entre la camisa y el recipiente haya aumentado, y desde luego, la temperatura del aire recirculante no puede aumentar instantáneamente después de un incremento en la entrada de calor proveniente de la niquelina. Para este caso en particular, el atraso de transferencia es moderado por que la distancia a la que se encuentra la niquelina del recipiente es pequeña, además la camisa encierra el aire caliente generado por la niquelina. Siempre que haya dos constantes de tiempo térmicas existirá atraso de transferencia.
  
3. Atraso de transporte. Está asociado con el medio controlado que se mueve de una localización física a otra en el proceso. Entre menor sea la velocidad de movimiento, peor será el atraso de transporte a mayor distancia entre los dos puntos peor será el atraso de transporte en este caso no existe.

4. Magnitud de disturbio en la carga. Se refiere a como varia la cantidad de volumen de mezcla en un instante de tiempo. En este caso no existe cambio en le volumen de la mezcla.

Estás cuatro características del proceso determinan la naturaleza y dificultad del trabajo de control y por consiguiente que acción de control se necesita. La exactitud de control deseada es también un factor determinante; si puede permitirse que la variable medida se desvíe del valor de referencia en un amplio rango sin que el producto sufra daño.

Para la fase de calentamiento y de fijación en un valor constante de la temperatura se aplica la acción de control proporcional, debido a que el proceso presenta retardos de reacción al proceso moderados, atraso de transferencia moderado, no tiene atraso de transporte y la velocidad de disturbio en la carga no existe. Todos estos parámetros se puede controlar con está acción de control debido a que continuamente se varia la cantidad de calor, a medida que la variable temperatura se aproxima al valor de referencia después de un intervalo de tiempo.

Para la fase de enfriamiento se aplica de la acción de control tipo ON-OFF debido a que la variable temperatura varía lentamente respecto al tiempo.

## **2.5 SOLUCIÓN PROPUESTA**

Para lograr el control de temperatura con el perfil ya indicado se propone un sistema de control digital en lazo cerrado, debido a que se debe capturar la variable temperatura, digitalizarla y manipularla por medio de un algoritmo que ejecuta el microprocesador. Las señales que genera como salida el microprocesador se las debe convertir en analógicas para controlar los distintos actuadores. En lazo cerrado por que reduce el error del sistema.

## 2.6 ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

En la Figura 2.15 se muestra el diagrama de bloques del sistema del control de temperatura del Amilógrafo Brabender, a implementarse. De este sistema se realiza la interpretación física de cada uno de los bloques, así como de las especificaciones para el hardware de cada uno de los bloques.

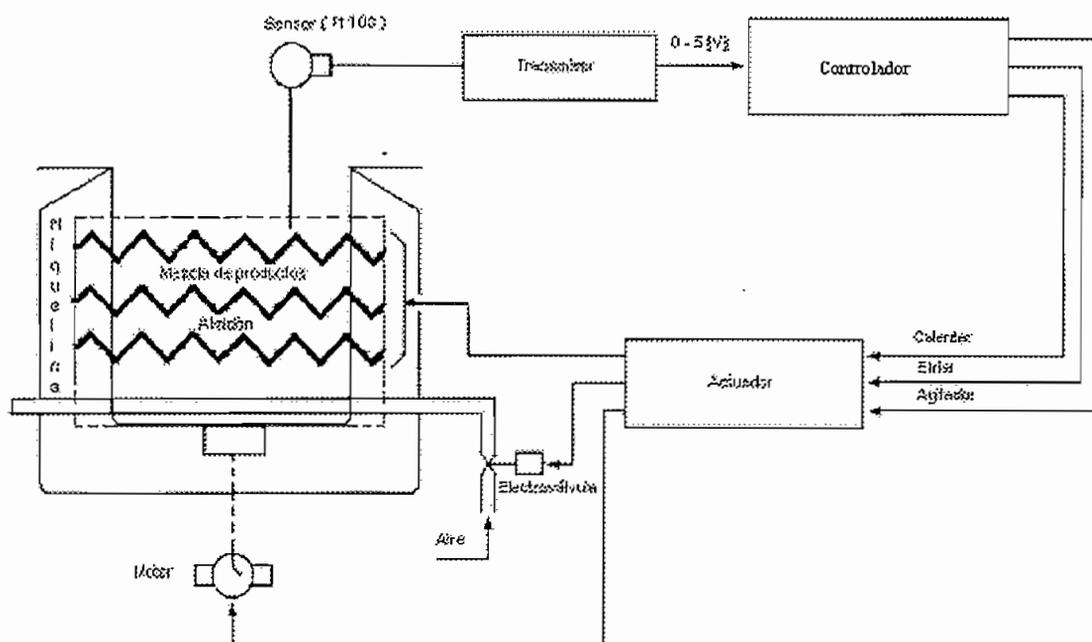


Figura 2.15 Diagrama de bloques del sistema de temperatura

### 2.6.1 INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LOS BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

1. La Planta la constituye el Amilógrafo Brabender.
2. La Realimentación la constituye el sensor y el transmisor.
  - 2.1. El sensor mide la variable temperatura.

2.2. El transmisor es el circuito electrónico con etapas de amplificación filtros etc. La señal que entrega este debe ser entendible con el controlador a utilizarse.

3. El controlador puede estar conformado por comparadores, sumadores, integradores o microcontroladores en esta etapa debe existir interfaz entre el usuario y el sistema.
4. El actuador modifica la variable del proceso que es la temperatura conforme lo ordene el controlador.

### 2.6.2 ESPECIFICACIONES DEL HARDWARE

Los bloques indicados en la Figura 2.15 deberán cumplir con las siguientes funciones:

1. Para medición de la temperatura de la mezcla de productos de almidón se utiliza el sensor de temperatura Pt100. La señal que entrega el sensor se la acondiciona para que varíe en un rango de voltaje de 0 a 5 voltios. Esta señal ingresa a un canal analógico del microprocesador (PIC16F877A).
2. Para el calentamiento se utiliza una niquelina de 500W y voltaje nominal de 220V. El circuito para controlar el voltaje sobre la niquelina es tipo ciclo integral el cual necesita un circuito de disparo y circuito detector de cruce por cero que debe estar sincronizado con la red.
3. Para el enfriamiento se ingresa aire frío a través de una tubería. Para controlar el ingreso de aire se utiliza una electroválvula sobre la cual se realiza la acción de control tipo ON/OFF

4. Para el agitador se utiliza un relé para controlar el encendido y apagado del motor.
  
5. Para el control de todo el sistema se empleara el microprocesador PIC16F877A para este se diseñará y construirá tanto el software y hardware de soporte.

En este capítulo se analizó los diferentes métodos que existen para medir la temperatura con el RTD seleccionándose el método de la fuente de corriente y el montaje a dos hilos del RTD.

El montaje a dos hilos del RTD se seleccionó por que la distancia ha la que va estar montado el RTD con respecto al circuito acondicionador es máximo un metro por lo que la resistencias de los cables se desprecia y no influye en el resultado de la lectura de la temperatura.

Este montaje se lo realiza en la fuente de corriente y la salida de voltaje leída por el voltímetro diferencial es directamente proporcional a la resistencia del RTD.

Además se estudio las diferentes acciones de control para los procesos industriales. Seleccionándose para la fase de calentamiento y mantener constante la temperatura la acción de control proporcional por que el proceso es relativamente lento y no existe cambios bruscos en el volumen de la mezcla y la temperatura. Y para la fase de enfriamiento la acción de control tipo ON-OFF pues la temperatura es una variable lenta y este tipo de control se ajusta bien para este caso en particular.

En el siguiente capítulo se realizará el diseño de los circuitos electrónicos para el sensor de temperatura y los actuadores (niquelina, electroválvula y agitador).

Para el sensor de temperatura Pt100, se diseñara la fuente de corriente y el circuito de acondicionamiento de señal.

Para controlar el voltaje sobre la níquelina se diseñará el circuito para obtener el ciclo integral. Además el diseño del circuito de disparo y el circuito detector de cruce por cero que debe estar sincronizado con la red.

Para controlar la electroválvula y el agitador se utilizará un relé para controlar el encendido y apagado de estos actuadores.

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA**

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

El en presente capítulo se realiza el diseño del circuito acondicionador para el RTD. Se diseña los circuitos de control y fuerza para los actuadores (niquelina, electroválvula y agitador), para que el microprocesador PIC16F877A pueda realizar el control de todo el sistema.

#### 3.2 CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO

Para que el microprocesador PIC16F877A pueda realizar sus funciones requiere de los siguientes circuitos:

1. Sensor de temperatura (Pt100)
2. Circuito de acondicionamiento de señal:
  - 2.1. Circuito fuente de corriente
  - 2.2. Circuito amplificador
  - 2.3. Circuito filtro butterworth pasabajos de -40db/década
  - 2.4. Circuito detector de Rtd
3. Circuito para la niquelina:
  - 3.1. Circuito de potencia
  - 3.2. Circuito detector de cruce por cero
4. Circuito para la electroválvula
5. Circuito para el agitador

6. Circuito para la Alarma

7. Fuente de alimentación

### 3.3 CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SENSOR DE TEMPERATURA Pt100

La Pt100 tiene un coeficiente de temperatura  $\alpha = 0.00392 \frac{\Omega}{\Omega^{\circ}C}$  y ha una temperatura de  $0^{\circ}C$  su resistencia es  $100\Omega$ . En el presente caso se trabajará en un rango de  $0^{\circ}C$  a  $102.4^{\circ}C$ , por lo que el valor de resistencia a dichas temperaturas será:

1. A la temperatura de  $0^{\circ}C$  se calcula el valor de la resistencia de la Pt100 utilizando la Ecuación [2.1]

$$R_{rtd} = R_o(1 + \alpha t)$$

$$R_{rtd} = 100\Omega$$

2. A la temperatura de  $102.4^{\circ}C$  se calcula el valor de la resistencia de la Pt100 utilizando la Ecuación [2.1]

$$R_{rtd} = 100(1 + 0.00392 * 102.4)$$

$$R_{rtd} = 139.9\Omega$$

Lo que quiere decir que se trabajará con una variación de temperatura de  $39.9\Omega$ .

### 3.4 DISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE LA Pt100

La salida de voltaje de este circuito debe ingresar al conversor análogo digital del microprocesador, el cual acepta máximo 5 V. Tomando en cuenta esta característica, el diseño del circuito debe ser tal que a la temperatura de  $0^{\circ}C$  la salida de voltaje deba ser 0 V y a la temperatura de  $102.4^{\circ}C$  deba ser 5 V.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques del circuito acondicionador para la Pt100.

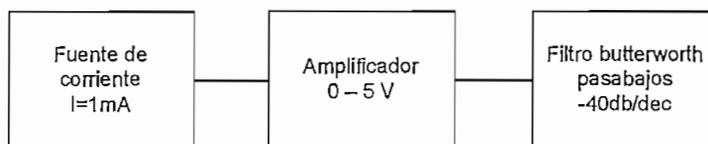


Figura 3.1 Diagrama de bloques del circuito acondicionador para la Pt100

Este circuito consta de las siguientes etapas:

1. Fuente de corriente que sirve para transformar la variación de resistencia en variaciones de voltaje.
2. Circuito amplificador para obtener la señal de 0 V a 5 V.
3. Filtro butterworth pasabajos de -40db/dec para no dejar pasar las señales de frecuencia mayores a 1kHz.

#### 3.4.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DE LA FUENTE DE CORRIENTE

Se propone el circuito de la Figura 3.2, el cual garantiza que el voltaje en el RTD solo depende de las variaciones de su resistencia, además, debe cumplir con los siguientes aspectos:

1. Generar una corriente constante de valor pequeño para evitar el efecto Joule
2. Tener alta impedancia de salida
3. La carga no debe estar referida a tierra para evitar el ruido.

Con los siguientes requerimientos se diseña la fuente de corriente.

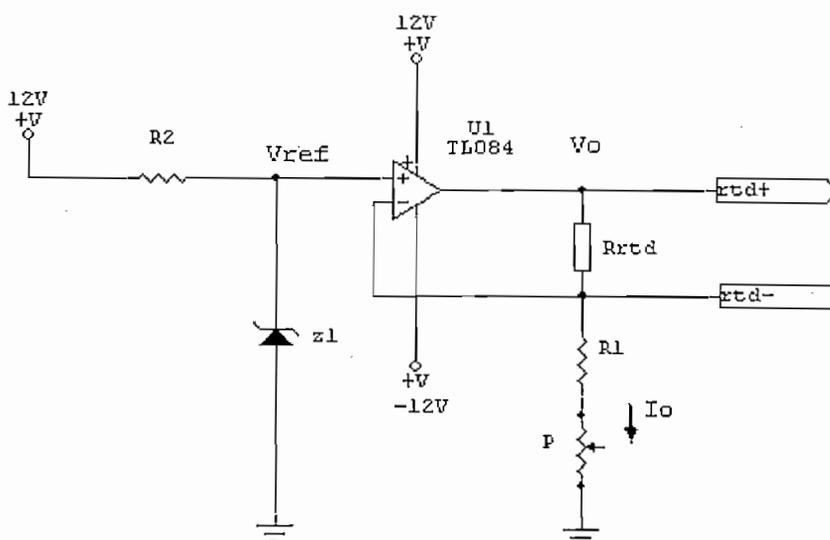


Figura 3.2 Fuente de corriente sin referencia a tierra

La corriente sobre el RTD esta dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_o - V_{ref}}{R_{rtcd}} = \frac{V_{ref}}{R1 + P} = I_o \quad \text{Ec. [3.1]}$$

Se diseñó una fuente de corriente de  $I_o = 1mA$  que es un valor razonable para evitar el efecto Joule.

De la Ecuación [3.1] se observa que para mantener constante el valor de la corriente, el voltaje de referencia debe ser también constante. Entonces se fija el voltaje de referencia con el zener de 5.1V

$$V_{ref} = 5.1V$$

De la Ecuación [3.1] se despeja  $R1 + P$ :

$$R1 + P = \frac{V_{ref}}{I_o}$$

$$R1 + P = \frac{5.1V}{1mA}$$

$$R1 + P = 5.1K\Omega$$

$$\text{Ec. [3.2]}$$

→ Se asume:  $R1 = 3.9K\Omega$

De la Ecuación [3.2] se despeja  $P$  y se reemplaza el valor de  $R1$ :

$$P = 5.1K\Omega - R1$$

$$P = 5.1K\Omega - 4.7K\Omega$$

$$P = 0.4K\Omega$$

Entonces se selecciona el potenciómetro:  $P = 1K\Omega$

Para establecer las características del circuito de amplificación que permitan el diseño se calculan los voltajes de salida para  $0^{\circ}C$  y  $102.4^{\circ}C$ . Además la potencia disipada por la Pt100.

#### 1. Voltaje de salida ha $0^{\circ}C$

Utilizando la Ecuación [2.1]

$$R_{rt\delta} = R_o(1 + \alpha * t)$$

$$R_{rt\delta} = 100(1 + 0.00392 * 0)$$

$$R_{rt\delta} = 100\Omega$$

$$V_{rt\delta} = I_o * R_{rt\delta}$$

$$V_{rt\delta} = 1mA * 100\Omega$$

$$V_{rt\delta} = 0.1V$$

#### 2. Voltaje de salida ha $102.4^{\circ}C$

Utilizando la Ecuación [2.1]

$$R_{rtd} = R_o(1 + \alpha t)$$

$$R_{rtd} = 100(1 + 0.00392 * 102.4)$$

$$R_{rtd} = 139.9\Omega$$

$$V_{rtd} = I_o * R_{rtd}$$

$$V_{rtd} = 1mA * 139.9\Omega$$

$$V_{rtd} = 0.139V$$

3. La potencia máxima disipada por el Rtd es:

$$P = I^2 R$$

$$P = (1mA)^2 * 102.4\Omega$$

$$P = 0.10mW$$

La potencia disipada por la Pt100 esta dentro del rango especificado por el fabricante.

### 3.4.2 DISEÑO DEL CIRCUITO AMPLIFICADOR

El voltaje que se recibe desde la Pt100 está en el orden de los milivoltios por lo que es necesario amplificar esta señal. Con este propósito se utiliza el amplificador de instrumentación que se muestra en la Figura 3.3 que posee las siguientes características:

1. Alta impedancia de entrada en modo diferencial.
2. Baja corrimiento de voltaje de offset.
3. Baja corriente de polarización
4. Alta razón de rechazo en modo común.

Los requerimientos para el diseño del amplificador de instrumentación son:

El voltaje máximo a la salida de esta etapa será 5V a la temperatura de 102.4°C

Luego la ganancia total del amplificador será:

$$G_r = \frac{V_{o1}}{V_{in}} \quad \text{Ec. [3.3]}$$

$$G_r = \frac{5V}{0.139mV}$$

$$G_r = 35.71$$

El voltaje de salida del amplificador es:

$$V_{o1} = \frac{R_5}{R_4} * \left( 1 + \frac{R_1 + R_2}{R_g} \right) * (V_{rd}) \quad \text{Ec. [3.4]}$$

$$V_{rd} = V_2 - V_1$$

$$G_r = \frac{V_{o1}}{V_{rd}} \quad \text{Ec. [3.5]}$$

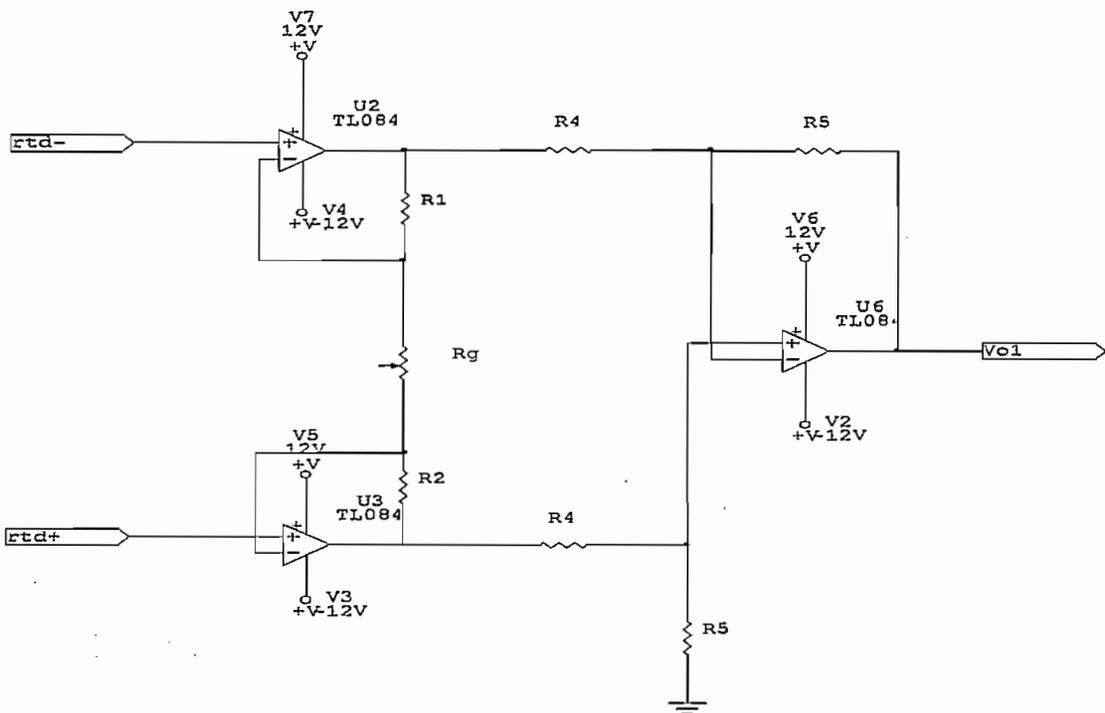


Figura 3.3 Esquemático del amplificador de instrumentación

De la Ecuación [3.4] se asume que:

$$G_2 = \frac{R_5}{R_4} \quad \text{Ec. [3.6]}$$

$$G_1 = 1 + \frac{R_1 + R_2}{R_g} \quad \text{Ec. [3.7]}$$

Siendo  $G_1$  y  $G_2$  las ganancias parciales del amplificador. Entonces la ganancia total del amplificador queda expresada de la siguiente manera:

$$G_T = G_2 * G_1 \quad \text{Ec. [3.8]}$$

$$35.71 = G_2 * G_1$$

→ Se asume  $G_2=10$  y se calcula el valor de  $G_1$ :

$$G_1 = \frac{35.71}{10}$$

$$G_1 = 3.57$$

→ Se asume  $R_5=33K\Omega$

Se despeja  $R_4$  de la Ecuación [3.6]

$$R_4 = \frac{33K\Omega}{10}$$

$$R_4 = 3.3K\Omega$$

→ Se asume que:  $R_1 = R_2 = 10K\Omega$

Se despeja  $R_g$  de la Ecuación [3.7]

$$R_g = \frac{2 * R_1}{G_1 - 1}$$

$$R_g = \frac{2 * 10K\Omega}{3.57 - 1}$$

$$R_g = 7.77K\Omega$$

Se calcula el voltaje de salida del amplificador para a  $0^\circ C$

$$V_{rd} = I_o * R_{rd}$$

$$V_{rd} = 1mA * 100\Omega$$

$$V_{rd} = 0.1V$$

De la Ecuación [3.5]

$$V_{o1} = 35.71 * 0.1$$

$$V_{o1} = 3.57V$$

Es necesario hacer un ajuste en esta etapa, para obtener 0 V a la temperatura de  $0^{\circ}C$  y 5 V a la temperatura de  $102.4^{\circ}C$ ; para esto se implementa el circuito restador que se muestra en la Figura 3.4 y a la salida de este se añade un filtro butterworth pasabajos de  $-40db/dec$ .

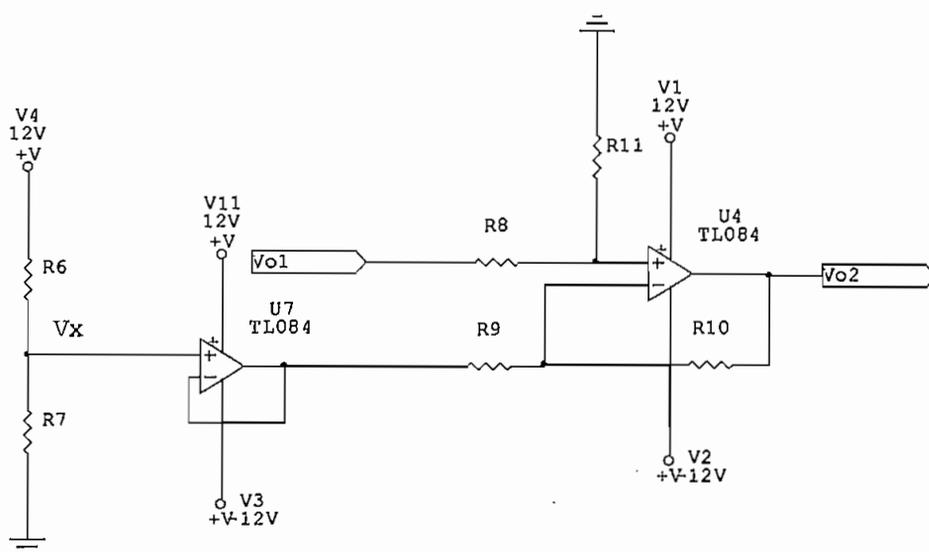


Figura 3.4 Esquemático del circuito restador

Del análisis anterior se desprende que se debe restar 3.57 V al voltaje de salida del amplificador de instrumentación, para obtener 0 V a la temperatura de  $0^{\circ}C$

Entonces el voltaje a restarse es:

$$V_x = 3.57V$$

→ Se asume que:  $R_{10} = R_{11}$  y  $R_8 = R_9$

La ecuación del voltaje de salida del circuito restador es:

$$V_{o2} = \frac{R_{10}}{R_9}(V_{o1} - V_x) \quad \text{Ec. [3.9]}$$

Se despeja  $\frac{R_{10}}{R_9}$  de la Ecuación [3.9]

$$\frac{R_{10}}{R_9} = \frac{V_{o2}}{V_{o1} - V_x}$$

$$\frac{R_{10}}{R_9} = \frac{5}{5 - 5.37} = 3.49$$

→ Se asume que:  $R_{10} = 33\text{K}\Omega$

Dando como resultado:

$$\rightarrow R_9 = 9.45\text{K}\Omega$$

Se decidió poner un potenciómetro para tener la posibilidad de realizar ajustes en el voltaje de salida.

### 3.4.3 DISEÑO DEL FILTRO BUTTERWORTH PASABAJOS DE -40 DB/DÉCADA

En la Figura 3.5 se muestra uno de los filtros pasabajos de uso más común que produce una atenuación de -40db/década.

El objetivo de filtrar frecuencias mayores a 1kHz es de eliminar señales indeseables que se introducen a lo largo de la trayectoria del circuito transmisor de señal.

El capacitor  $C_2$  debe estar entre 100pF y 0.1uf

→ Se asume que:  $C_2 = 0.01\text{uf}$

$$C_1 = 2 * C_2 \quad \text{Ec. [3.10]}$$

Dando como resultado:

$$\rightarrow C_1 = 0.022\text{uf}$$

Para calcular la resistencia  $R$  se utiliza la Ecuación [3.11]

$$R = \frac{0.707}{W_c C_1} \quad \text{Ec. [3.11]}$$

$$R = \frac{0.707}{2 * \pi * 1\text{khz} * 0.01\text{uf}}$$

$$R = 11.2\text{k}\Omega$$

Entonces se escoge el valor de resistencia:

$$\rightarrow R = 10\text{k}\Omega$$

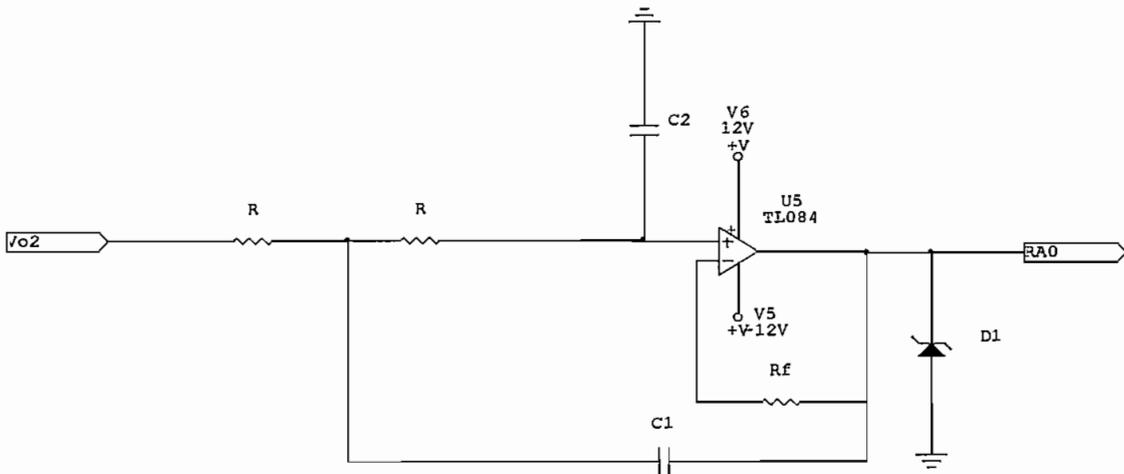


Figura 3.5 Esquemático de filtro butterworth pasabajos de -40db/década

$$R_f = 2R \quad \text{Ec.}[3.12]$$

$$R_f = 2 * 11.2\text{K}\Omega$$

$$R_f = 22.4\text{K}\Omega$$

Pasando luego a seleccionar:

$$\rightarrow R_f = 22\text{k}\Omega$$

En la Figura 3.6 se muestra el esquemático del circuito completo del acondicionador de señal para la Pt100.

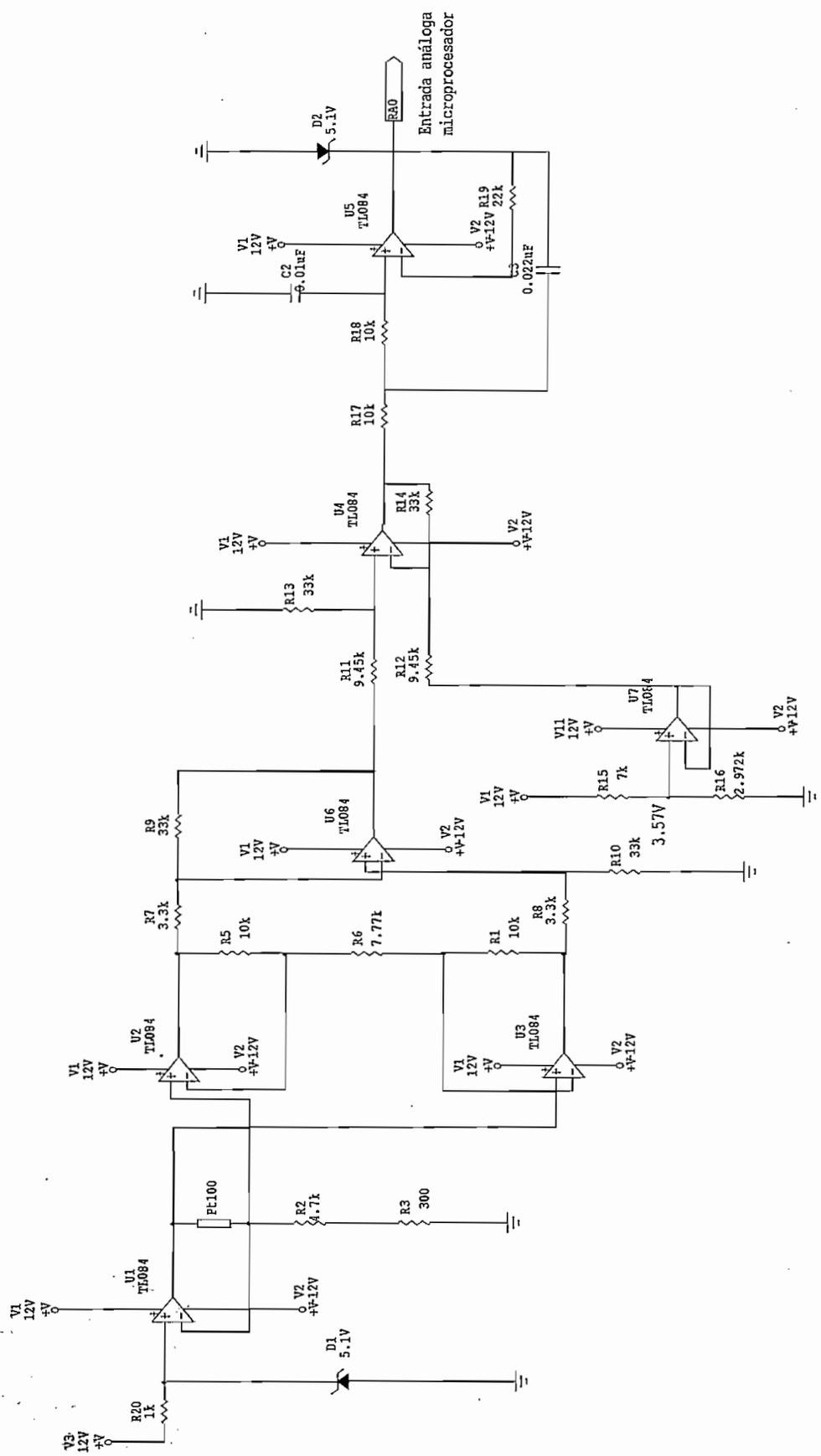


Figura 3.6 Esquemático del circuito acondicionador de la Pt100

### 3.4.4 DISEÑO DEL CIRCUITO DETECTOR DE RTD

El circuito que se muestra en la Figura 3.7 tiene la función de detectar si el sensor de temperatura está conectado o desconectado a la etapa de amplificación, para enviar una señal al microcontrolador para que este tome la acción de control adecuada.

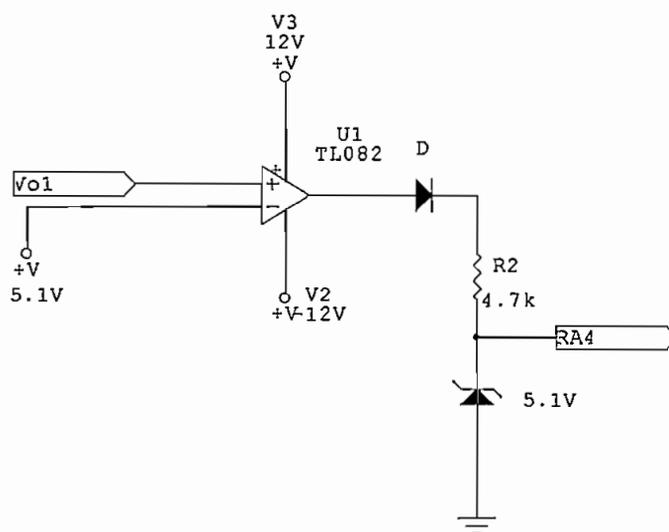


Figura 3.7 Esquemático del circuito detector de rtd abierto

Si el sensor se desconecta, la fuente de corriente se convierte en un circuito comparador, el cual compara el voltaje de referencia 5.1V con 0 V dando como resultado Vcc.

El voltaje máximo que ingresa al amplificador de instrumentación es de 0.139 V a  $102.4^{\circ}\text{C}$  y se tiene como salida 5V. Para detectar que está desconectado el sensor, se compara la señal de salida con un voltaje de referencia de 5.1V ya que cuando ingrese Vcc al amplificador de instrumentación, en la salida se tendrá Vcc.

Para recortar la señal negativa del circuito comparador se utiliza un diodo y para fijar la señal a 5.1V se utiliza el zener.

### 3.5 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE LOS ACTUADORES

1. Para el calentamiento se regula la potencia entregada a la niquelina que tiene las siguientes características: Potencia nominal 500 W y Voltaje nominal 220 V. Existen dos formas de regular la potencia: Conmutación variación del ángulo de disparo y por mando síncrono.

La regulación de temperatura es una aplicación típica del control semiondas o de períodos enteros (Control por Ciclo Integral), que es un caso del control por mando síncrono.

El control por ciclo integral presenta las siguientes características:

1. Conmutación Natural
2. Presenta componentes armónicos
3. Períodos enteros para evitar componente de continua sobre la carga
4. No tiene distorsión
5. Pasos de potencia
6. Carga resistiva
7. Se utiliza para regulación de temperatura

Debido al funcionamiento síncrono del interruptor triac se hace siempre pasar un número entero de semiondas, cualesquiera que sean la fase, período o factor de simetría.

En la Figura 3.8 se presenta el principio de la variación de potencia por supresión de semiondas o de períodos enteros.

No obstante que este número puede ser par o impar, se ve claramente en la Figura 3.8.3 que un número impar de semiondas introduce en la carga una componente continua. Si esto fuera perjudicial sería preferible recurrir a un recorte por períodos enteros que se muestra en la Figura 3.8.4.

El tiempo  $T_1$  en la Figura 3.8 determina el número de semiondas que recibe la carga y el tiempo  $T_2$  fija el número de semiondas suprimidas dentro de cada período de recorte.

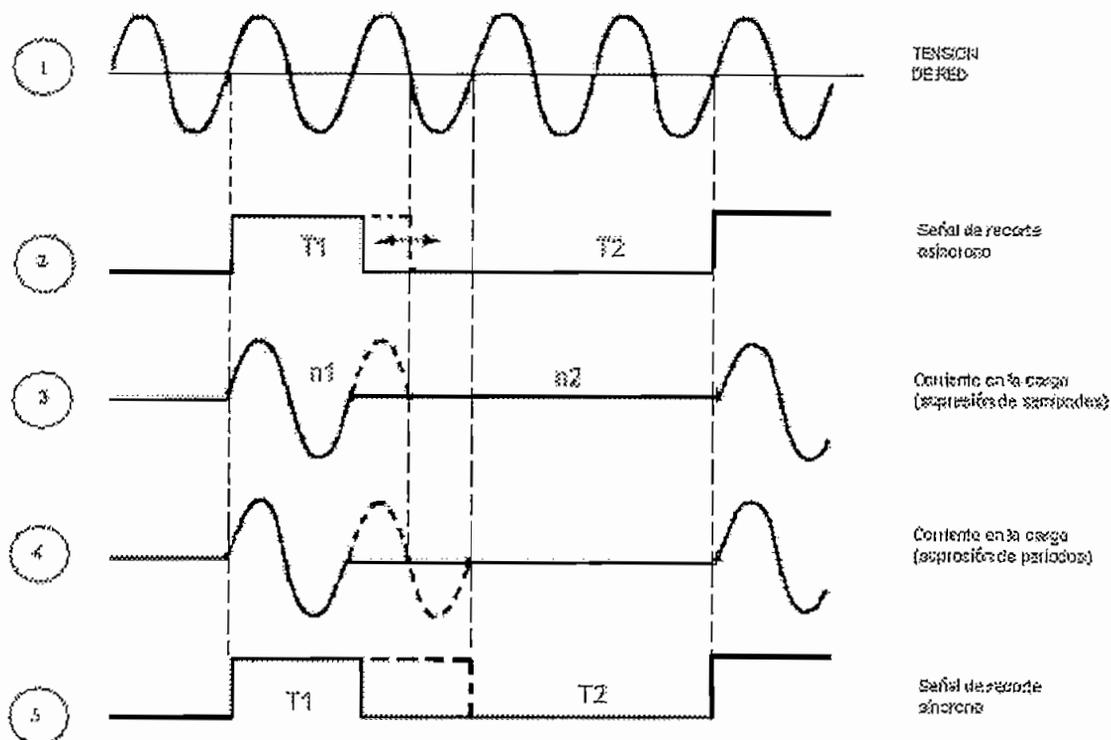


Figura 3.8 Principio de la variación de potencia por supresión de semiondas o de períodos enteros

Para este caso en particular, se aplicará la señal de recorte síncrono a la compuerta del triac, para obtener el recorte por períodos enteros sobre la carga.

- Para el enfriamiento se utilizará una electroválvula que controla el paso del aire proveniente de un compresor. El control que se realiza sobre la electroválvula se analizó y decidió que sea de tipo ON-OFF. Con este propósito se hará trabajar un transistor en la región de corte y saturación para manejar un relé el cual conectará ó desconectará la electroválvula.

3. El agitador se trata de un motor monofásico de corriente alterna cuyos datos de placa son:  $V_n=110V$  y  $P=1/4$  Hp. Cabe indicar que este motor ya se encontraba instalado en el Amilógrafo Brabender con su circuito de fuerza y solo restaba utilizar un relé para la parte de control. Con este propósito se hará trabajar un transistor en la región de corte y saturación para controlar el encendido y apagado del relé.
4. Las señales que ingresan a los circuitos de los actuadores provienen del microcontrolador.

### 3.6 DISEÑO DEL CIRCUITO PARA CONTROL DE LA NIQUELINA

En la Figura 3.9 se muestra el circuito para realizar control por ciclo integral para controlar 15 períodos de la señal de la red, donde el triac es el que maneja el voltaje sobre la niquelina a través del optotriac, al que se limita la corriente mediante el uso de la resistencia R2.

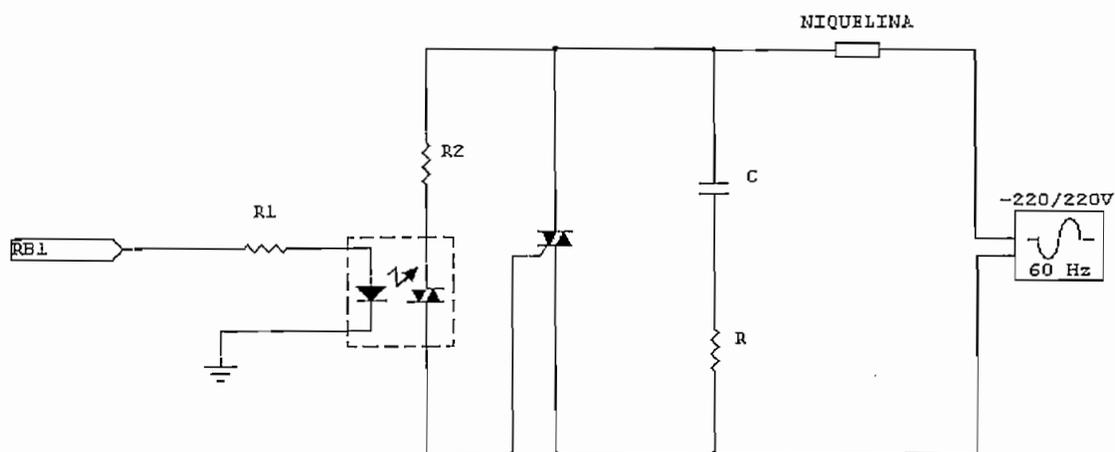


Figura 3.9 Circuito de fuerza de la niquelina

A continuación se describe los datos de la fuente de alimentación y la niquelina.

Niquelina

$$P = 500W$$

$$V_s = 220V$$

Fuente

$$V = 220V$$

$$f = 60hz$$

En la Figura 3.10 se muestra la forma de onda de voltaje sobre la carga.

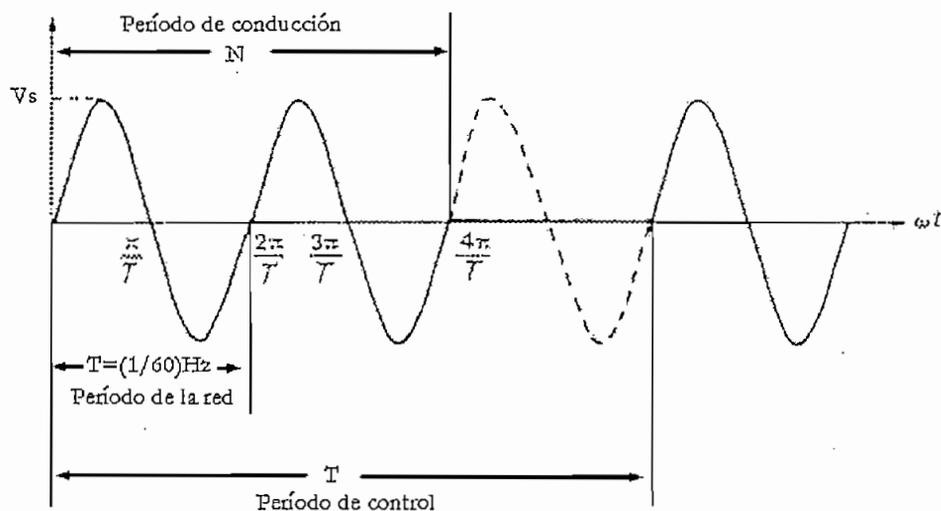


Figura 3.10 Forma de onda de voltaje sobre la carga –Ciclo Integral

$N$  = Número de ondas

$T$  = Periodo de la onda

→ Puesto que se va controlar 15 períodos de señal de la red; por lo tanto:

$$T = N * (\text{Período de red})$$

$$T = 15 * 16.66 \text{ ms}$$

$$T = 0.25 \text{ s}$$

Para carga resistiva la ecuación de la potencia es:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad \text{Ec. [3.13]}$$

De la Ecuación [3.13] se despeja el valor de la resistencia de la níquelina.

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{220^2 \text{ V}}{500 \text{ W}}$$

$$R = 96.8 \Omega$$

1. Para dimensionar el Triac se calcula el voltaje y corriente rms:

$$V_{rms}^2 = \frac{N}{2 * \pi * T} \int_0^{2\pi} (\sqrt{2} * V_s * \text{sen}(wt))^2 dwt \quad \text{Ec. [3.14]}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{N}{T}} * V_s \quad \text{Ec. [3.15]}$$

El  $V_{rms}$  máximo se obtiene cuando  $N=T$  por lo que, reemplazando en la Ecuación [3.15]

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{N}{T}} * 220$$

$$V_{rms} = 220V$$

$$I_{rms}^2 = \frac{N}{2 * \pi * T} \int_0^{2\pi} \left( \frac{\sqrt{2} * V_s}{R} * \text{sen}(wt) \right)^2 dwt \quad \text{Ec. [3.16]}$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{220V}{96.8\Omega}$$

$$I_{rms} = 2.29A$$

En base al análisis realizado sobre el voltaje y corriente rms, se escogió el triac ECG 56006. Cuyas características de este dispositivo son:

Voltaje máximo	=	400V
Corriente máxima	=	8 A
Corriente mínima de disparo	=	50mA
Voltaje máximo en la compuerta	=	2.5V

2. La selección del optotriac se realiza en base a la  $I_{GT\min} = 50mA$  que es la corriente mínima que el triac necesita en la compuerta para ser activado.

Se escogió el optotriac MOC3040

Las características de este dispositivo son:

Led:

$$\text{Corriente máxima (IF)} = 20\text{mA}$$

$$\text{Voltaje reverso (VR)} = 6\text{V}$$

Fototiristor:

$$\text{Voltaje de aislamiento (VDRM)} = 400\text{V}$$

$$\text{Corriente mínima (IDRM)} = 500\text{nA}$$

$$\text{Corriente máxima (ITM)} = 100\text{mA}$$

→ Se asume que circula una corriente de 10mA sobre el led.

$$R1 = \frac{V}{I}$$

$$R1 = \frac{5\text{V}}{10\text{mA}} = 500\Omega$$

$$\rightarrow R1 = 470\Omega$$

Para el cálculo del valor de la resistencia R2 primero se calculó la corriente que circula sobre el fototiristor.

$$20\text{mA} \rightarrow 100\text{mA}$$

$$10\text{mA} \rightarrow I_{TM}$$

$$I_{TM} = \left( \frac{10 * 100}{20} \right) [\text{mA}]$$

$$I_{TM} = 50\text{mA}$$

$$R2 = \frac{220\text{V}}{50\text{mA}}$$

$$R2 = 4.4\text{K}\Omega$$

$$\rightarrow R2 = 4.7\text{K}\Omega$$

Cálculo de la potencia de disipación de la R2.

$$P = I_{TM}^2 R2$$

$$P = 50^2 mA * 4.7K\Omega$$

$$P = 11.75W$$

Se escoge la R2 con los siguientes datos:

$$R2 = 4.7K\Omega \text{ y } P = 11.75W$$

### 3. Diseño del snubber para el triac

Para el triac ECG 56006 utilizado, se encontró en su hoja de datos que el sobre pico de voltaje (dv/dt) es igual a:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 100V / \mu S$$

Con este valor se calcula el capacitor y la resistencia para proteger al triac del sobre voltaje.

$$C \geq \frac{E}{R * \frac{\partial V}{\partial t}_{max}} \quad \text{Ec. [3.17]}$$

$$C \geq \frac{220}{33 * 100} \geq 66.6mF \quad \text{Ec. [3.18]}$$

Del resultado de la Ecuación [3.18] se escoge:

$$\rightarrow C = 220 \text{ nF} \quad V_n = 400 \text{ V}$$

Con una resistencia serie de  $R = 33 \Omega$  para su descarga.

#### 3.6.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DETECTOR DE CRUCE POR CERO

El circuito se diseñó para que funcione sincrónicamente con la frecuencia de la red de alimentación y detecte el cruce por cero de la onda senoidal al cambiar del semiciclo positivo a negativo. La señal de este circuito es enviada al microcontrolador para que este envíe el pulso de disparo.

Se propone el circuito de la Figura 3.11 para detectar el cruce por cero.

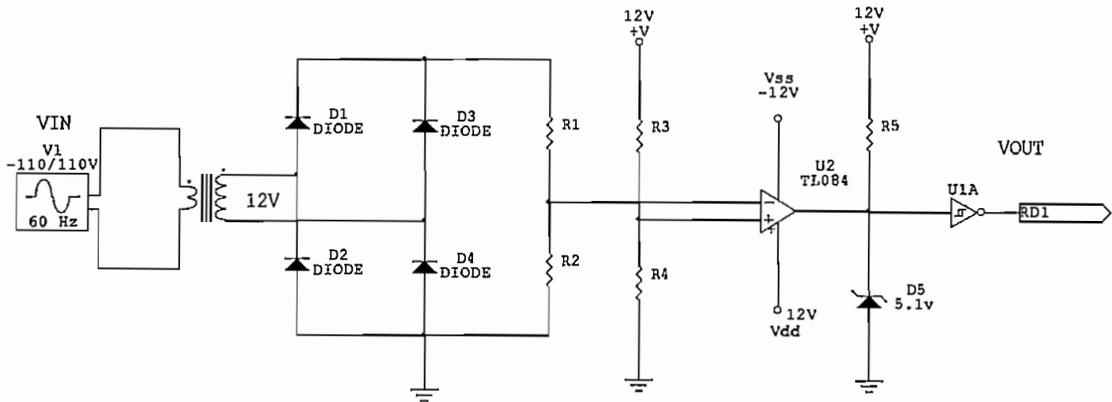


Figura 3.11 Circuito detector de cruce por cero

La señal de la red se la reduce a 12V AC por medio de un transformador. Se utiliza un puente de diodos para rectificar esta señal y se coloca las resistencias R1 y R2 para limitar la corriente sobre los diodos. Se compara el voltaje de R2 con el voltaje de R4 para obtener la señal de cruce por cero.

Para obtener una señal con flancos totalmente verticales se utiliza la compuerta schmitt trigger y la señal que ingresa a está compuerta debe ser 5 V, por lo que se utilizó el zener de 5.1 V

La Ecuación [3.19] es el voltaje rectificado a la salida del punte

$$V_{dc} = \frac{2 * \sqrt{2} * V_s}{\pi} \quad \text{Ec.}[3.19]$$

$$V_{dc} = \frac{2 * \sqrt{2} * 12}{\pi}$$

$$V_{dc} = 10.8V$$

→ Se utilizó los diodos ECG 168 de las cuyas características son:

Corriente = 1 A

Voltaje = 200 V

→ Se asume que corriente máxima que circula sobre el diodo es 6 mA

$$R1 + R2 = \frac{V_{dc}}{I}$$

$$R1 + R2 = \frac{10.8V}{5mA}$$

$$R1 + R2 = 2.1K\Omega$$

Dando como resultado:

$$\rightarrow R1 = 4.7\Omega$$

$$\rightarrow R2 = 1.5K\Omega$$

La resistencia R4 se escoge en el orden de los ohmios

$$\rightarrow R4 = 10\Omega$$

$$\rightarrow R3 = 2.7K\Omega$$

A continuación se muestran las formas de ondas obtenidas del circuito detector de cruce por cero:

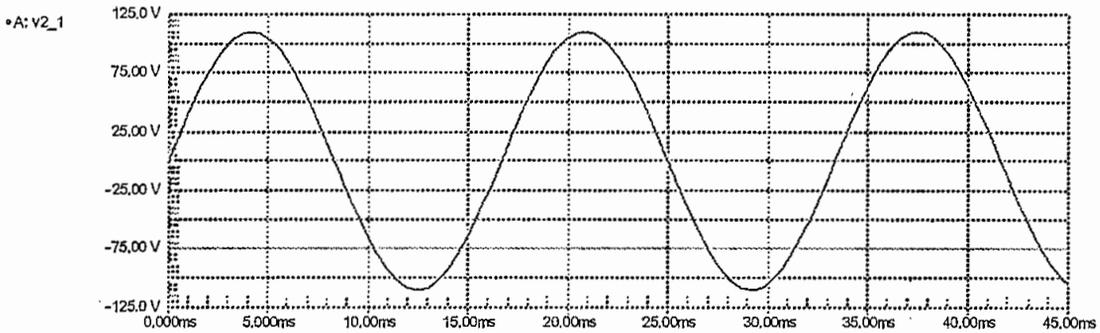


Figura 3.12 Forma de onda de voltaje de entrada

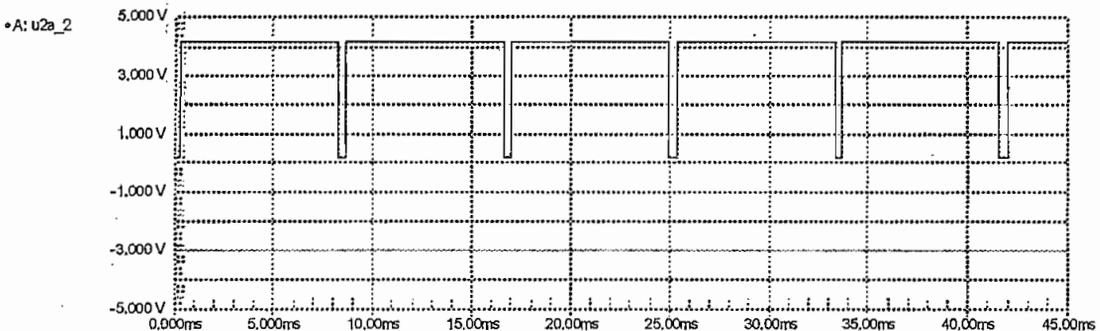


Figura 3.13 Forma de onda de voltaje de salida

### 3.7 DISEÑO DEL CIRCUITO PARA CONTROL DE LA ELECTROVÁLVULA

El circuito que se muestra en la Figura 3.14 tiene como objetivo controlar el encendido y apagado de la electroválvula. Para el efecto, el transistor trabaja en la región de corte y saturación; además, se utilizó el optotransistor que sirve para aislar el circuito de control del circuito de fuerza.

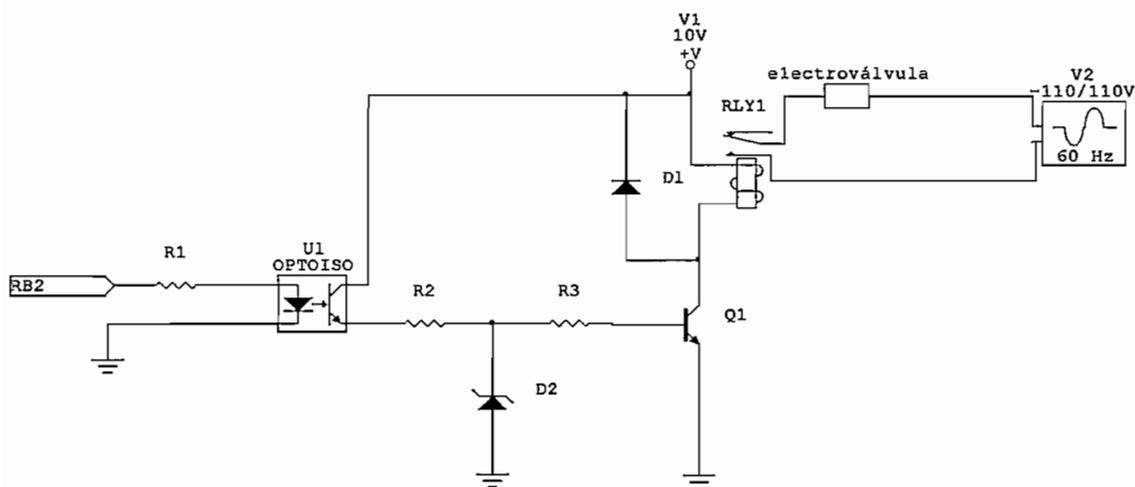


Figura 3.14 Circuito para controlar la electroválvula

Las características de la electroválvula son:

Voltaje	=	110 V
Frecuencia	=	60 Hz
Corriente	=	7 A

1. La selección del relé se lo realizó tomando en cuenta el voltaje y corriente de la carga. Con estos datos se seleccionó el relé cuyas características son:

Voltaje de la bobina	=	12V DC
Corriente de la bobina	=	0.2 A
Voltaje del contacto	=	110 V
Corriente del contacto	=	10 A

2. Por otro lado la selección del transistor se realizó tomando en cuenta el voltaje y corriente del relé. Con estos datos se selecciono el transistor TIP110 cuyas características son:

Voltaje colector emisor (VCE)	=	60 V
Corriente de colector (IC)	=	2 A
Corriente de base (IB)	=	50 mA

Se utiliza el zener de 5.1V para fijar el voltaje en la base del transistor.

Se asume una corriente de base de 1 mA.

Dando como resultado:

$$R3 = \frac{5.1V}{1mA}$$

$$R3 = 5.1K\Omega$$

$$\rightarrow R3 = 5.6K\Omega$$

La resistencia R2 se utiliza para que caiga el voltaje restante de la fuente.

$$\rightarrow R2 = 4.7K\Omega$$

3. Para aislar el circuito de control se utilizó el optotransistor ECG3040  
Las características de este dispositivo son:

Led:

Corriente máxima (IF)	=	50 mA
-----------------------	---	-------

Voltaje reverso (VR)	=	3 V
----------------------	---	-----

Fototiristor:

Voltaje colector emisor (VCE)	=	30 V
-------------------------------	---	------

Corriente de colector (IC)	=	1 mA
----------------------------	---	------

→ Se asume que circula una corriente de 15 mA sobre el diodo led.

Dando como resultado:

$$R1 = \frac{V}{I}$$

$$R1 = \frac{5V}{15mA}$$

$$R1 = 333.33\Omega$$

$$\rightarrow R1 = 330\Omega$$

### 3.8 DISEÑO DEL CIRCUITO PARA EL AGITADOR

El circuito que se muestra en Figura 3.15 se utiliza para controlar el motor, donde el relé RLY2 controla el encendido y apagado del motor. Para controlar el relé RLY2 se utiliza el relé auxiliar RLY1. Para controlar este relé se utiliza el circuito que se muestra en la Figura 3.16. Para el efecto se hace trabajar un transistor en la región de corte y saturación; además se utilizó el optotransistor para aislar el circuito de control del circuito de fuerza.

El motor tiene los siguientes datos de placa:

Voltaje nominal (Vn)	=	110 V
Potencia nominal (P)	=	1/4 Hp
Corriente nominal (In)	=	1.69 A

#### 1. Circuito para controlar el motor.

El relé RLY2 tiene los siguientes datos de placa:

Voltaje de la bobina	=	110 V
Corriente de la bobina	=	0.2 A
Frecuencia	=	60 Hz
Voltaje del contacto	=	110 V
Corriente del contacto	=	45 A

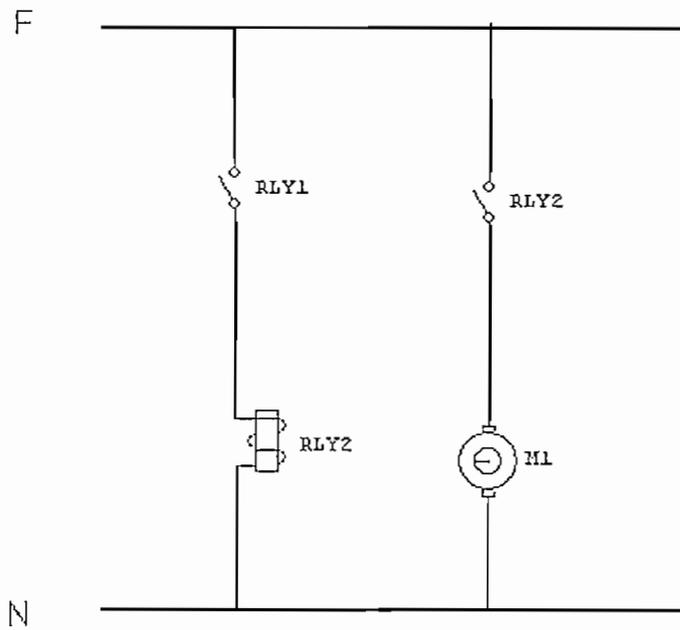


Figura 3.15 Circuito de fuerza del motor

## 2. Circuito de control para el relé auxiliar RLY1.

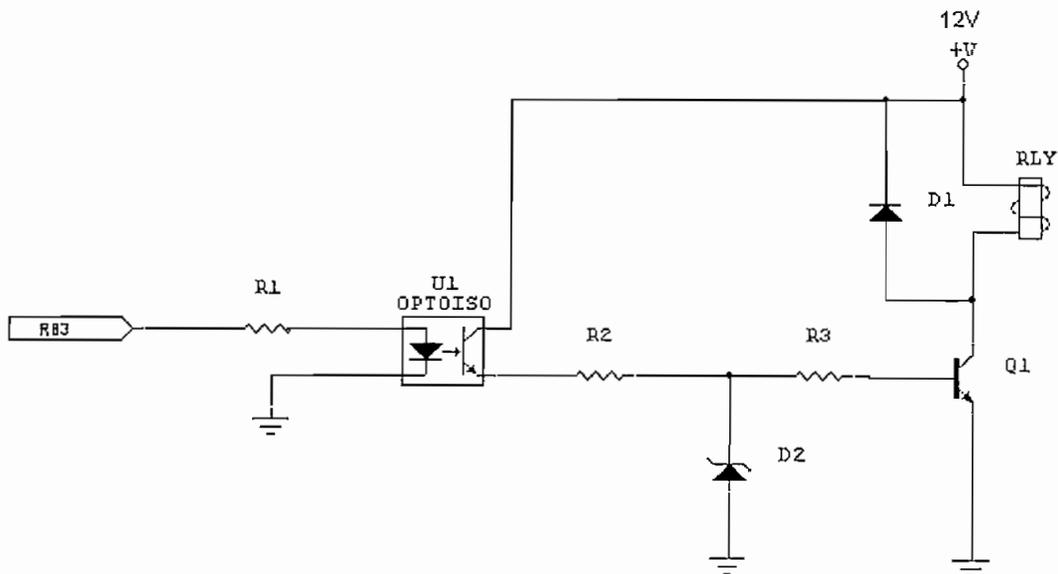


Figura 3.16 Circuito de control para el relé RLY1

2.1 La selección del relé RLY1 se realizó tomando en cuenta el voltaje y corriente que soporta la bobina del relé RLY2. Con estos datos se selecciona el relé RLY1 que tiene las siguientes características:

Voltaje de la bobina	=	12V DC
Corriente de la bobina	=	0.2 A
Voltaje del contacto	=	110V AC
Corriente del contacto	=	10 A

2.2 Para la selección del transistor se tomó en cuenta el voltaje y corriente del relé. Con estos datos se seleccionó el transistor TIP110 cuyas características son:

Voltaje colector emisor (VCE)	=	60 V
Corriente de colector (IC)	=	2 A
Corriente de base (IB)	=	50 mA

Se utiliza el zener de 5.1V para fijar el voltaje en la base del transistor.  
Se Asume una corriente de base de 1 mA.

Dando como resultado:

$$R3 = \frac{5.1V}{1mA}$$

$$R3 = 5.1K\Omega$$

$$\rightarrow R3 = 5.6K\Omega$$

La resistencia R2 se utiliza para que caiga el voltaje restante de la fuente.

$$\rightarrow R2 = 4.7K\Omega$$

2.3 Para aislar el circuito de control se utilizó el optotransistor ECG3040

Las características de este dispositivo son:

Led:

Corriente máxima (IF)	=	50mA
Voltaje reverso (VR)	=	3V

Fototiristor:

$$\text{Voltaje colector emisor (VCE)} = 30\text{V}$$

$$\text{Corriente de colector (IC)} = 1\text{mA}$$

→ Se asume que circula una corriente de 15mA sobre el diodo led.

Dando como resultado:

$$R1 = \frac{V}{I}$$

$$R1 = \frac{5V}{15mA}$$

$$R1 = 333.33\Omega$$

$$\rightarrow R1 = 330\Omega$$

### 3.9 DISEÑO DEL CIRCUITO PARA LA ALARMA

En la Figura 3.17 se muestra el circuito que sirve para controlar el buzzer. Este se activa cuando detecta que el sensor esta desconectado o ha finalizado el proceso.

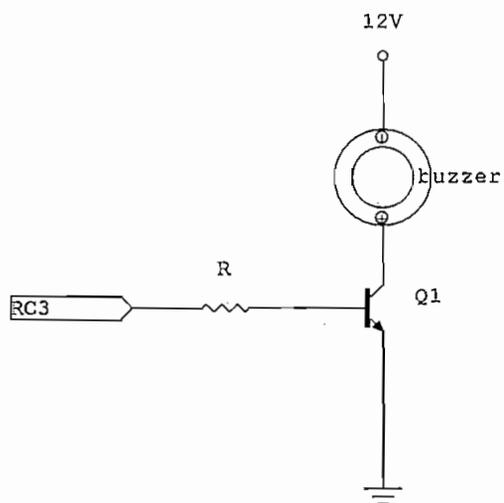


Figura 3.17 Circuito para controlar el buzzer

Características del buzzer:

$$\begin{aligned} \text{Voltaje nominal (Vn)} &= 12\text{V DC} \\ \text{Corriente nominal (In)} &= 0.1 \text{ A} \end{aligned}$$

Para la selección del transistor se tomó en cuenta el voltaje y corriente del buzzer. Con estos datos se seleccionó el transistor TIP110 cuyas características son:

$$\begin{aligned} \text{Voltaje colector emisor (VCE)} &= 12 \text{ V} \\ \text{Corriente de colector (IC)} &= 10 \text{ mA} \end{aligned}$$

La corriente mínima para que conduzca el transistor es 0.1 mA. Se Asume una corriente de base igual a 1 mA.

Dando como resultado:

$$R = \frac{5.1V}{1mA}$$

$$R = 5.1K\Omega$$

$$\rightarrow R = 5.6K\Omega$$

### 3.10 FUENTE DE ALIMENTACIÓN SELECCIONADA

Para la selección de la fuente de alimentación se tomarón en consideración los voltajes y corrientes de polarización que necesitan los dispositivos electrónicos que se muestra en la Tabla 3.1.

Cantidad	Dispositivo electrónicos	Voltaje (+) (V)	Voltaje(-) (V)	Corriente (mA)	Corriente total (mA)
2	TL084	12	12	5,6	11,2
1	TL082	12	12	5,6	5,6
2	Relé	12		0,2	0,4
1	Buzzer	12		0,2	0,2

3	Tip110	12	10	30
1	PIC16F877A	5	20	20
1	MOC3040	5	50	50
2	4N26	5	50	100
1	Schmitt trigger	5	10	10
1	LCD	5	20	20
			I total	247,4

Tabla 3.1 Datos de voltaje y corriente

En la Tabla 3.2 se muestra las características de la fuente seleccionada:

Marca : Switching Power Supply

Modelo : ATX-450W-PIV

AC	Voltaje	Corriente	Frecuencia
Entrada	220/115V	7/4A	50-60Hz
DC Salida	12V	12A	
	-12V	0.5A	
	5V	25A	

Tabla 3.2 Características de la fuente ATX

En este capítulo se diseñó el circuito acondicionador para el sensor de temperatura y los actuadores.

Se diseñó para la Pt100 el circuito acondicionador de señal y para los actuadores sus circuitos de control y fuerza respectivamente. El circuito acondicionador de señal de voltaje de la Pt100 consta de tres etapas:

La primera etapa es la fuente de corriente para transformar la variación de resistencia en variación de voltaje. Se diseñó para obtener una corriente de 1 mA para evitar el efecto Joule.

La segunda etapa es el circuito amplificador que se diseñó de tal manera que a  $0^{\circ}\text{C}$  la salida de voltaje deba ser 0 V y a  $102.4^{\circ}\text{C}$  deba ser 5 V.

La tercera se trata de un filtro butterworth pasabajos de  $-40\text{db/década}$  con el objetivo como ya se indicó, de filtrar las frecuencias mayores a 1 kHz.

Para el control de la niquelina se realizó el control por ciclo integral el cual controla 15 períodos completos de la red. Para el efecto se diseñó los siguientes circuitos: Circuito detector de cruce por cero el cual está sincronizado con la red y circuito de disparo para el triac, que es el elemento que controla la variación de voltaje sobre la niquelina.

Para el control de la electroválvula y el agitador se diseñó los circuitos de control y fuerza. Estos circuitos realizan la acción de control tipo ON-OFF.

En el siguiente capítulo, para realizar el control de todo el sistema, se empleará el microcontrolador PIC16F877A, para el cual se diseñará y construirá, donde sea necesario, tanto el software como el hardware de soporte.

## **CAPÍTULO 4**

**DISEÑO DEL HARDWARE Y SOFTWARE PARA EL MICROPROCESADOR**

**PIC 16F877A**

## CAPÍTULO 4

### DISEÑO DEL HARDWARE Y SOFTWARE PARA EL MICROPROCESADOR PIC 16F877A

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se detalla sobre el diseño de la interfaz controlador / usuario y sobre el software que se implemento en el microprocesador para realizar el control de todo el sistema.

La interfaz controlador / usuario esta compuesta por pulsadores que sirven para el ingreso de datos y un Display de Cristal Liquido (LCD) de 2 líneas y 16 caracteres que sirve para la visualización de los valores de temperatura y mensajes que genera el sistema.

El software elaborado permite realizar la lectura de los valores de temperatura de la Pt100, resuelve la ecuación de diferencias del algoritmo de control seleccionado para cada fase del proceso y genera las señales de control para cada uno de los actuadores.

#### 4.2 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS PARA LA INTERFAZ CONTROLADOR / USUARIO

El controlador de temperatura para la interfaz esta constituida por los siguientes circuitos:

1. Circuito de polarización para el microprocesador
2. Circuito para pulsadores
3. Circuito de visualización
4. Circuito de señalización

#### 4.2.1 POLARIZACIÓN PARA EL MICROPROCESADOR PIC16F877A

En la Figura 4.1 se muestra el circuito de polarización para el microprocesador. Se trabajo con un cristal de 4 MHz y capacitores de 15 pF estos valores están dentro de aquellos que recomienda el fabricante.

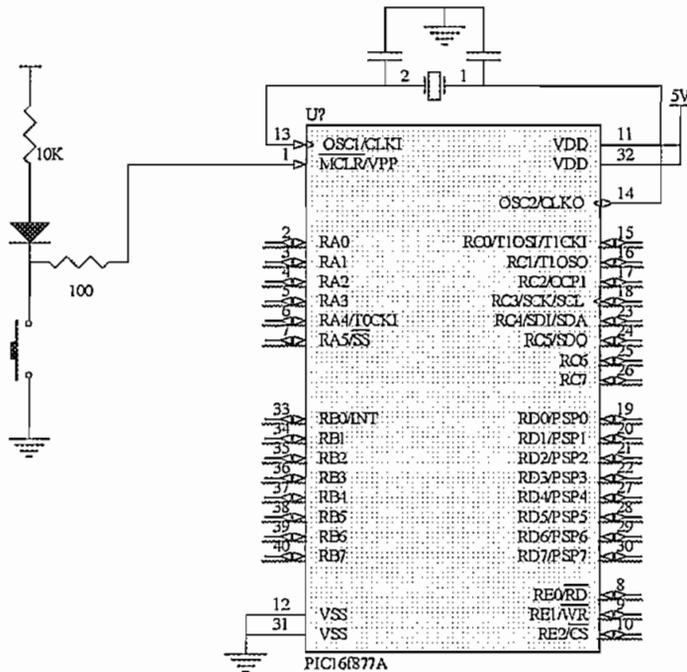


Figura 4.1 Circuito de polarización para el PIC16F877A

#### 4.2.2 DISEÑO DEL CIRCUITO PARA LOS PULSADORES

En la Figura 4.2 se muestra el circuito utilizado para el ingreso de los datos, lo cual se realiza mediante tres pulsadores y se conectan al puerto A del microprocesador.

P1 : Sirve para incrementar el valor ingresado y también para iniciar el proceso. Está pulsador se conecta al pin RA1.

P2 : Sirve para decrementar el valor ingresado y también para detener el proceso. Está pulsador se conecta al pin RA2.

P3 : Sirve para confirmar el valor ingresado y también para ingresar en el modo programación. Este pulsador se conecta al pin RA3 y RB0.

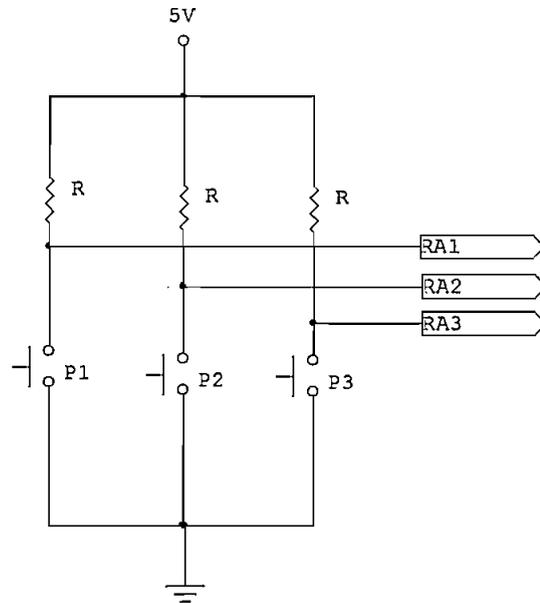


Figura 4.2 Circuito para los pulsadores

Para dimensionar la resistencia  $R$  para cada pulsador se partió de la corriente máxima de entrada  $I_{\text{máx}} = 25\text{mA}$  que soporta el microprocesador.

Se asume una corriente de  $15\text{mA}$ .

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{5V}{15\text{mA}}$$

$$R = 333.33\Omega$$

$$\rightarrow R = 330\Omega$$

### 4.2.3 DISEÑO CIRCUITO DE VISUALIZACIÓN

Para la visualización de los parámetros: temperatura, tiempo y mensajes que genera el sistema, se utilizó el Display de Cristal Líquido (LCD) de 2 líneas y 16 caracteres. En la Figura 4.3 se muestra el circuito de conexión del LCD con el microprocesador. Se utilizó los cuatro bits altos del bus de datos del LCD por facilidad del hardware. Las líneas de control y el bus de datos del LCD se conectan al puerto D del microprocesador.

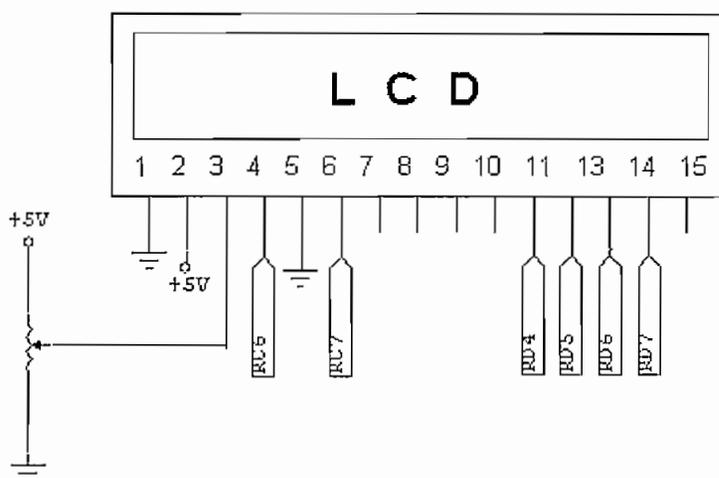


Figura 4.3 Circuito de conexión del LCD al microprocesador

### 4.2.4 DISEÑO DEL CIRCUITO DE SEÑALIZACIÓN

En la figura 4.4 se muestra el circuito para la conexión de 3 leds que se utilizó para indicar en que fase de cocción se encuentra durante el proceso. Este circuito se conecta al puerto C del microprocesador:

- |             |   |            |
|-------------|---|------------|
| 1. Rojo     | : | Calentando |
| 2. Amarillo | : | Constante  |
| 3. Verde    | : | Enfriando  |

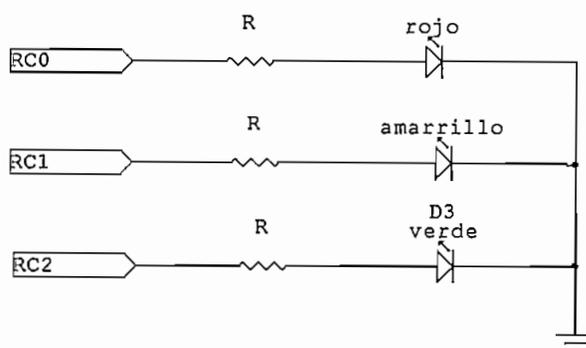


Figura 4.4 Circuito de conexión de 3 leds al microprocesador

Para dimensionar la resistencia  $R$  para cada led se partió de la corriente máxima de salida  $I_{\text{máx}} = 25 \text{ mA}$  que soporta el microprocesador.

Se asume una corriente de  $15 \text{ mA}$

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{5V}{15mA}$$

$$R = 333.33\Omega$$

$$\rightarrow R = 330\Omega$$

#### 4.2.5 RESUMEN DE CONEXIONES DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS AL MICROPROCESADOR

En la Tabla 4.1 se muestra el resumen de las conexiones al microprocesador de los circuitos diseñados.

Puerto	Pines	Circuitos
A	0	Acondicionador de la Pt100
	1	Pulsador 1
	2	Pulsador 2
	3	Pulsador 3

B	0	Pulsador3
	1	Niquelina
	2	Electroválvula
	3	Motor
C	0	Led rojo
	1	Led amarillo
	2	Led verde
	3	Alarma
	6	RS (Lcd)
	7	E (Lcd)
D	1	Detector cruce por cero
	4-7	Bus datos Lcd

Tabla 4.1 Resumen de conexiones del microprocesador con los dispositivos electrónicos

#### 4.3 CONSIDERACIONES PARA EL PROGRAMA

Para desarrollar el programa del controlador es necesario primero identificar las funciones que debe realizar el mismo.

A continuación se describen las funciones que realiza el controlador de temperatura:

1. Realizar la lectura de los valores de temperatura de la Pt100
2. Presentación del valor de la temperatura con una resolución de  $0.1^{\circ}\text{C}$  en el LCD.
3. Presentación del tiempo que se demora cada fase (Calentamiento, Constante y Enfriamiento) en el LCD.

4. Controla el encendido y apagado de los siguientes actuadores: niquelina, electroválvula y agitador.

#### 4.4 DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS PARA EL PROGRAMA

Para el control de la niquelina se implementó la acción de control proporcional, por lo que se necesitó discretizar esta acción de control y expresarla en ecuación de diferencias.

El resultado de la solución de la ecuación de diferencias sirve para generar la señal de recorte síncrono, para obtener el control por períodos enteros sobre la niquelina, por lo que se generará esta señal con los timers del microprocesador.

##### 4.4.1 DISCRETIZACIÓN DE LA ACCIÓN DE CONTROL PID

Para que se pueda introducir la acción de control tipo proporcional en un sistema digital, es necesario que su función de transferencia sea representada en forma de ecuación de diferencias.

Para poder expresar en ecuación de diferencias, se puede partir de la función de transferencia del controlador PID, debido a que la acción proporcional es un caso particular del PID.

De la Ecuación [2.16]

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

La función de transferencia de la Ecuación [2.16] es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad \text{Ec. [4.1]}$$

Para obtener la función de transferencia del controlador digital se discretizó la Ecuación [4.1]. Para la parte integral se utilizó el método de integración

trapezoidal y para el término derivativo mediante el método del rectángulo hacia atrás.

### 1. Parte Integral

Método integración trapezoidal

$$(*) S = \frac{2}{T} * \frac{Z-1}{Z+1}$$

Se reemplaza S en la parte integral de la Ecuación [4.1]

$$\frac{Ki}{s} = \frac{Ki}{\frac{2}{T} * \frac{Z-1}{Z+1}} \quad \text{Ec. [4.2]}$$

### 2. Parte derivativa

Método rectángulo hacia atrás

$$(*) S = \frac{Z-1}{TZ}$$

Se reemplaza S en la parte derivativa de la Ecuación [4.1]

$$Kds = Kd * \frac{Z-1}{TZ} \quad \text{Ec. [4.3]}$$

Entonces reemplazando la Ecuación [4.2] y Ecuación [4.3] en la Ecuación [4.1] se tiene:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = Kp \left[ 1 + \frac{(Z+1)(T)}{2(Z-1)} Ki + \frac{(Z-1)}{TZ} Kd \right]$$

$$\frac{U(Z)}{E(Z)} = Kp \left[ \frac{2(Z-1)(TZ) + (TZ)^2(Z+1)(TKi) + 2(Z-1)(Z-1)Kd}{2(TZ)(Z-1)} \right]$$

$$\frac{U(Z)}{E(Z)} = Kp \left[ \frac{(KiT^2 + 2T + 2Kd) * Z^2 + (KiT^2 - 2T - 4Kd) * Z + 2Kd}{(2T)(Z^2 - Z)} \right] \quad \text{Ec. [4.4]}$$

Se asume que:

$$b_0 = \left( \frac{KiT^2 + 2T + 2Kd}{2T} \right) * Kp$$

$$b_0 = Kp * \left( \frac{Ki}{2} * T + \frac{Kd}{T} + 1 \right) \quad \text{Ec. [4.5]}$$

$$b_1 = \left( \frac{KiT^2 - 2T - 4Kd}{2T} \right) * Kp$$

$$b_1 = Kp * \left( \frac{Ki}{2} * T - 2 \frac{Kd}{T} - 1 \right) \quad \text{Ec. [4.6]}$$

$$b_2 = \left( \frac{2KpKd}{2T} \right)$$

$$b_2 = \frac{KpKd}{T} \quad \text{Ec. [4.7]}$$

Se reemplaza b0, b1 y b2 en la ecuación [4.4] y se tiene:

$$\frac{U(Z)}{E(Z)} = \frac{b_0Z^2 + b_1Z + b_2}{Z^2 - Z} \quad \text{Ec. [4.8]}$$

Se multiplica al numerador y denominador de la ecuación [4.8] por  $Z^{-2}$ , dando como resultado:

$$\frac{U(Z)}{E(Z)} = \frac{b_0 + b_1Z^{-1} + b_2Z^{-2}}{1 - Z^{-1}}$$

$$U(Z) * (1 - Z^{-1}) = E(Z) * (b_0 + b_1Z^{-1} + b_2Z^{-2})$$

$$U(Z) - U(Z)Z^{-1} = b_0E(Z) + b_1E(Z)Z^{-1} + b_2E(Z)Z^{-2}$$

$$u(n) - u(n-1) = b_0e(n) + b_1e(n-1) + b_2e(n-2)$$

$$u(n) = u(n-1) + b_0e(n) + b_1e(n-1) + b_2e(n-2) \quad \text{Ec. [4.9]}$$

La definición de error está dada por:

$$e(n) = r(n) - y(n)$$

Para la acción de control proporcional se tiene:

$$K_i=0 \text{ y } K_d=0$$

Se reemplaza  $K_i$  y  $K_d$  en la Ecuación [4.5]

$$b_0 = K_p$$

Se reemplaza  $K_i$  y  $K_d$  en la Ecuación [4.6]

$$b_1 = -K_p$$

Se reemplaza  $K_i$  y  $K_d$  en la Ecuación [4.7]

$$b_2 = 0$$

Se reemplaza los valores de  $b_0$ ,  $b_1$  y  $b_2$  en la Ecuación [4.9] y se tiene:

$$u(n) = u(n-1) + K_p[e(n) - e(n-1)] \quad \text{Ec.}[4.10]$$

Para obtener realimentación unitaria  $K_p=1$ , se reemplaza en la Ecuación [4.10].

$$u(n) = u(n-1) + [e(n) - e(n-1)] \quad \text{Ec.}[4.11]$$

La Ecuación [4.11] es la acción de control proporcional expresado en forma de ecuación de diferencias. Esta ecuación será resuelta por el microprocesador para controlar el encendido de la níquelina.

#### 4.4.2 GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE RECORTE SÍNCRONO

En la Figura 4.5 se muestra el diagrama de bloques, para generar la señal de recorte síncrono.

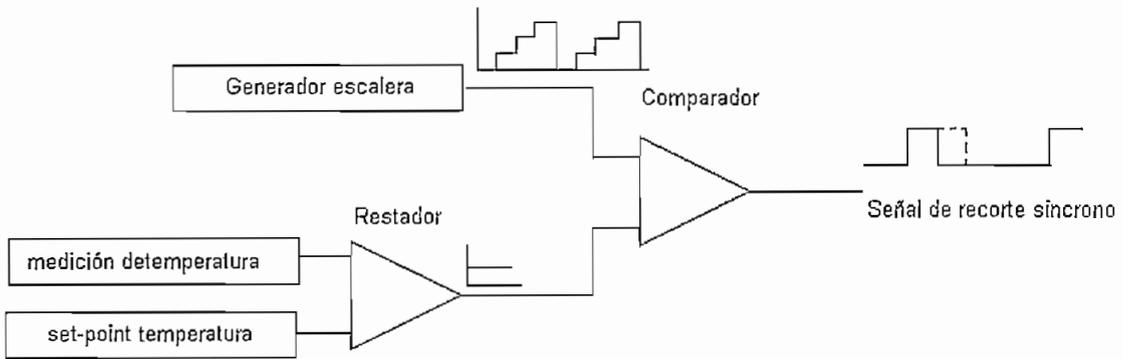


Figura 4.5 Diagrama de bloques para generar la señal de recorte síncrono

Los escalones del generador de escalera tienen una duración igual al período de la red para realizar el control por períodos enteros. Para este caso en particular se tiene 15 escalones. Por lo tanto el período de la onda generador de escalera es:

$$T = N * (\text{Período\_de\_red})$$

$$N = \text{número\_escalones}$$

$$T = 15 * 16.66\text{ms}$$

$$T = 0.25\text{s}$$

En la Tabla 4.1 se muestra los valores de tiempo para cada escalón. En la Figura 4.6 se muestra el gráfico del número de escalones con respecto al tiempo de cada escalón.

# de Escalones	Tiempo(s)
0	0,00
1	0,02
2	0,03
3	0,05
4	0,07
5	0,08
6	0,10

7	0,12
8	0,13
9	0,15
10	0,17
11	0,18
12	0,20
13	0,22
14	0,23
15	0,25

Tabla 4.1 Tiempos para generar los escalones

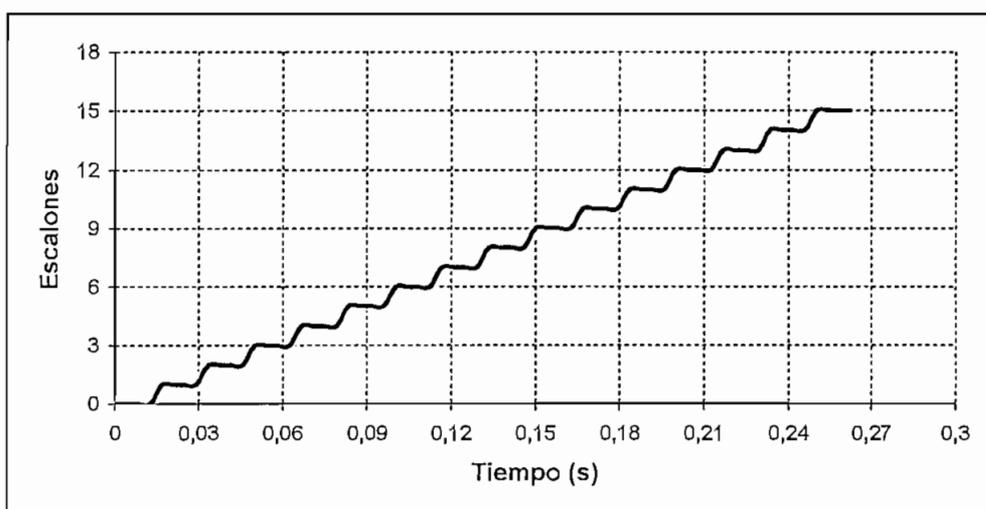


Figura 4.6 Forma de onda del generador de escalera

La diferencia entre el set-point de temperatura y la medición de temperatura se la compara con la onda generador de escalera. Del resultado de esta comparación se obtendrá la señal de recorte síncrono que controlará el encendido y apagado del triac.

El microprocesador resuelve la Ecuación [4.11] que es la ecuación de diferencias del algoritmo de control proporcional. El resultado de esta ecuación toma uno de los valores de la Tabla 4.1 y determina el tiempo que se encuentra en alto ó en bajo el pin RB1 del microprocesador al cual está conectado la niquelina, generando de esta manera la señal de recorte síncrono.

## **4.5 DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL PARA EL MICROPROCESADOR**

Como ya se explicó, el programa utilizado por el microprocesador debe, a más de realizar el control propiamente dicho, manejar periféricos de entrada y salida como lectura de valor de la temperatura, pulsadores, envía datos al display de cristal líquido, leds y las señales de control para cada uno de los actuadores.

A continuación se explica mediante el uso de diagramas de flujo, el funcionamiento de las partes principales del programa como son programa principal, lectura de los datos desde los pulsadores, algoritmo de control proporcional, envío de las señales de control a los actuadores.

### **4.5.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA**

La estructura de las tareas del programa implementado en el microprocesador se muestra en la Figura 4.7. Se describe brevemente a continuación en lenguaje estructurado.

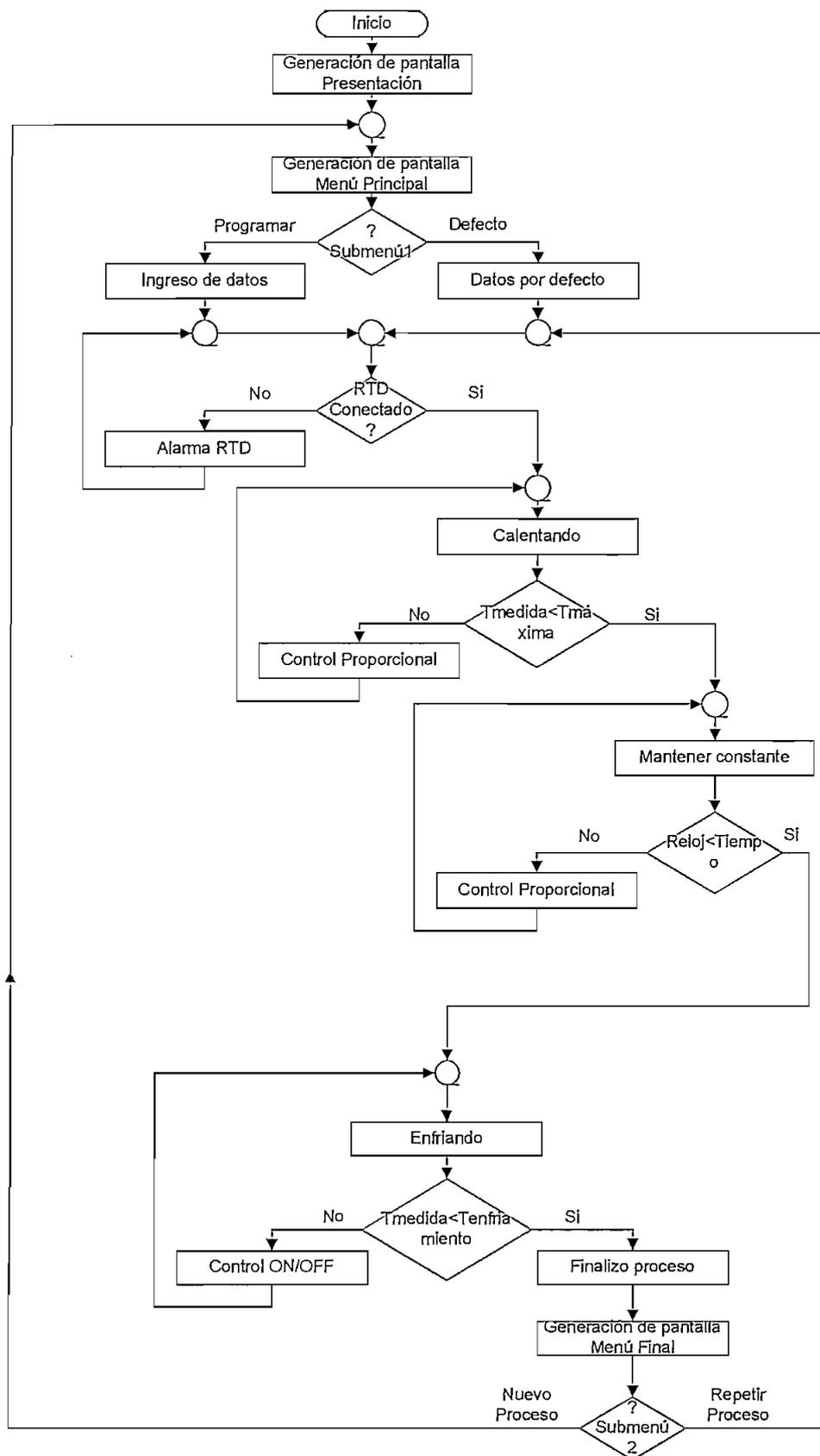


Figura 4.7 Diagrama de flujo del programa principal

**Generación de Pantalla Presentación**

Muestra en LCD los siguientes mensajes:

Control de temperatura

Amilógrafo Brabender

Retardo de tiempo

Borra LCD

Muestra en LCD los siguientes mensajes:

Edgar Maila

Electrónica

Retardo de tiempo

Borra LCD

**Fin Tarea****Generación de Pantalla Menú Principal**

Muestra en LCD los siguientes mensajes:

1. Defecto

2. Programar

**Fin Tarea****Datos por defecto**

El sistema carga los siguientes valores:

Temperatura mínima ( $T_{min}=25^{\circ}C$ )

Temperatura máxima ( $T_{max}=90^{\circ}C$ )

Gradiente de calentamiento ( $m_{cal}=1.5^{\circ}C/min$ )

Tiempo de mantenimiento (tiempo=20 min)ç

Temperatura de enfriamiento ( $T_{enf}=55^{\circ}C$ )

Gradiente de enfriamiento ( $m_{enf}=1.5^{\circ}C/min$ )

**Fin de Tarea****Ingreso de datos**

Ingrese temperatura mínima ( $T_{min}$ )

Ingrese temperatura máxima ( $T_{max}$ )

Ingrese gradiente de calentamiento ( $m_{cal}$ )

Ingrese tiempo para mantener constante la temperatura (Tiempo)

Ingrese temperatura de enfriamiento ( $T_{enf}$ )

Ingrese gradiente de enfriamiento ( $m_{enf}$ )

**Fin de Tarea**

**Alarma RTD**

Activa Buzzer

Muestra en LCD el siguiente mensaje:

Sensor Desconectado

**Fin de Tarea****Calentando**

Apaga Electroválvula

Leer dato de sensor de temperatura (temperatura medida)

Temperatura mínima igual a temperatura de referencia

Muestra en LCD los siguientes datos:

Temperatura medida

Temperatura de referencia

Reloj

Calcula tiempo en base a pendiente de calentamiento

Activa Agitador

Activa reloj

Si reloj menor que tiempo

No incrementa temperatura referencia

No incrementa tiempo calculado

Caso contrario

Incrementa temperatura referencia en pasos de uno

Incrementa tiempo en pasos igual a tiempo

**Fin Tarea****Control Proporcional**

Calcula error  $e(n)$

Error igual a Temperatura de referencia menos Temperatura medida

Resuelve ecuación de diferencias:

Salida = Salida\*[ $e(n)-e(n-1)$ ]

Enciende Niquelina en base la solución de la ecuación de diferencias.

**Fin Tarea****Mantener Constante**

Leer dato de sensor de temperatura (Temperatura medida)

Muestra en LCD los siguientes datos:

Temperatura medida

Temperatura de referencia

Reloj

Temperatura máxima igual a temperatura de referencia

Activo reloj

#### Fin Tarea

#### Enfriando

Apaga Niquelina

Leer dato de sensor de temperatura (temperatura medida)

Temperatura enfriamiento igual a temperatura de referencia

Muestra en LCD los siguientes datos:

Temperatura medida

Temperatura de referencia

Reloj

Calcula tiempo en base a pendiente de enfriamiento

Activa reloj

Si reloj menor que tiempo

No decrementa temperatura referencia

No incrementa tiempo calculado

Caso contrario

Decrementa temperatura referencia en pasos de uno

Incrementa tiempo en pasos igual a tiempo

#### Fin Tarea

#### Control ON/OFF

Si temperatura medida mayor que temperatura de referencia

Enciende electroválvula

Caso Contrario

Apaga electroválvula

#### Fin Tarea

#### Finalizo Proceso

Apaga Niquelina

Apaga Agitador

Apaga Electroválvula

#### Fin Tarea

#### Generación de Pantalla Menú Final.

Muestra en LCD los siguientes mensajes:

1. Repetir Proceso

2. Nuevo Proceso

#### Fin Tarea

En este capítulo se ha diseñado la interfaz controlador/usuario que sirve para el ingreso de datos y lectura de mensajes que genera el controlador.

Se ha elaborado también el programa de forma secuencial para realizar la adquisición de datos, tratamiento de los mismos, resolver la ecuación de diferencias del algoritmo de control proporcional y realiza el control de los actuadores.

En el siguiente capítulo se realizará las pruebas de funcionamiento del hardware del controlador de temperatura. Se realizarán pruebas de todo el sistema implementado.

## **CAPÍTULO 5**

### **PRUEBAS DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA**

## **CAPÍTULO 5**

### **PRUEBAS DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA**

#### **5.1 INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se describen las pruebas que se diseñaron para probar el equipo en sus diferentes funciones.

Finalmente se corrieron pruebas reales para determinar si el equipo era capaz y confiable para proporcionar la curva característica de una mezcla.

#### **5.2 CALIBRACIÓN DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA**

En primer lugar se procedió a calibrar el controlador de temperatura construido. Para esta tarea se utilizó como patrón de temperatura el siguiente instrumento:

THERMOLOG RTD

Marca: Digi Sense

Serie : 142826

Perteneciente al laboratorio del DECAB.

#### **5.3 PRUEBAS DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR DE LA PT100**

Para determinar las características del medidor de temperatura se realizaron medidas para determinar: la repetibilidad, histéresis y linealidad de la Pt100.

##### **5.3.1 REPETIBILIDAD**

Es la máxima desviación entre los valores de temperatura al medir un mismo valor de entrada con el mismo sensor y en las mismas condiciones de servicio.

Para analizar la repetibilidad se realizaron varias pruebas al controlador de temperatura de las cuales se seleccionaron las dos pruebas, que a continuación se describen debido a que éstas pruebas son las más representativas de todas las mediciones realizadas.

Para determinar la repetibilidad del controlador de temperatura las pruebas se realizaron incrementando la temperatura del líquido de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $95^{\circ}\text{C}$ .

### 5.3.1.1 Primera prueba

En la Tabla 5.1 se muestra el resultado de las mediciones del patrón de temperatura y el acondicionador del RTD; Además se presenta el cálculo del error relativo. En la Figura 5.1 se muestra el gráfico acondicionador de temperatura del RTD vs Patrón de temperatura. En la Figura 5.2 se muestra la curva de tendencia de los datos de la Tabla 5.1.

Patrón de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Acondicionador RTD ( $^{\circ}\text{C}$ )	Error relativo (%)
20	19,9	0,50
25	25,1	0,40
30	29,8	0,67
35	34,9	0,29
40	40,2	0,50
45	44,6	0,89
50	49,8	0,40
55	54,9	0,18
60	59,7	0,50
65	64,9	0,15
70	70,1	0,14
75	74,8	0,27
80	79,8	0,25
85	85,1	0,12
90	89,8	0,22
95	95,3	0,32

Tabla 5.1 Valores temperatura del acondicionador del RTD y patrón de temperatura

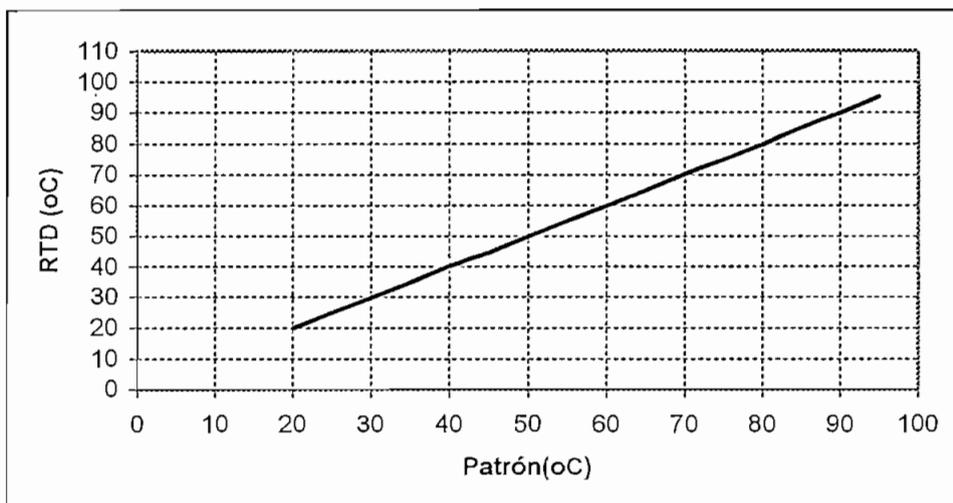


Figura 5.1 Temperatura del RTD vs Patrón de temperatura

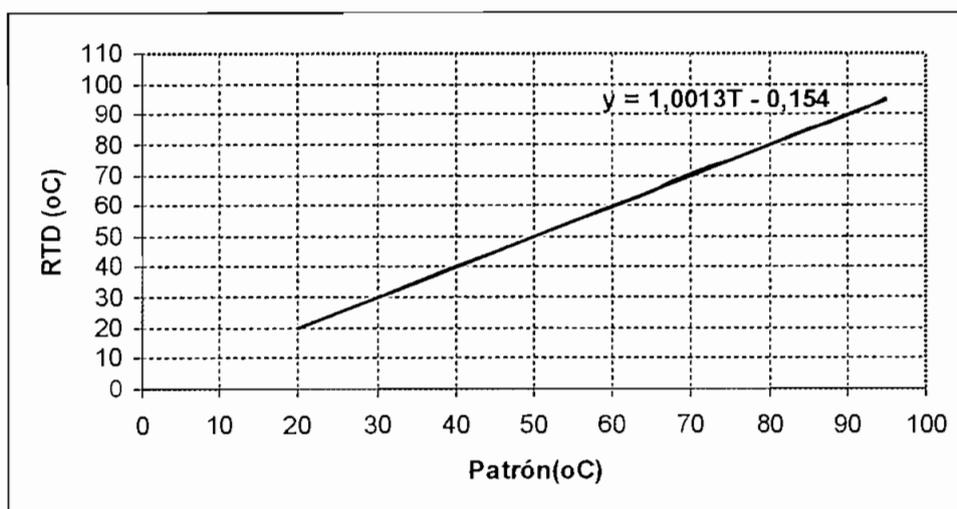


Figura 5.2 Curva de tendencia de la Tabla 1

La ecuación para esta curva se la obtiene con la ayuda de Microsoft Excel y es la siguiente:

$$Y = 1.0013 T - 0.154 [^{\circ}C] \quad \text{Ec. [5.1]}$$

### 5.3.1.2 Segunda prueba

En la Tabla 5.2 se muestra el resultado de las mediciones del patrón de temperatura y el acondicionador del RTD; Además se presenta el cálculo del

error relativo. En la Figura 5.3 se muestra el gráfico acondicionador de temperatura del RTD vs Patrón de temperatura. En la Figura 5.4 se muestra la curva de tendencia de los datos de la Tabla 5.2.

Patrón de temperatura (oC)	Acondicionador RTD (oC)	Error relativo (%)
20	19,9	0,50
25	25,2	0,80
30	30	0,00
35	35,1	0,29
40	39,7	0,75
45	45	0,00
50	49,7	0,60
55	55,4	0,73
60	59,7	0,50
65	65,3	0,46
70	69,9	0,14
75	74,9	0,13
80	80,3	0,37
85	85	0,00
90	89,7	0,33
95	95,3	0,32

Tabla 5.2 Valores temperatura del acondicionador del RTD y patrón de temperatura

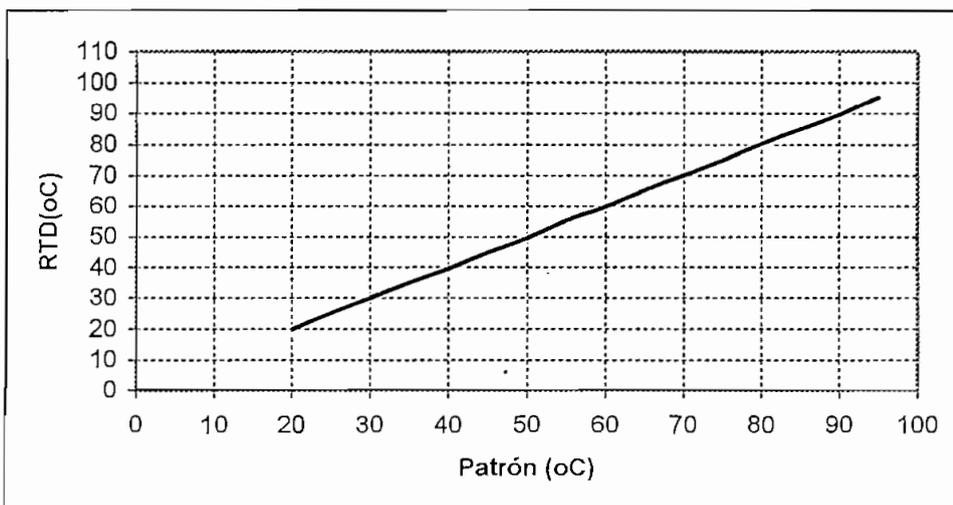


Figura 5.3 Temperatura del RTD vs Patrón de temperatura

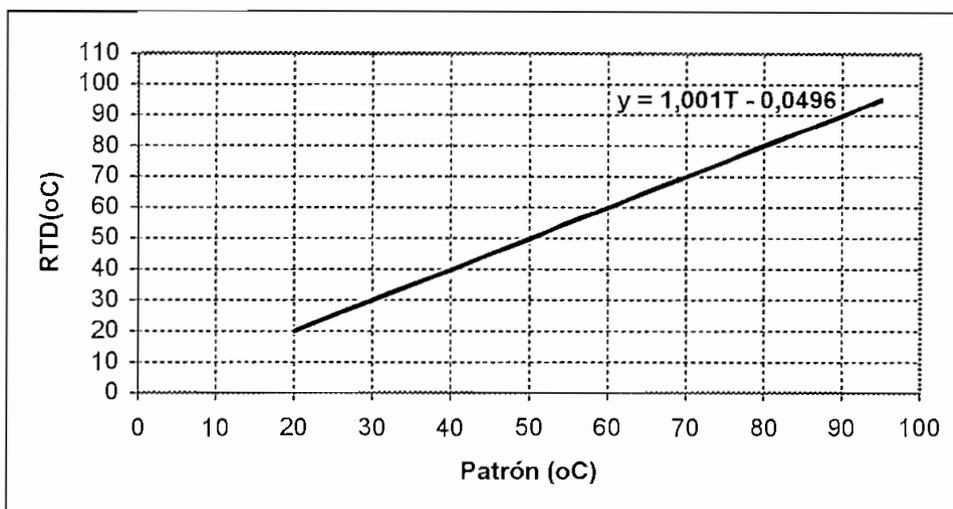


Figura 5.4 Curva de tendencia de la Tabla 2

La ecuación para esta curva se la obtiene con la ayuda de Microsoft Excel y es la siguiente:

$$Y=1.001 T-0.0496 [^{\circ}C] \quad \text{Ec. [5.2]}$$

Para determinar la repetibilidad final desde los datos obtenidos de las pruebas se comparó las lecturas de temperatura del acondicionador del RTD de la Tabla 5.1 y Tabla 5.2. Los resultados se muestran en la Tabla 5.3.

Patrón de temperatura (oC)	Prueba 1	Prueba 2	Desviación Estándar	
	Acondicionador RTD (oC)	Acondicionador RTD (oC)	Prueba 1	Prueba 2
20	19,9	19,9	0,07	0,07
25	25,1	25,2	0,07	0,14
30	29,8	30	0,14	0,00
35	34,9	35,1	0,07	0,07
40	40,2	39,7	0,14	0,21
45	44,6	45	0,28	0,00
50	49,8	49,7	0,14	0,21
55	54,9	55,4	0,07	0,28
60	59,7	59,7	0,21	0,21
65	64,9	65,3	0,07	0,21

70	70,1	69,9	0,07	0,07
75	74,8	74,9	0,14	0,07
80	79,8	80,3	0,14	0,21
85	85,1	85	0,07	0,00
90	89,8	89,7	0,14	0,21
95	95,3	95,3	0,21	0,21

Tabla 5.3 Valores de temperatura de la comparación entre prueba 1 y prueba 2

Se realizó el cálculo de la desviación estándar y el máximo valor es  $\pm 0.28 \text{ }^{\circ}\text{C}$  de las mediciones de temperatura realizadas, de este análisis se puede afirmar que el acondicionador del RTD da resultados iguales para pruebas que se realicen en las mismas condiciones.

### 5.3.2 LINEALIDAD

La linealidad expresa la máxima desviación entre la respuesta real y la curva de calibración. Se realiza el análisis de las Ecuaciones [5.1] y [5.2] obtenidas en las dos pruebas anteriormente descritas.

La ecuación general de la recta es:

$$y = mT + b$$

m= pendiente

b=punto de corte

Prueba 1:  $y = 1,0013T - 0,154 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$                       m=1                      b=0.154

Prueba 2:  $y = 1,001T - 0,0496 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$                       m=1                      b=0.0496

Las dos ecuaciones tienen la misma pendiente y difieren en el punto de corte con  $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dando como resultado que el acondicionador del RTD es lineal en todo el rango analizado.

### 5.3.3 HISTÉRESIS

La histéresis se refiere a la diferencia en la salida para una misma entrada, cuando la variable temperatura recorre toda la escala en los sentidos, ascendente y descendente.

Se utiliza los datos de la Tabla 5.1 para el ascenso de la temperatura, para el descenso de la temperatura se tomaron datos que se muestra en la Tabla 5.4. En la Figura 5.5 se muestra el gráfico acondicionador de temperatura del RTD vs Patrón de temperatura. En la Figura 5.6 se muestra la curva de tendencia de los datos de la Tabla 5.4.

Patrón de temperatura (oC)	Acondicionador RTD (oC)	Error relativo (%)
95	95,2	0,21
90	90,2	0,22
85	85	0,00
80	80,2	0,25
75	74,8	0,27
70	70,1	0,14
65	65,1	0,15
60	59,8	0,33
55	55,1	0,18
50	50,1	0,20
45	45,3	0,67
40	39,7	0,75
35	34,9	0,29
30	30,2	0,67
25	25,1	0,40
20	19,9	0,50

Tabla 5.4 Valores de la temperatura cuando desciende la temperatura

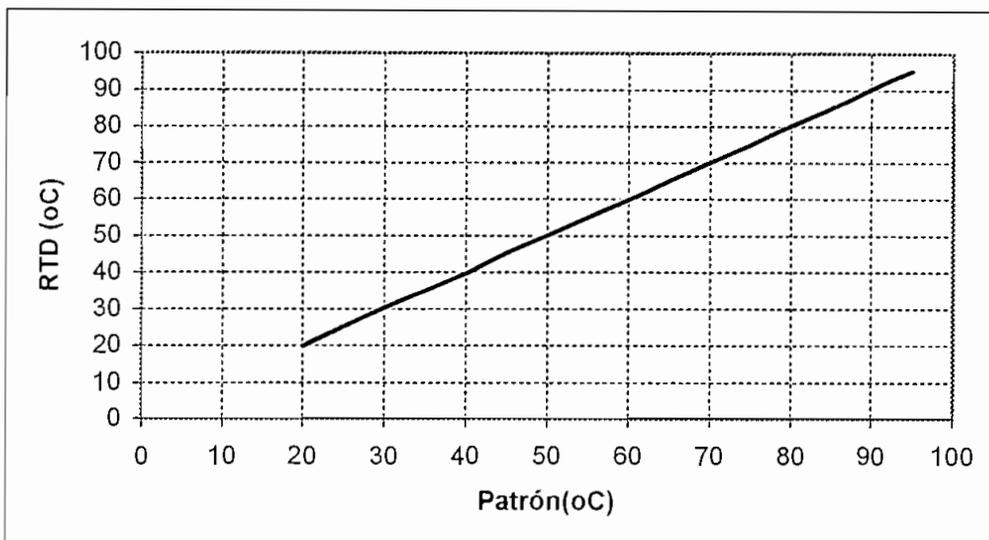


Figura 5.5 Temperatura del RTD vs Patrón de temperatura

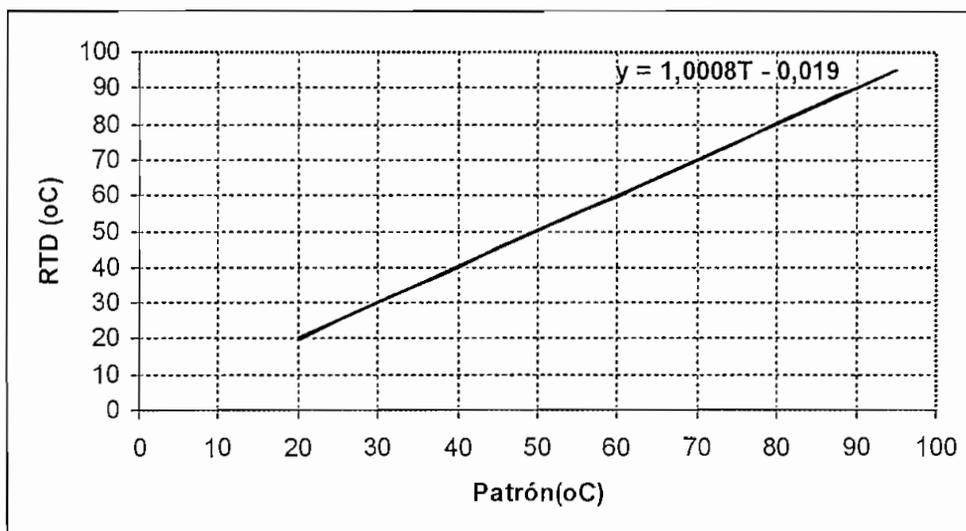


Figura 5.6 Curva de tendencia de la Tabla 5.3

En la Tabla 5.5 se presenta el resultado de la diferencia entre los valores de temperatura ascendente y temperatura descendente. Dando como resultado que la histéresis del controlador de temperatura es  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

Acondicionador RTD(Ascendente) (°C)	Acondicionador RTD(Descendente) (°C)	Ascendente- Descendente (°C)
19,9	19,9	0
25,1	25,1	0
29,8	30,2	0,4
34,9	34,9	0
40,1	39,8	-0,3
44,6	45,1	0,5
49,8	50,1	0,3
54,9	55,1	0,2
59,7	59,8	0,1
64,9	65,1	0,2
70,1	70,1	0
74,8	74,8	0
79,9	80,2	0,3
85,1	85	-0,1
89,8	90,2	0,4
95,3	95,2	-0,1

Tabla 5.5 Valores de la diferencia de temperatura

#### 5.4 PRUEBAS DEL CIRCUITO ACTUADOR

Para esta prueba se realizaron medidas de voltaje sobre la niquelina para diferentes valores de temperatura de set-point con respecto a la temperatura medida. Luego se realizó el cálculo de la corriente y potencia para analizar si está entregando pasos de potencia constantes a la niquelina.

Los valores de voltaje, corriente y potencia que se muestran en la Tabla 5.6. Para valores mayores a  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la potencia que se obtiene es 500 W esto se debe a que se realiza el control de 15 períodos completos de la red.

Se realiza un ejemplo de cálculo de la corriente y la potencia para el caso de  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La resistencia de la niquelina es  $96.8 \Omega$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = \frac{54}{96.8} = 0.56A$$

$$P = V * I$$

$$P = 54 * 0.56 = 30.12W$$

Tref-Tmed (oC)	Voltaje (V)	Corriente (V)	Potencia (W)
0	0	0,00	0,00
0,1	54	0,56	30,12
0,2	83	0,86	71,17
0,3	100	1,03	103,31
0,4	112	1,16	129,59
0,5	126	1,30	164,01
0,6	140	1,45	202,48
0,7	149	1,54	229,35
0,8	157	1,62	254,64
0,9	172	1,78	305,62
1	181	1,87	338,44
1,1	190	1,96	372,93
1,2	198	2,05	405,00
1,3	207	2,14	442,65
1,4	214	2,21	473,10
1,5	220	2,27	500,00
1,8	220	2,27	500,00
1,9	220	2,27	500,00
2	220	2,27	500,00
2,1	220	2,27	500,00

Tabla 5.6 Valores de potencia entregada a la niquelina

En la Figura 5.7 se muestra el gráfico de la potencia vs la diferencia entre el set-point y la temperatura medida. La curva obtenida es aproximadamente

lineal y entrega 15 pasos de potencia de aproximadamente 30 Watos cada paso, esto se cumple hasta cuando la diferencia entre el set-point y el valor de temperatura medido sea menor igual a  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para rangos mayores a  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  se entrega toda la potencia, es decir, 500 Watos. Entonces por cada  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  que incremente la temperatura se entrega a la niquelina 30 Watos, por lo tanto se puede asumir que los pasos de potencia que se entrega a la niquelina son constantes.

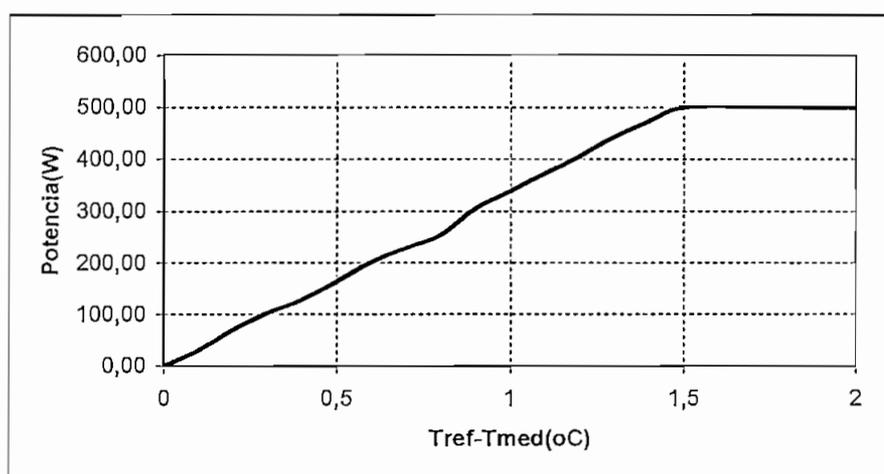


Figura 5.7 Potencia vs Tref-Tmed

## 5.5 PRUEBA DE TODO EL SISTEMA

Para está prueba se utilizo 500ml de mezcla de producto de almidón y se realizó la prueba que más se realiza en el DECAB en su tarea de proveer servicios a la Industria Ecuatoriana.

En primer lugar se empezó con la opción por defecto que debe cumplir con los siguientes parámetros:

1. Temperatura mínima:  $25^{\circ}\text{C}$
2. Temperatura máxima:  $90^{\circ}\text{C}$
3. Temperatura enfriamiento:  $55^{\circ}\text{C}$

4. Gradiente de calentamiento (m1) = Gradiente de enfriamiento (m2) =  $1.5^{\circ}C/min$
5. Tiempo (fase mantenimiento): 20 minutos

Se tomaron datos de temperatura para las tres fases del proceso de cocción del almidón. A continuación se describe cada fase del proceso.

### 5.5.1 FASE DE CALENTAMIENTO

Para esta fase se realizó las mediciones de temperatura en función del tiempo, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.7. En la Figura 5.8 se muestra el gráfico temperatura vs tiempo y en la Figura 5.9 se muestra la curva linealizada de esta prueba para calcular la pendiente con la que sube la temperatura.

Tiempo (min)	Temperatura medida (oC)
0,0	20
0,7	20,7
1,3	21,6
2,0	22,8
2,7	23,8
3,3	25
4,0	25,9
4,7	27,2
5,3	27,99
6,0	28,8
6,7	29,6
7,3	30,8
8,0	31,9
8,7	32,7
9,3	33,8
10,0	34,9
10,7	36,3
11,3	36,7
12,0	37,9
12,7	39,2

13,3	40,1
14,0	40,7
14,7	41,8
15,3	42,8
16,0	43,8
16,7	44,6
17,3	45,9
18,0	47,2
18,6	47,9
19,3	48,9
20,0	49,8
20,6	51
21,3	51,8
22,0	52,8
22,6	53,9
23,3	54,9
24,0	55,8
24,6	57,1
25,3	58,2
26,0	58,8
26,6	59,7
27,3	60,9
28,0	61,8
28,6	62,5
29,3	63,8
30,0	64,9
30,6	65,8
31,3	66,7
32,0	67,8
32,6	69,1
33,3	70,1
34,0	70,8
34,6	71,8
35,3	72,9
36,0	74,1
36,6	74,8
37,3	75,6
38,0	76,8
38,6	77,7

39,3	78,7
40,0	79,8
40,6	80,7
41,3	81,7
42,0	82,8
42,6	83,9
43,3	85,2
44,0	85,8
44,6	86,7
45,3	87,8
46,0	88,8
46,6	89,8

Tabla 5.7 Valores de temperatura en la fase de calentamiento

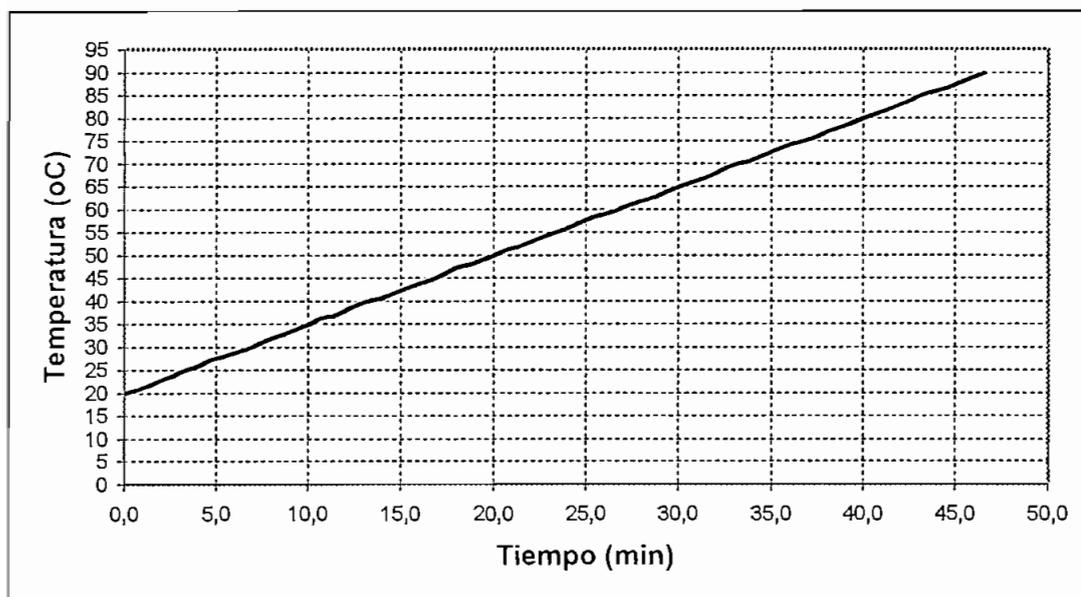


Figura 5.8 Temperatura vs tiempo

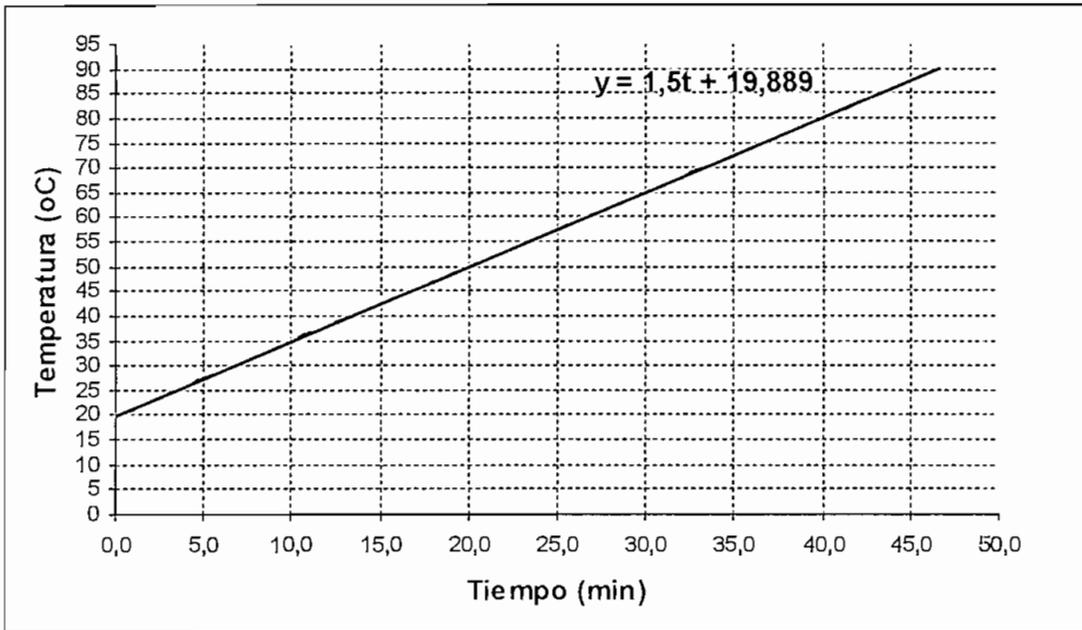


Figura 5.9 Temperatura vs tiempo linealizada

De la Figura 5.8 se calculó la ecuación de la recta con ayuda del Microsoft Excel y esta es  $Y=1.5t+19.889$  [ $^{\circ}C$ ] y el valor de la pendiente es  $1.5$   $^{\circ}C/min$ .

### 5.5.2 FASE "MANTENER CONSTANTE"

En la Tabla 5.8 se muestra los valores de temperatura de esta prueba. En la Figura 5.10 se muestra el gráfico de la temperatura vs tiempo y en la Figura 5.11 se presenta la curva linealizada de esta prueba para calcular la ecuación de esta recta

Tiempo (min)	Temperatura medida (°C)
0	89,8
1	90
2	89,9
3	90
4	89,9
5	89,8
6	89,8
7	90

8	89,8
9	89,9
10	90
11	89,9
12	89,8
13	90
14	89,8
15	89,8
16	89,8
17	90
18	89,9
19	89,9
20	89,9

Tabla 5.8 Valores de temperatura de la fase de mantener constante la temperatura

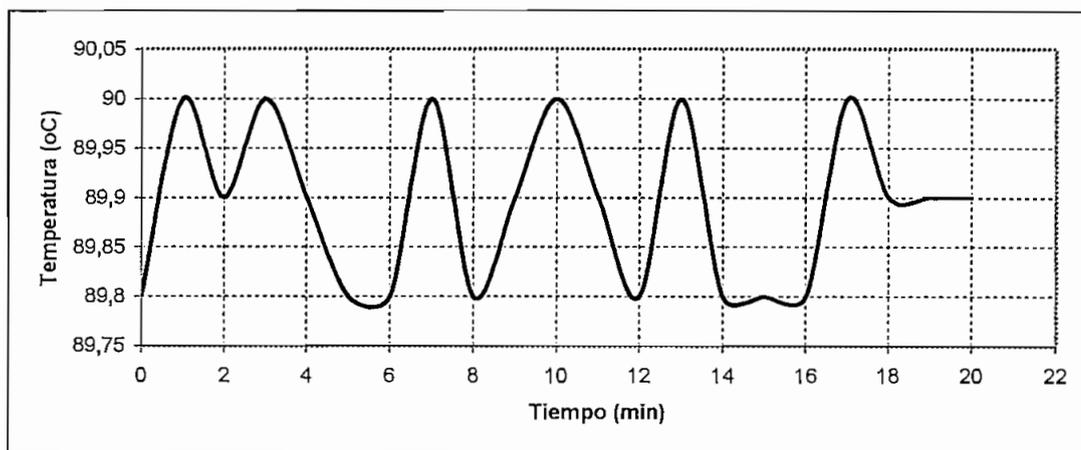


Figura 5.10 Temperatura vs tiempo

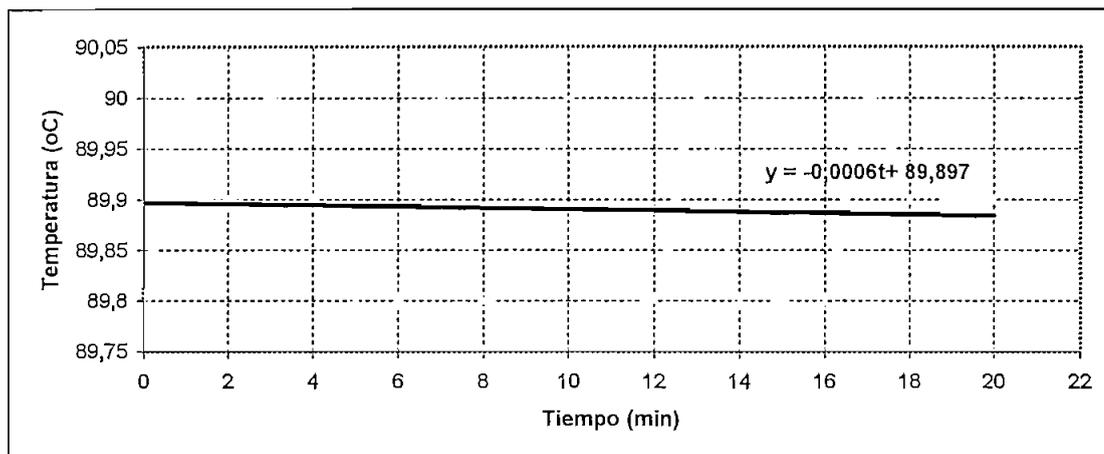


Figura 5.11 Temperatura vs tiempo linealizada

De la figura 5.11 se calcula la ecuación de la recta:  $y = -0,0006t + 89,89$ . La pendiente de esta recta se asume que es cero; por lo tanto, la temperatura se mantiene en  $89,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 5.5.3 FASE DE ENFRIAMIENTO

Para esta fase se realizó nuevamente mediciones de temperatura en función del tiempo los valores que se obtuvieron se muestran en la Tabla 5.9.

En la Figura 5.12 se muestra el gráfico temperatura vs tiempo y en la Figura 5.13 se muestra la curva linealizada de esta prueba para calcular la pendiente con la que baja la temperatura.

Tiempo (min)	Temperatura medida (°C)
0,0	89,9
0,7	89,2
1,3	88,3
2,0	87,2
2,7	86,1
3,3	85,3
4,0	84,2
4,7	83
5,3	81,9

6,0	80,9
6,7	80,1
7,3	79,1
8,0	77,9
8,7	76,8
9,3	76,3
10,0	75
10,7	74,2
11,3	73,1
12,0	72
12,7	71,2
13,3	69,8
14,0	69,2
14,7	68,1
15,3	66,8
16,0	65,9
16,7	65,2
17,3	64,1
18,0	63,2
18,6	62,1
19,3	60,9
20,0	59,8
20,6	59,1
21,3	58,3
22,0	57
22,6	56,1
23,3	55,1

Tabla 5.9 Valores de temperatura para la fase de enfriamiento

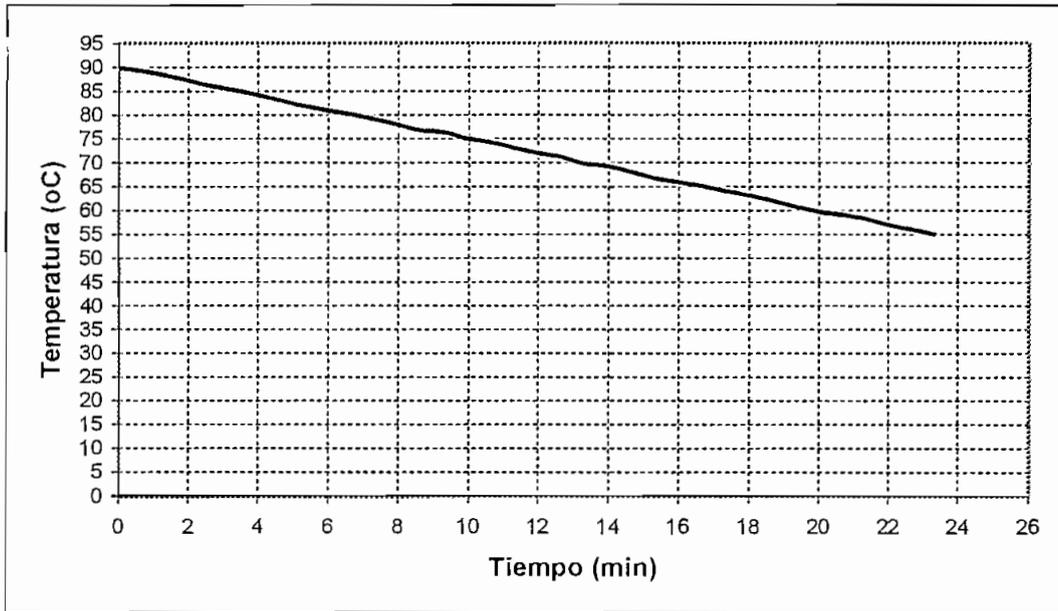


Figura 5.12 Temperatura vs tiempo

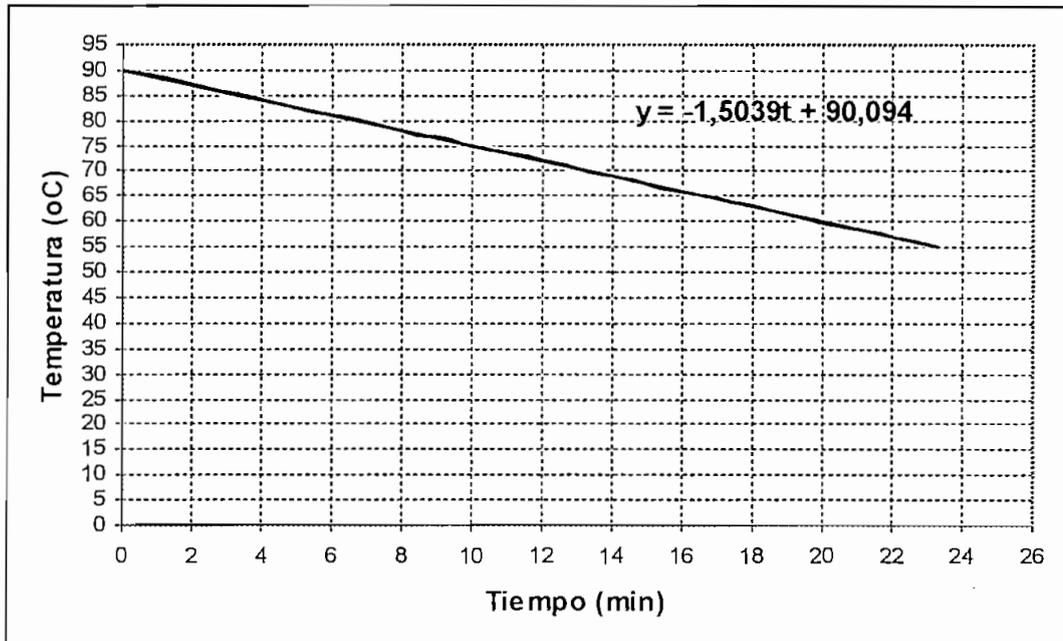


Figura 5.13 Temperatura vs tiempo linealizada

De la Figura 5.13 se cálculo la ecuación de la recta con ayuda del Microsoft Excel y esta es  $y=1.503t+90.09$  [°C] y el valor de la pendiente es  $1.5$  °C/min .

En la Figura 5.14 se muestra la curva de temperatura obtenida al realizar las tres fases del proceso de cocción de la mezcla del producto de almidón.

En la Figura 5.15 y Figura 5.16 se muestra la curva de la viscosidad de la mezcla del producto de almidón al terminar toda la prueba.

En la curva obtenida se puede observar que la mezcla al ser sometida a la fase de calentamiento presenta un grado de gelatinización mínima (viscosidad mínima) a la temperatura mínima y un grado de gelatinización máxima (viscosidad máxima) a la temperatura máxima.

En la fase de estabilización de la temperatura la viscosidad puede aumentar o disminuir de acuerdo a las características propias de la mezcla.

En la fase de enfriamiento la viscosidad disminuye hasta un valor desconocido. Este valor de viscosidad depende nuevamente de las características de la mezcla que se este analizando.

La curva obtenida fue analizada por el DECAB y se comprobó que el resultado obtenido es el correcto para la muestra analizada.

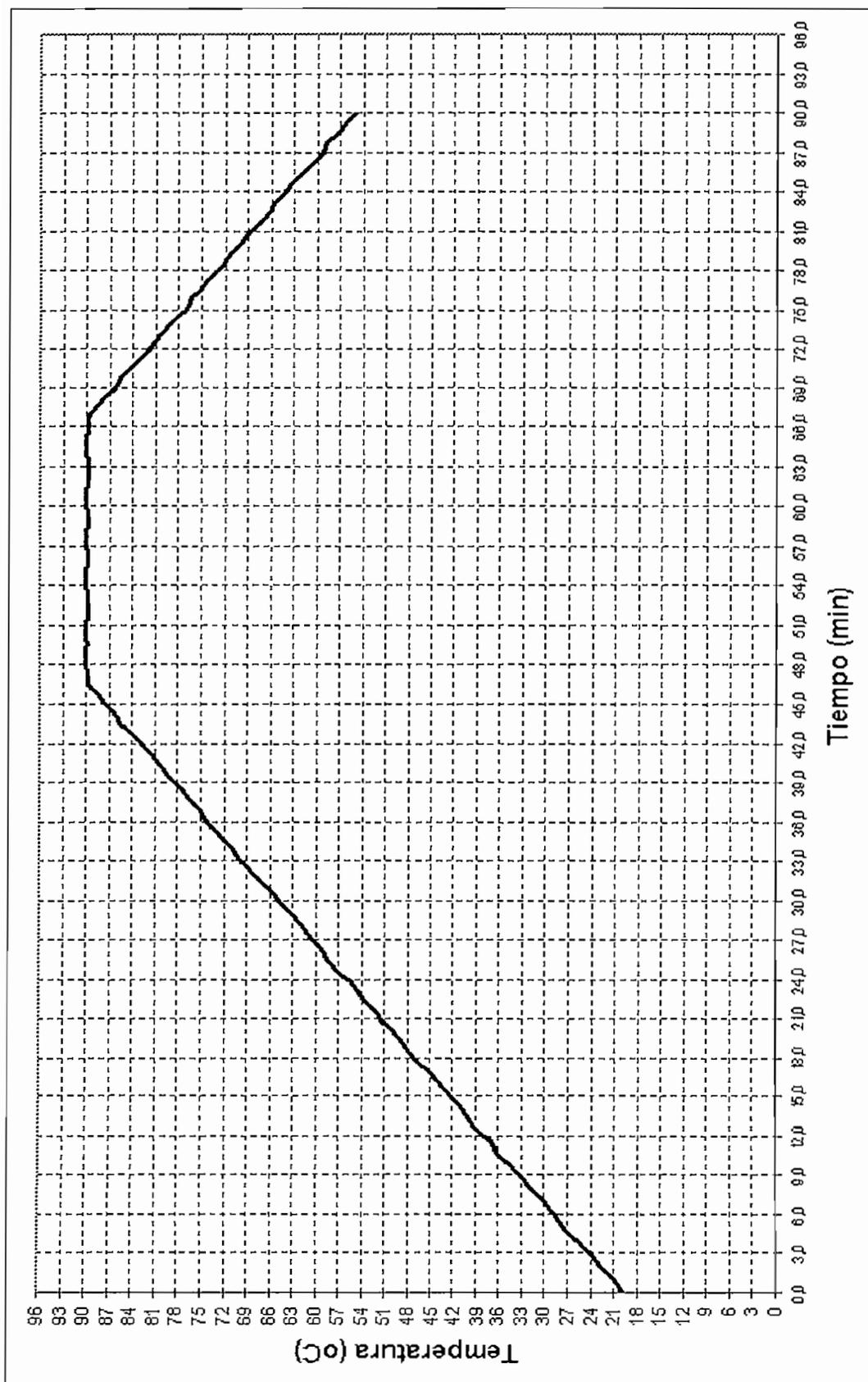


Figura 5.14 Gráfico de temperatura de las 3 fases de cocción del almidón

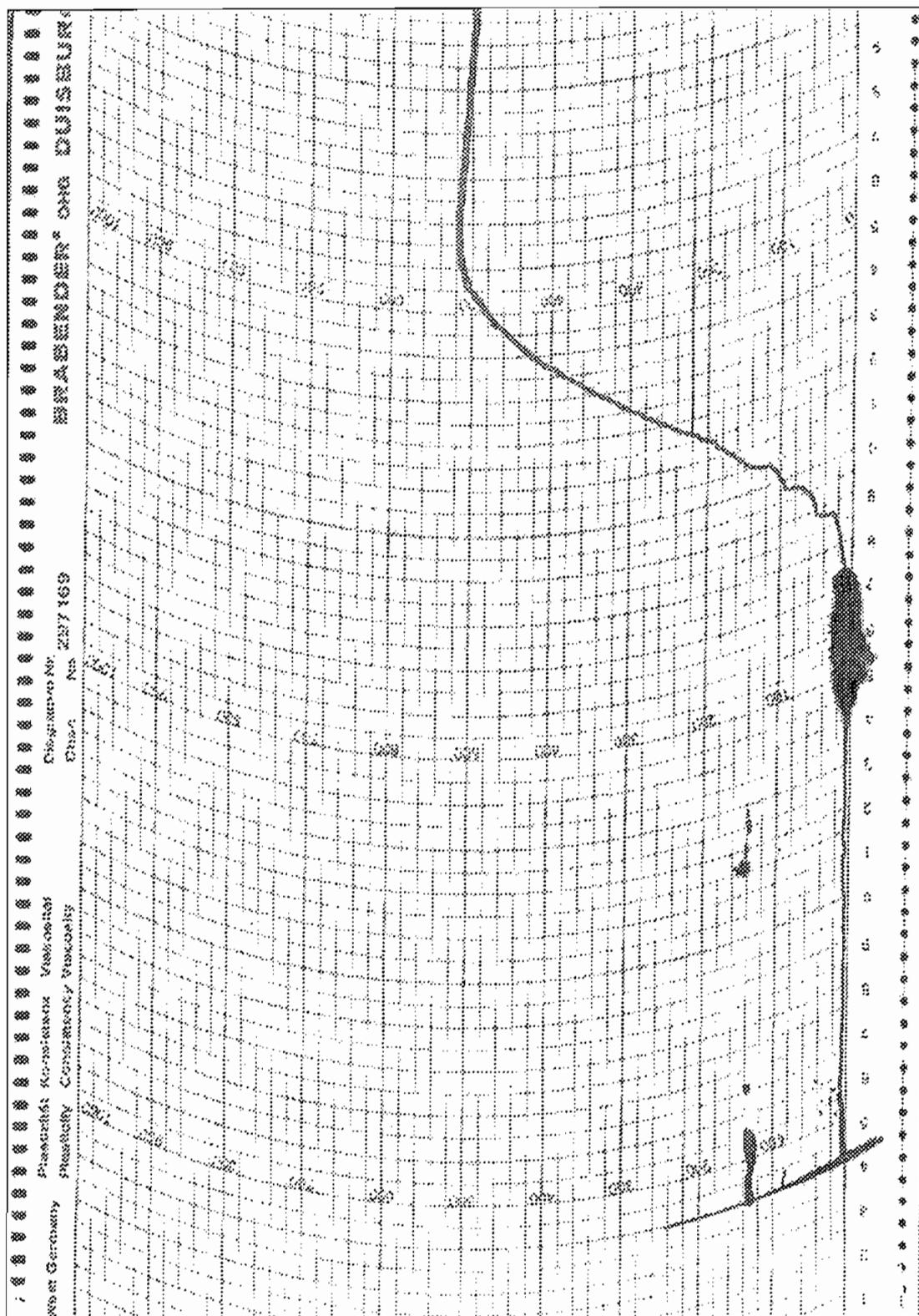


Figura 5.15 Gráfico de viscosidad vs temperatura

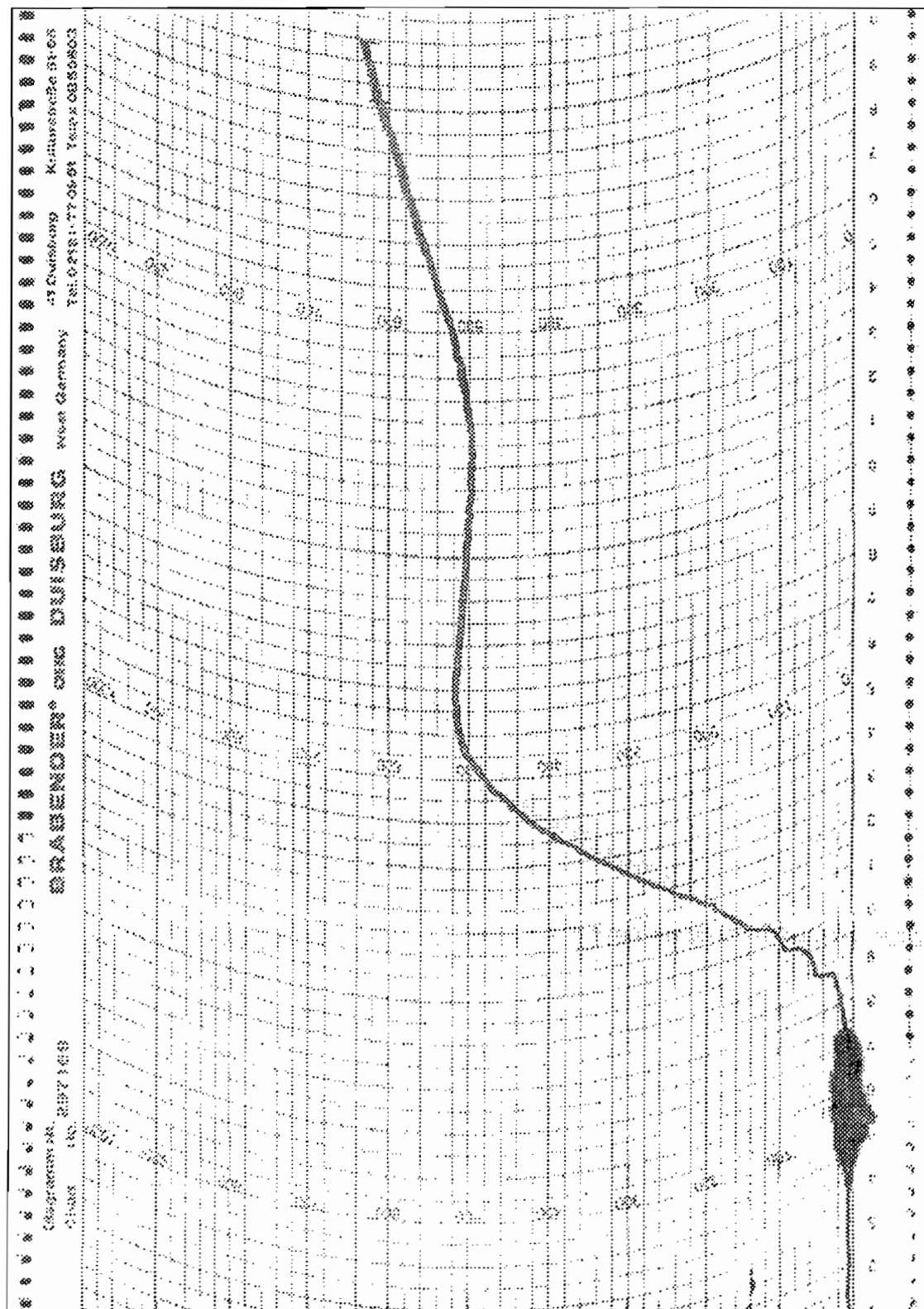


Figura 5.16 Gráfico de viscosidad vs temperatura

En este capítulo se realizó la calibración del controlador de temperatura para lo cual se realizaron las pruebas necesarias para determinar repetibilidad, histéresis y linealidad del mismo. Los resultados obtenidos de las pruebas garantizan que las mediciones que se realizan con el controlador de temperatura son correctas.

También se realizaron pruebas al circuito actuador para determinar los pasos de potencia que entrega la niquelina. Dando como resultado que los pasos de potencia que entrega la niquelina son constantes.

Se realizó la prueba de todo el sistema, para lo cual se realizó la prueba que más se realiza por el DECAB, dando como resultado que en el ascenso y descenso de la temperatura es lineal con la gradiente de temperatura establecida para esta prueba. Para la fase de "Mantener Constante" la temperatura se estabilizó en el valor prefijado para esta prueba.

Al finalizar las tres fases de cocción de la mezcla se obtuvo la curva de la viscosidad la cual fue analizada y aprobada por el DECAB.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones en base a las pruebas realizadas en el desarrollo de este trabajo.

#### 6.1 CONCLUSIONES

1. Las medidas de temperatura del controlador han sido comprobadas con el patrón de temperatura del DECAB, con respecto al cual se tiene un error del 0.8%. Este error se determinó que se encuentra dentro de los límites aceptables para el tipo de trabajos que hace este Departamento. Vale aclarar que el patrón del DECAB es traceable a National Institute of Standards and Technology (NITS).
2. Para la fase de calentamiento se diseñó regular la potencia entregada a la níquelina mediante control por ciclo integral, el cual debía controlar 15 períodos completos de la red. Las pruebas demostraron que efectivamente se pudo controlar la potencia en quince pasos de 30Wattios. Esto demostró que el objetivo de lograr incrementos de  $0.1^{\circ}\text{C}$  se cumplió.
3. La curva generada durante el ascenso de la temperatura es lineal y cumple con la pendiente previamente fijada, lo que demuestra que también se cumplió con esta parte del diseño.
4. Para la fase de mantener constante el valor de la temperatura, se utilizó el mismo control que para la fase de calentamiento, logrando excelentes resultados pues el valor de temperatura se mantiene con una diferencia de  $0.2^{\circ}\text{C}$  con respecto al valor previamente fijado. Esto permite concluir que se cumplió también con este objetivo.

5. Para la fase de enfriamiento se utilizó el control ON-OFF este tipo de acción funcionó bien para esta fase gracias a que la temperatura es una variable lenta. La curva generada es lineal y cumple con la pendiente prefijada, cumpliéndose también con este objetivo.
6. El controlador presenta dos opciones que son "por defecto" y "programar". Para cada una de las opciones se comprobó su correcto funcionamiento. Aquí vale aclarar que a la finalización de cada proceso el controlador presenta la opción de poder realizar nuevamente la misma prueba sin necesidad de ingresar nuevamente los parámetros para realizar el proceso. Esta opción demostró ser de mucha utilidad para el personal que opera el equipo.
7. El controlador ha sido diseñado y construido en forma modular para que sea fácil el montaje y desmontaje del sensor, agitador, solenoide y la niquelina. El controlador durante el ingreso de datos guía al usuario para ingrese correctamente los parámetros para realizar el proceso. Con esto se demostró que el diseño del equipo cumple con su objetivo de ser de fácil uso para el operador
8. Del resultado de las pruebas se puede concluir finalmente que el controlador de temperatura cumple con todos los objetivos, exigencias y requerimientos planteadas por el DECAB.

## 6.2 RECOMENDACIONES

1. Antes de empezar el proceso de cocción de la mezcla de productos de almidón se debe revisar que se encuentren conectados en sus respectivos terminales del controlador el sensor, níquelina, solenoide y agitador.
2. No se debe conectar o desconectar el sensor, agitador, solenoide y níquelina durante el proceso de cocción para evitar que se produzca algún cortocircuito. Para realizar cualquiera de estas acciones se debe primeramente apagar el controlador.
3. El controlador da una señal de alarma cuando ha finalizado el proceso de cocción o se ha desconectado el sensor durante el proceso. Cuando se ha desconectado el sensor de temperatura se debe primeramente apagar el controlador para proceder a conectar el sensor, una vez conectado el mismo se enciende el controlador. Esto se lo realiza para evitar algún tipo de cortocircuito.
4. El controlador no debe ubicarse a una distancia mayor de 1.5 metros con respecto al Amilógrafo Brabender para no tener problemas en la medición de temperatura.
5. Se recomienda que en la Carrera se busque y se de cabida a este tipo de proyectos. No solo que el graduado logra así enfrentar y resolver un problema real y concreto, sino que se ayuda a la Institución en el desarrollo de tecnología propia para que las habilidades enseñadas en nuestra Carrera sea conocida al menos internamente.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. LILEN HENRY. "Tiristores y Triacs", Segunda Edición, Editorial Marcombo, España, 1981.
2. CREUS SOLE ANTONIO. "Instrumentación Industrial", Quinta Edición, Editorial Alfaomega Marcombo, España, 1993.
3. OGATA KATSUHIKO. "Ingeniería de Control Moderno", Tercera Edición, Editorial Prentice Hall, México, 1997.
4. OGATA KATSUHIKO. "Sistemas de Control Discreto en el Tiempo", Segunda Edición, Editorial Prentice Hall, México, 1996.
5. HUMPHRIES JAMES T. "Electrónica Industrial", Editorial Paraninfo, España, 1996.
6. MOHAN, UNDELAND, ROBBINS. "Power Electronics, Editorial John Wiley, Singapure, 1989.
7. TIMOTHY J, MALONEY. "Electrónica Industrial", Editorial Prentice Hall, México, 1982.
8. COUGHLIN ROBERT. "Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales", Quinta Edición, Editorial Prentice Hall, México, 1982.
9. DIEGO BENÍTEZ PHD, LUIS CORRALES PHD, ING. ANA RODAS. "Curso Básico en Instrumentación Industrial", Escuela Politécnica Nacional, 2002
10. ÁNGULO JOSÉ, ÁNGULO IGNACIO. "Microcontroladores PIC: Diseño Práctico de Aplicaciones", Segunda Edición, Mc Graw Hill, España, 1999.

11. MICRO ENGINEERING LABS. "Manual PicBasic Pro Ver. 2.33", 2001

12. MICROCHIP TECHNOLOGY. "Data Sheet PIC16F877A", USA, 2001

## **ANEXO 1**

**PROGRAMA PARA EL MICROPROCESDOR PIC16F877A**

**ANEXO 1****PROGRAMA PARA EL MICROPROCESADOR PIC16F877A****1.1 PROGRAMA IMPLEMENTADO EN EL MICROPROCESADOR**

El programa se desarrollo en lenguaje Basic.

```
DEFINE LCD_DREG PORTD
```

```
DEFINE LCD_DBIT 4
```

```
DEFINE LCD_RSREG PORTC
```

```
DEFINE LCD_RSBIT 6
```

```
DEFINE LCD_EREG PORTC
```

```
DEFINE LCD_EBIT 7
```

```
DEFINE LCD_LINES 8
```

```
DEFINE ADC_BITS 10
```

```
DEFINE ADC_CLOCK 3
```

```
DEFINE ADC_SAMPLEUS 30
```

```
tmax1 var word
```

```
tmin1 var word
```

```
tenf1 var word
```

```
tmed var word
```

```
limi var word
```

```
seg1 var word
```

```
tcompa var word
```

```
tcompal var word
```

tmed1 var word  
inc var word  
tmax var byte  
tmin var byte  
tenf var byte  
tmpo var byte  
pend var byte  
pendb var byte  
pendl var byte  
pendll var byte  
pendx var byte  
cuenta var byte  
minu var byte  
seg var byte  
tc1 var byte  
tc2 var byte  
t2 var byte  
m var byte  
th var byte  
tl var byte  
e var byte  
u1 var byte  
u2 var byte  
u var byte  
y1 var byte

1  
1  
1  
1

y2 var byte  
z1 var byte  
z2 var byte  
w1 var byte  
w2 var byte  
b1 var byte  
b2 var byte  
x var byte  
x1 var byte  
x2 var byte  
p21 var byte  
p22 var byte  
rt var byte  
a var bit  
p var bit  
cf var bit  
INTCON=%111110000  
PIB1=%11  
pir1=0  
ADCON1=%10001110  
trisC=0  
trisA=%11111  
trisD=%010  
trisB=%0000001  
option\_reg=%100111

```
t1con=%0110000
t2con=%011
on interrupt goto interrupciones;salto
@ bcf portB.1
@ bcf portB.2
portB.3=0
portC=0
cf=0
lcdout$fe,1,"CONTROL TEMPERATURA"
lcdout$fe,$c0," AMILOGRAFO "
for X=0 to 40
pause 50
next
lcdout$fe,$1," ELECTRONICA "
lcdout$fe,$c0," EDGAR MAILA "
for X=0 to 30
pause 30
next
TMIN=0
tmax=0
tenf=0
PEND11=0
PEND1=0
pend=0
pendb=0
```

TMPO=0

casos:

intcon.7=0

cf=0

portB.3=0

portC.3=0

for X=0 to 25

pause 30

next

casos1:

lcdout\$fe,\$1,"1.DEFECT(INICIO) "

lcdout\$fe,\$c0,"2.PROGRAMAR "

for X=0 to 50

if portA.1=0 then defecto

if cf=1 then varia

pause 5

next

goto casos1

varia:

cf=0

noemp:

intcon.7=1

portC.3=0

lcdout\$fe,\$1," CONFIGURADO "

lcdout\$fe,\$c0," PRESS INICIO "

```
for X=0 to 50
```

```
if portA.1=0 then ini
```

```
pause 5
```

```
next
```

```
goto noemp
```

```
defecto:
```

```
TMIN=25
```

```
TMAX=90
```

```
tenf=55
```

```
tmpo=20
```

```
pend=15
```

```
pendb=15
```

```
portC.3=0
```

```
cf=0
```

```
p=0
```

```
intcon.7=1
```

```
goto inicio
```

```
ini:
```

```
portC.3=0
```

```
cf=0
```

```
p=0
```

```
intcon.7=1
```

```
read 0,tmin
```

```
read 1,tmax
```

```
read 2,pend
```

```
read 3,tmpo
read 4,tenf
read 5,pendb
inicio:
if portA.4=1 then
gosub rtd
portB=0
GOTO inicio
ELSE
Endif
portC.3=0
gosub encerar
portB.3=1
tmax1=10*tmax
tmin1=10*tmin
tenf1=10*tenf
gosub leer
lcdout$fe,1,"Temp:",dec th,".",dec tl,"oC"
lcdout$fe,$c0,"ESPERE"
for x=0 to 10
pause 5
next
if tmed<tmin1 then
ll:
if portD.1=1 then ll
```

```
l2:
tmin1=tmin*10
gosub leer
lcdout$fe,1,"Temp:",dec th,".",dec tl,"oC"
lcdout$fe,$c0," ESPERE..."
for x=0 to 10
IF PORTA.2=0 THEN fint
pause 5
next
portB.1=1
if tmed<tmin1 then l2
else
endif
portB=%1000
m=10
tcompa=tmin1
pendx=pend
gosub incremento
tcompa=tcompa+m
tmax1=tmax*10
option_reg.5=0
ascender:
if portA.4=1 then
gosub rtd
GOTO ascender
```

```
ELSE
endif
portC.3=0
portC.0=0
gosub leer
gosub mostrar
if seg1<limi then
else
tcompa=tcompa+m
limi=limi+inc
endif
if tcompa=tmax1+m then mantener
e=tcompa-tmed
gosub pi
for x=0 to 10
IF PORTA.2=0 THEN fint
pause 5
next
goto ascender
mantener:
gosub encerar
portb.3=1
portC.1=1
option_reg.5=0
tcompa1=tmax1
```

```
TCOMPA=TMAX1
m1:
if portA.4=1 then
gosub rtd
GOTO m1
ELSE
endif
portC.3=0
gosub leer
gosub mostrar
if minu=tmpto then enfriar
e=tcompa1-tmed
gosub pi
for x=0 to 10
IF PORTA.2=0 THEN fint
pause 5
next
goto m1
enfriar:
gosub encerar
portB.3=portC.2=1
p=1
tenf1=10*tenf
fcompa=tmax1
m=10
```

```
pendx=pendb
gosub incremento
tcompa=tcompa-m
option_reg.5=0
t2con.2=1
enfr1:
if portA.4=1 then
gosub rtd
GOTO enfr1
ELSE
endif
portC.3=0
p=1
gosub leer
gosub mostrar
if seg1<limi then
else
tcompa=tcompa-m
limi=limi+inc
endif
if tcompa =tenfl-m then fint
e=tmed-tcompa
gosub pi
for x=0 to 10
IF PORTA.2=0 THEN fint
```

```
pause 5

next

goto enfr1

fint:

inc=0

portC=0

gosub encerar

portB.3=0

fint1:

portC.3=1

lcdout$fe,$1,"FINALIZO PROCESO"

for X=0 to 50

pause 30

next

lcdout$fe,$1,"REPETIR (INICIO)"

lcdout$fe,$c0,"NUEVO PRO(PARAR)"

for X=0 to 800

if portA.1=0 then inistop

if portA.2=0 then casos

pause 5

next

goto fint1

inistop:

portC.3=0

for x=0 to 20
```

```

pause 20

next

inistop1:

lcdout$fe,$1," REPETIR"

lcdout$fe,$c0," PRESS (INICIO)"

for X=0 to 40

if portA.1=0 then ini

if portA.2=0 then casos

pause 5

NEXT

GOTO inistop1

leer:

adcin 0,tmed

th=tmed/10

tl=tmed//10

tc1=tcompa/10

return

mostrar:

lcdout$fe,1,"Tm:",dec th,".",dec tl,"oC"

lcdout$fe,$c0,"t:0:",dec minu,".",dec seg

lcdout$fe,$8A,"Tr:",dec tc1;,".",dec tc2,"oC"

for X=0 to 100

pause 1

next

return

```

incremento:

inc=1000/pendx

inc=inc+1

inc=inc\*6

inc=inc/10

limi=inc

return

encerrar:

portC=0

portB.3=1

portB=%1000

P21=0

P22=0

TCOMP1=0

seg=0

seg1=0

minu=0

limi=0

tcompa=0

cuenta=0

u=0

p=0

portB=0

z1=0

z2=0

y1=0

y2=0

e=0

w1=0

w2=0

t1con.0=0

t2con.2=0

tmr2=21

tmr0=199

portb.1=0

option\_reg.5=1

return

pi:

if e<15 then pi0

if e<100 then

e=15

else

e=0

endif

pi0:

if a=0 then

y1=e

u1=(b1\*y1)

u2=(b2\*y2)

u=u1-u2

```
z1=u
a=1
else
y2=e
u1=(b1*y2)
u2=(b2*y1)
u=u1-u2
z2=u
a=0
endif
w1=u
w2=u
@ bsf t2con,2
return
rtd:
portC.3=1
lcdout$fe,1," SENSOR "
lcdout$fe,$c0," DESCONECTADO "
for x=0 to 10
pause 5
next
return
disable
interrupciones:
if intcon.1=1 then gosub pulsa
```

```
if intcon.2=1 then gosub timer0
if pir1.0=1 then gosub timer1
if pir1.1=1 then gosub timer2
resume
enable
disable
pulsa:
disable
portb.1=0
INTCON.1=0
for x=0 to 50
if PORTA.3=0 then grabar
pause 10
next
return
grabar:
gosub soltar
grabar1:
disable
lcdout$fe,1,"Ingrese Datos:"
lcdout$fe,$c0,"Tmin:",dec Tmin,"oC"
pause 100
if PORTA.2=0 then restar1
if PORTA.1=0 then sumar1
if PORTA.3=0 then grabar
```

```
goto grabar1
restar1:
gosub soltar
if tmin<1 then grabar1
tmin=tmin-1
goto grabar1
sumar1:
gosub soltar
if tmin>90 then grabar1
tmin=tmin+1
goto grabar1
grabarA:
gosub soltar
write 0,tmin
grabar2:
lcdout$fe,1,"Ingrese Datos:"
lcdout $fe,$c0,"Tmax:",dec tmax,"oC"
pause 50
if PORTA.2=0 then restar2
if PORTA.1=0 then sumar2
if PORTA.3=0 then grabarB
goto grabar2
restar2:
gosub soltar
if tmax<1 then grabar2
```

```
tmax=tmax-1
goto grabar2
sumar2:
gosub soltar
if tmax>100 then grabar2
tmax=tmax+1
goto grabar2
grabarB:
gosub soltar
write 1,tmax
grabar3:
x1=pend/10
x2=pend//10
lcdout$fe,1,"Ingrese Datos:"
lcdout$fe,$c0,"m cal:",dec x1,".",dec x2,"oC/min"
pause 50
if PORTA.2=0 then restar3
if PORTA.1=0 then sumar3
if PORTA.3=0 then grabarC
goto grabar3
restar3:
gosub soltar
if pend1<1 then grabar3
pend1=pend1-1
pend=3*pend1
```

```
goto grabar3
sumar3:
gosub soltar
if pend1>6 then grabar3
pend1=pend1+1
pend=3*pend1
goto grabar3
grabarC:
gosub soltar
write 2,pend
grabar4:
lcdout$fe,1,"Ingreso Datos"
lcdout$fe,$c0,"time mant:",dec tmpo,"min"
pause 50
if PORTA.2=0 then restar4
if PORTA.1=0 then sumar4
if PORTA.3=0 then grabarD
goto grabar4
restar4:
gosub soltar
if tmpo<1 then grabar4
tmpo=tmpo-1
goto grabar4
sumar4:
gosub soltar
```

```
if tmpo>58 then grabar4
```

```
tmpo=tmpo+1
```

```
goto grabar4
```

```
grabarD:
```

```
gosub soltar
```

```
write 3,tmpo
```

```
grabar5:
```

```
lcdout$fe,1,"Ingrese Datos:"
```

```
lcdout$fe,$c0,"Tenfria:",dec tenf,"oC"
```

```
pause 50
```

```
if PORTA.2=0 then restar5
```

```
if PORTA.1=0 then sumar5
```

```
if PORTA.3=0 then grabarE
```

```
goto grabar5
```

```
restar5:
```

```
gosub soltar
```

```
if tenf<1 then grabar5
```

```
tenf=tenf-1
```

```
goto grabar5
```

```
sumar5:
```

```
gosub soltar
```

```
if tenf>99 then grabar5
```

```
tenf=tenf+1
```

```
goto grabar5
```

```
grabarE:
```

```
gosub soltar
write 4,tenf
grabar6:
x1=pendb/10
x2=pendb//10
lcdout$fe,1,"Ingrese Datos:"
lcdout$fe,$c0,"m enf:",dec x1,".",dec x2,"oC/min"
pause 50
if PORTA.2=0 then restar6
if PORTA.1=0 then sumar6
if PORTA.3=0 then grabarF
goto grabar6
restar6:
gosub soltar
if pend11<1 then grabar6
pend11=pend11-1
pendb=3*pend11
goto grabar6
sumar6:
gosub soltar
if pend11>6 then grabar6
pend11=pend11+1
pendb=3*pend11
goto grabar6
grabarF:
```

```

gosub soltar
write 5,pendb;fin pend
cf=1
intcon.1=0
return
soltar:
for x=1 to 10
pause 5
next
soltar2:
if PORTA.2=0 then soltar2
if PORTA.1=0 then soltar2
if PORTA.3=0 then soltar2
for x=1 to 10
pause 8
next
return
disable
timer0:
intcon.2=0
cuenta=cuenta+1
if cuenta<16 then return
cuenta=0
seg1=seg1+1
seg=SEG+1

```

```
tmr0=199
if seg>=60 then
seg=0
minu=minu+1
endif
enable
return
disable
timer2:
pir1.1=0
t2=t2+1
if t2<50 then return
t2=0
tmr2=21;21
if p=0 then
lookupw1,[255,247,239,231,223,215,207,199,190,182,174,166,158,150,142,133,133],t
mr1H
lookup w2,[255,221,185,150,115,79,44,9,229,194,159,123,88,53,17,238,238],tmr1L;
espe:
if portd.1=1 then espe
portb.1=1
portB.2=0
else
lookupw1,[255,255,255,255,255,255,255,133,133,133,133,133,133,133,133,133,133],t
mr1H
```

```
lookupw2,[255,255,255,255,255,255,255,255,238,238,238,238,238,238,238,238,238],t
```

```
mr1L
```

```
espel:
```

```
if portd.1=0 then espel
```

```
portb.1=0
```

```
portB.2=1
```

```
endif
```

```
t1con.0=1
```

```
enable
```

```
return
```

```
disable
```

```
timer1:
```

```
pir1.0=0
```

```
portb.1=0
```

```
portb.2=0
```

```
enable
```

```
return
```

```
end
```

## 1.2 TABLA DE VALORES DE TIEMPO PARA EL TIMER 1

En la Tabla 1.1 se muestran los tiempos para cada escalón expresados en ciclos de máquina. Estos valores de tiempo se cargan al Timer1.

Se realiza un ejemplo de cálculo de cuantos ciclos de maquina se necesita para obtener un escalón.

Se utilizo cristal de 4Mhz por lo tanto se tiene que:  $1CM = 1\mu s$

El timer1 se utiliza en prescaler1:8.

Para un generar escalón se necesita 0.02s. Dando como resultado:

$$CM = 0.02s \frac{1CM}{1\mu s} * \frac{1}{8} = 2083,3CM$$

# escalones	tiempo	cfclos de máquina	Complemento de 2	Cargar al Timer1	TMRH	TMRL
0	0,00	0	65535	FFFF	255	255
1	0,02	2083,333333	63452,6667	F7DD	247	221
2	0,03	4166,666667	61369,3333	EFB9	239	185
3	0,05	6250	59286	E796	231	150
4	0,07	8333,333333	57202,6667	DF73	223	115
5	0,08	10416,66667	55119,3333	D74F	215	79
6	0,10	12500	53036	CF2C	207	44
7	0,12	14583,33333	50952,6667	C709	199	9
8	0,13	16666,66667	48869,3333	BEE5	190	229
9	0,15	18750	46786	B6C2	182	194
10	0,17	20833,33333	44702,6667	AE9F	174	159
11	0,18	22916,66667	42619,3333	A67B	166	123
12	0,20	25000	40536	9E58	158	88
13	0,22	27083,33333	38452,6667	9635	150	53
14	0,23	29166,66667	36369,3333	8E11	142	17
15	0,25	31250	34286	85EE	133	238

Tabla 1.1 Tiempos para el Timer 1 en ciclos de máquina

## 1.3 DECLARACIONES DEL COMPILADOR PBP 2.44

@	Inserta una línea de código ensamblador
ASM...ENDASM	Inserta una sección de código ensamblador
BRANCH	GOTO computado(equiv. a ON..GOTO)
BRANCHL	BRANCH fuera de pagina(BRANCH largo)
BUTTON	Anti-rebote y auto-repetición de entrada en el pin especificado
CALL	Llamada a subrutina de ensamblador
CLEAR	Hace cero todas las variables
COUNT	Cuenta el numero de pulsos en un pin
DATA	Define el contenido inicial en un chip EEPROM
DEBUG	Señal asincrónica de salida en un pin fijo y baud
DISABLE	Deshabilita el procesamiento de ON INTERRUPT
DTMFOUT	Produce tonos en un pin
EEPROM	Define el contenido inicial en un chip EEPROM
ENABLE	Habilita el procesamiento de ON INTERRUPT
END	Detiene la ejecución e ingresa en modo de baja potencia
FOR...NEXT	Ejecuta declaraciones en forma repetitiva
FREQOUT	Produce hasta 2 frecuencias en un pin
GOSUB	Llama a una subrutina BASIC en la etiqueta especificada
GOTO	Continúa la ejecución en la etiqueta especificada
HIGH	Hace alto la salida del pin
HSERIN	Entrada serial asincrónica (hardware)
HSEROUT	Salida serial asincrónica(hardware)
I2CREAD	Lee bytes de dispositivo I <sup>2</sup> C
I2CWRITE	Graba bytes en dispositivo I2C
IF..THEN..ELSE..ENDIF	Ejecuta declaraciones en forma condicional
INPUT	Convierte un pin en entrada

(LET)	Asigna el resultado de una expresión a una variable
LCDOUT	Muestra caracteres en LCD
LOOKDOWN	Busca un valor en una tabla de constantes
LOOKDOWN2	Busca un valor en una tabla de constantes o variables
LOOKUP	Obtiene un valor constante de una tabla
LOOKUP2	Obtiene un valor constante o variable de una tabla
LOW	Hace bajo la salida de un pin
NAP	Apaga el procesador por un corto período de tiempo
ON INTERRUPT	Ejecuta una subrutina BASIC en un interrupt
OUTPUT	Convierte un pin en salida
PAUSE	Demora (resolución 1mseg.)
PAUSEUS	Demora (resolución 1 useg.)
PEEK	Lee un byte del registro
POKE	Graba un byte en el registro
POT	Lee el potenciómetro en el pin especificado
PULSIN	Mide el ancho de pulso en un pin
PULSOUT	Genera pulso hacia un pin
PWM	Salida modulada en ancho de pulso a un pin
RANDOM	Genera numero pseudo-aleatorio
RCTIME	Mide el ancho de pulso en un pin
READ	Lee byte de un chip EEPROM
RESUME	Continúa la ejecución después de una interrupción

RETURN	Continúa en la declaración que sigue al último GOSUB
REVERSE	Convierte un pin de salida en entrada o uno de entrada en salida
SERIN	Entrada serial asincrónica (tipo BS1)
SERIN2	Entrada serial asincrónica (tipo BS2)
SEROUT	Salida serial asincrónica (tipo BS1)
SEROUT2	Salida serial asincrónica (tipo BS2)
SHIFTIN	Entrada serial sincrónica
SHIFTOUT	Salida serial sincrónica
SLEEP	Apaga el procesador por un período de tiempo
SOUND	Genera un tono o ruido blanco en un pin
STOP	Detiene la ejecución del programa
SWAP	Intercambia los valores de dos variables
TOGGLE	Hace salida a un pin y cambia su estado
WHILE..WEND	Ejecuta declaraciones mientras la condición sea cierta
WRITE	Graba bytes a un chip EEPROM
XIN	Entrada X - 10
XOUT	Salida X - 10

## **ANEXO 2**

### **CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA**

## ANEXO 2

## CONSTRUCCION DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA

## 2.1 CIRCUITOS IMPRESOS UTILIZADOS EN EL CONTROLADOR DE TEMPERATURA

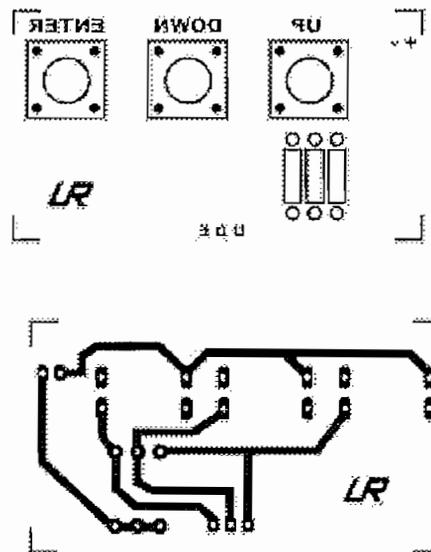


Figura 2.1 Diagrama impreso para los pulsadores

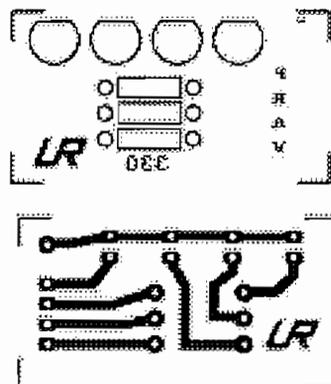


Figura 2.2 Diagrama impreso para los leds

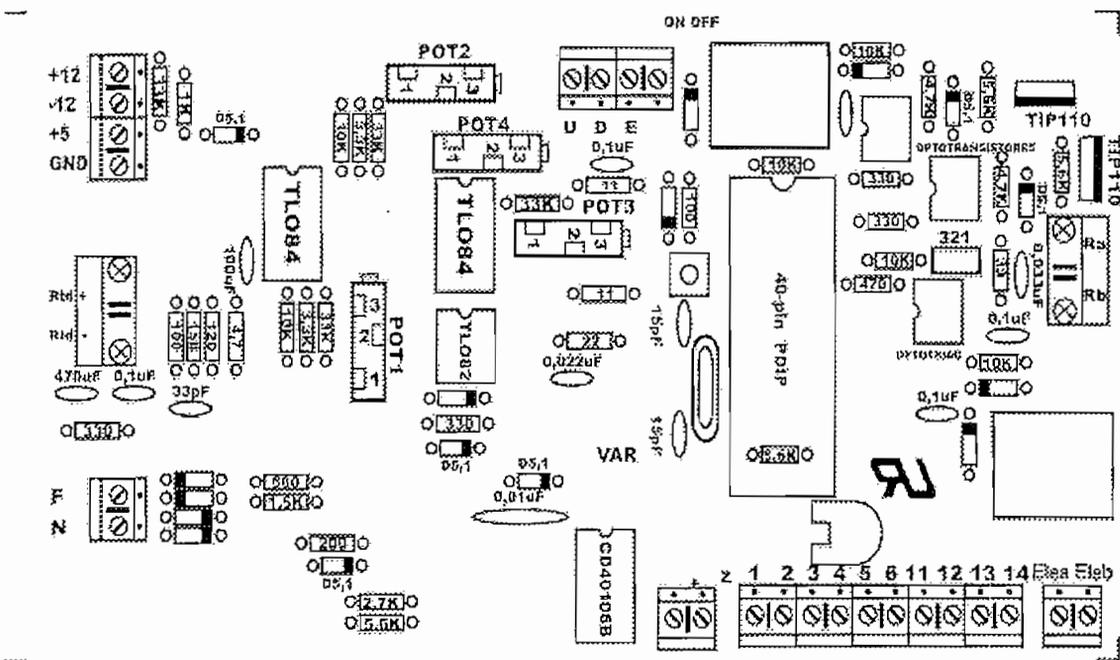
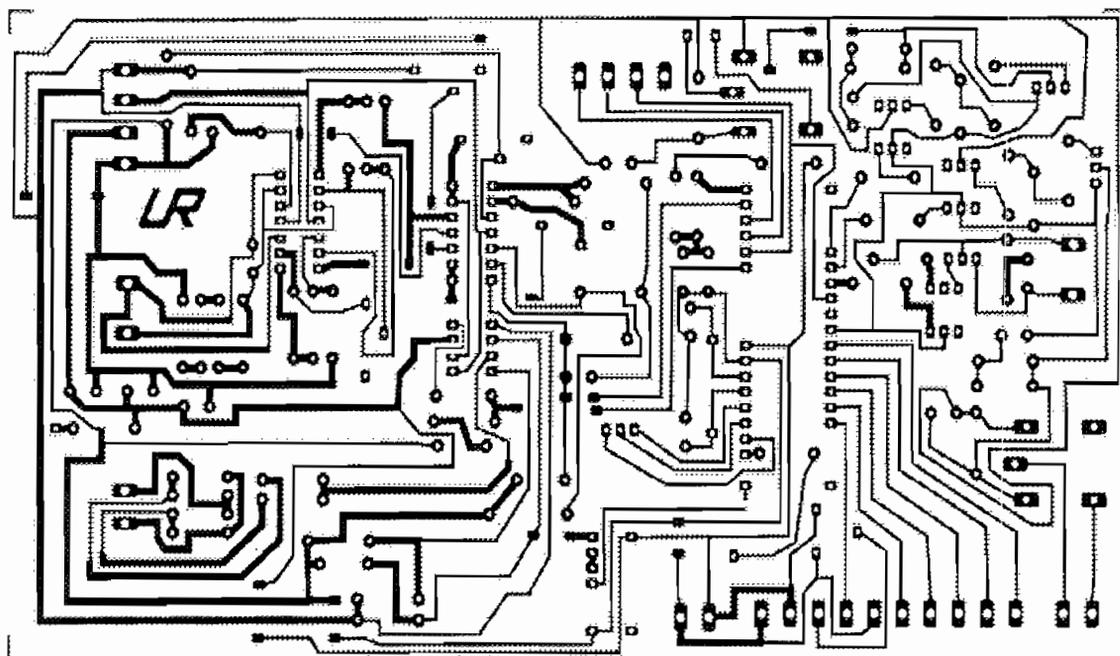


Figura 2.3 Diagrama impreso de la tarjeta de control

## 2.2 PLACAS CONSTRUIDAS PARA EL CONTROLADOR DE TEMPERATURA

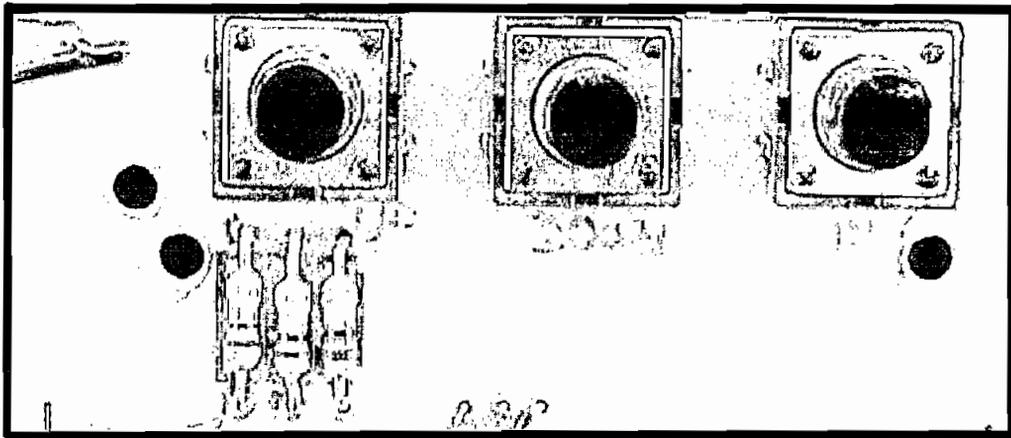


Figura 2.5 Placa para los pulsadores

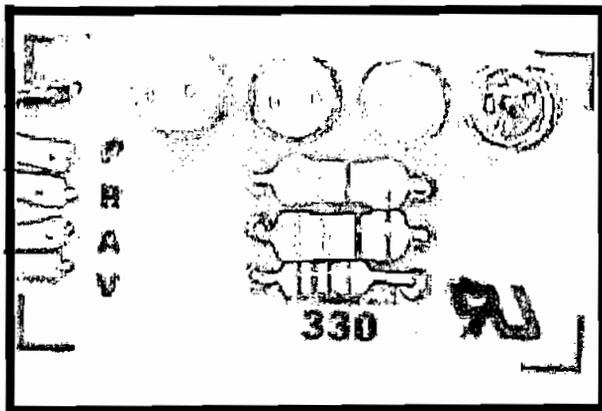


Figura 2.6 Placa para los leds

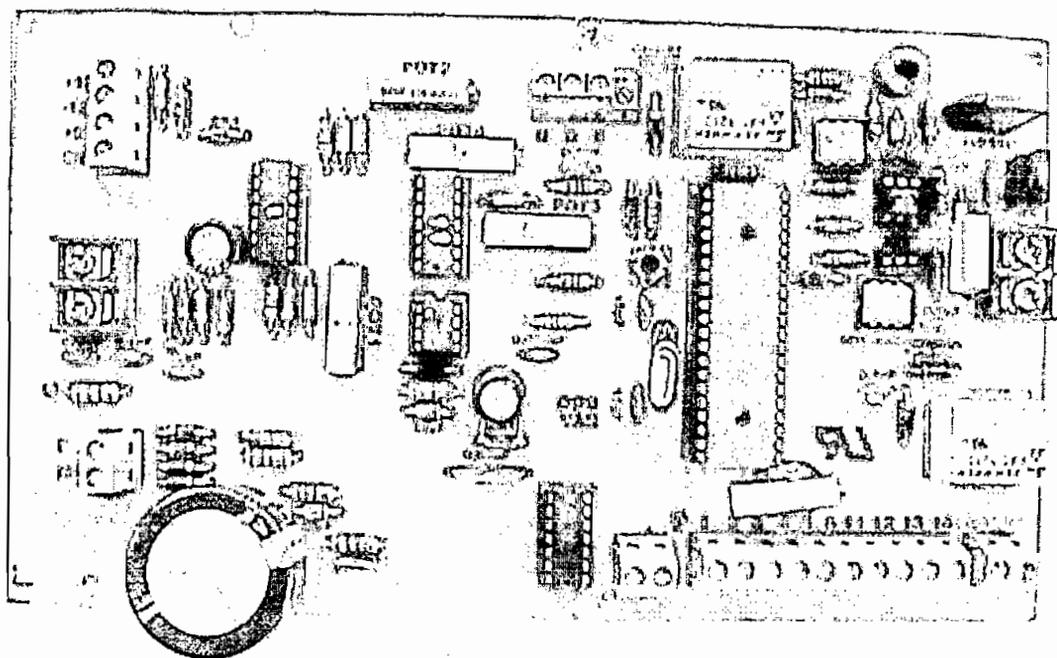


Figura 2.7 Placa de los circuitos de control

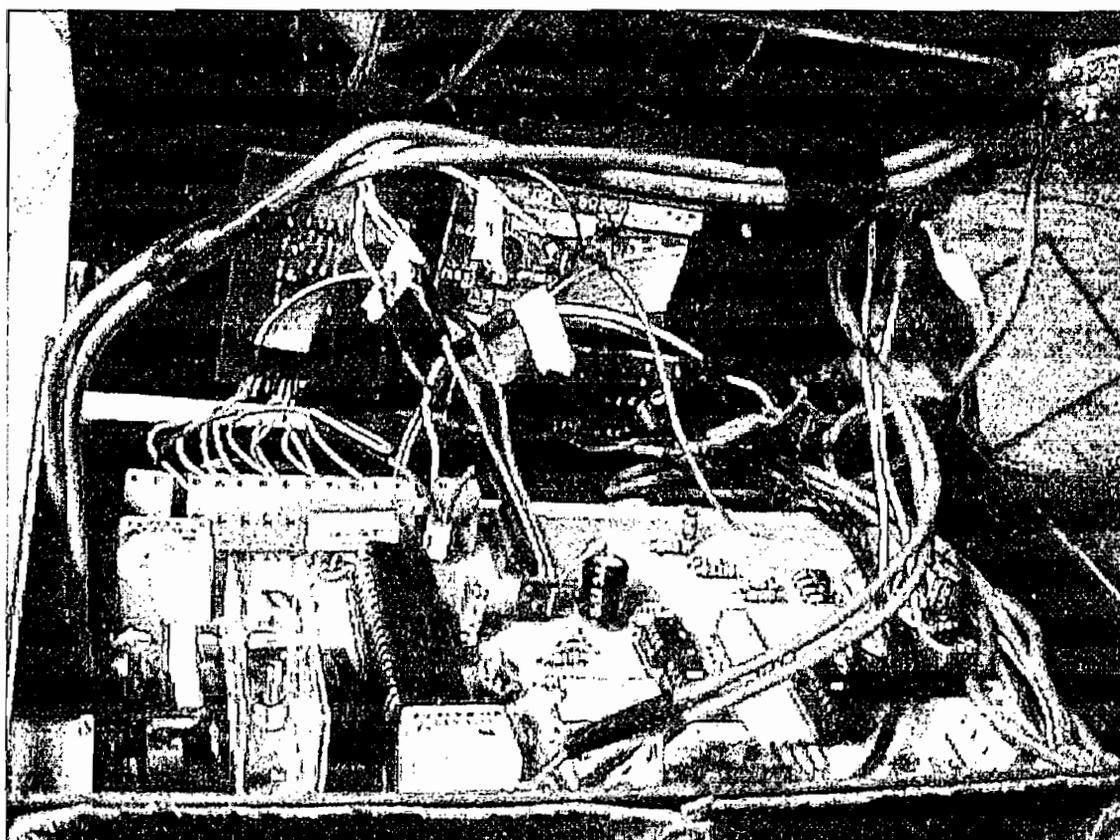


Figura 2.8 Placa instalada en el case del controlador

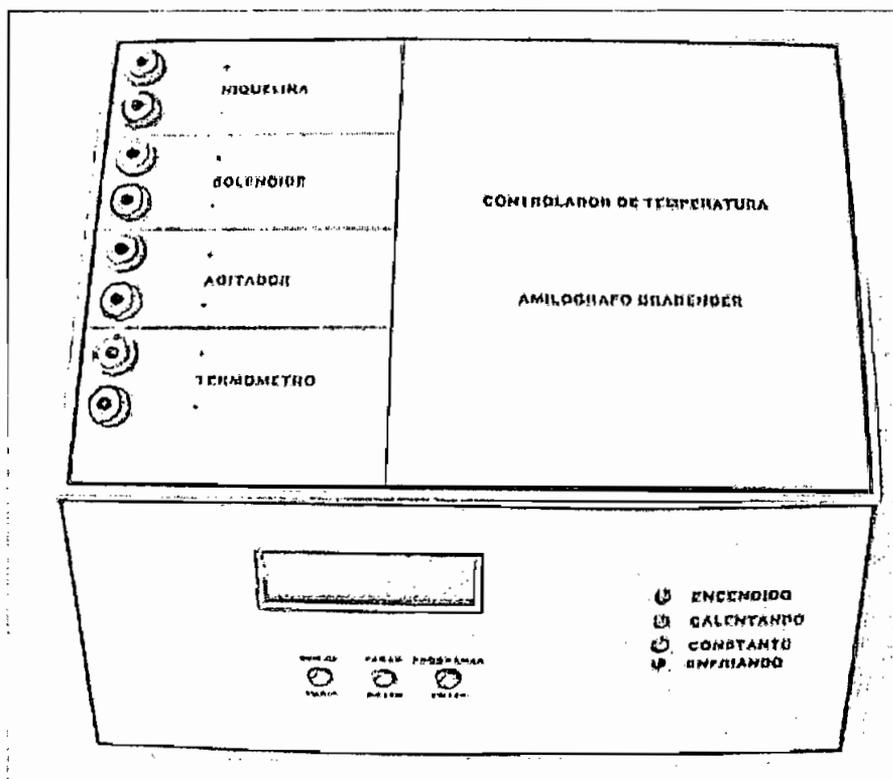


Figura 2.9 Case del controlador de temperatura

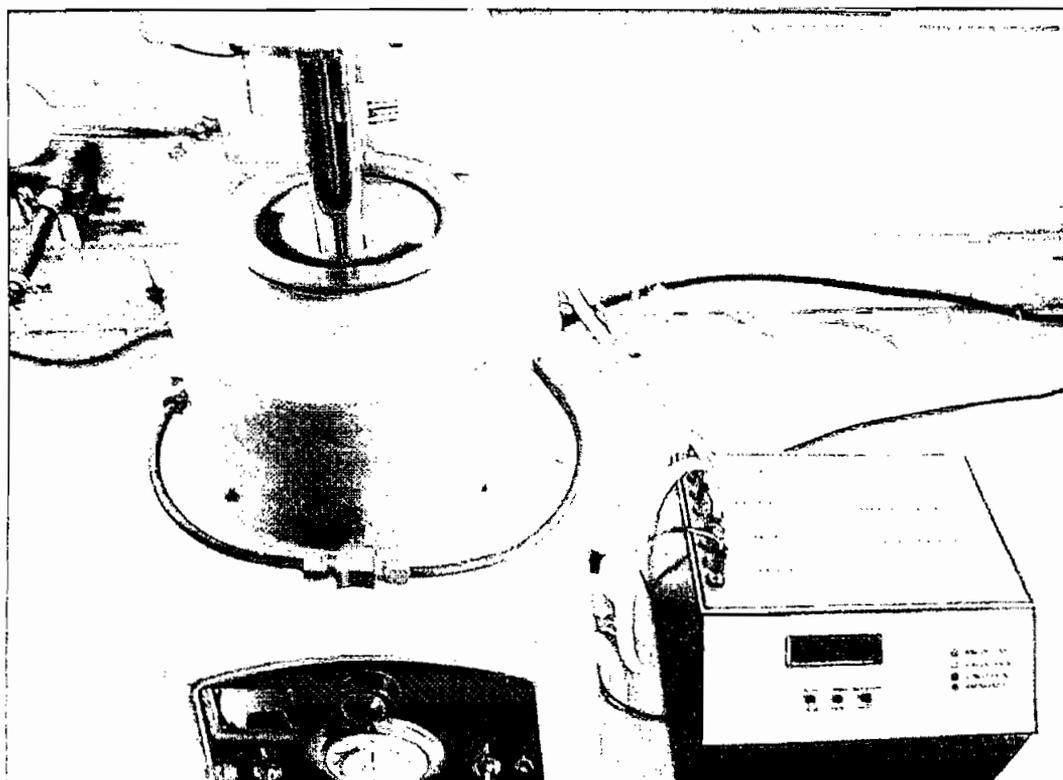


Figura 2.10 Controlador de temperatura conectado al Amilógrafo Brabender

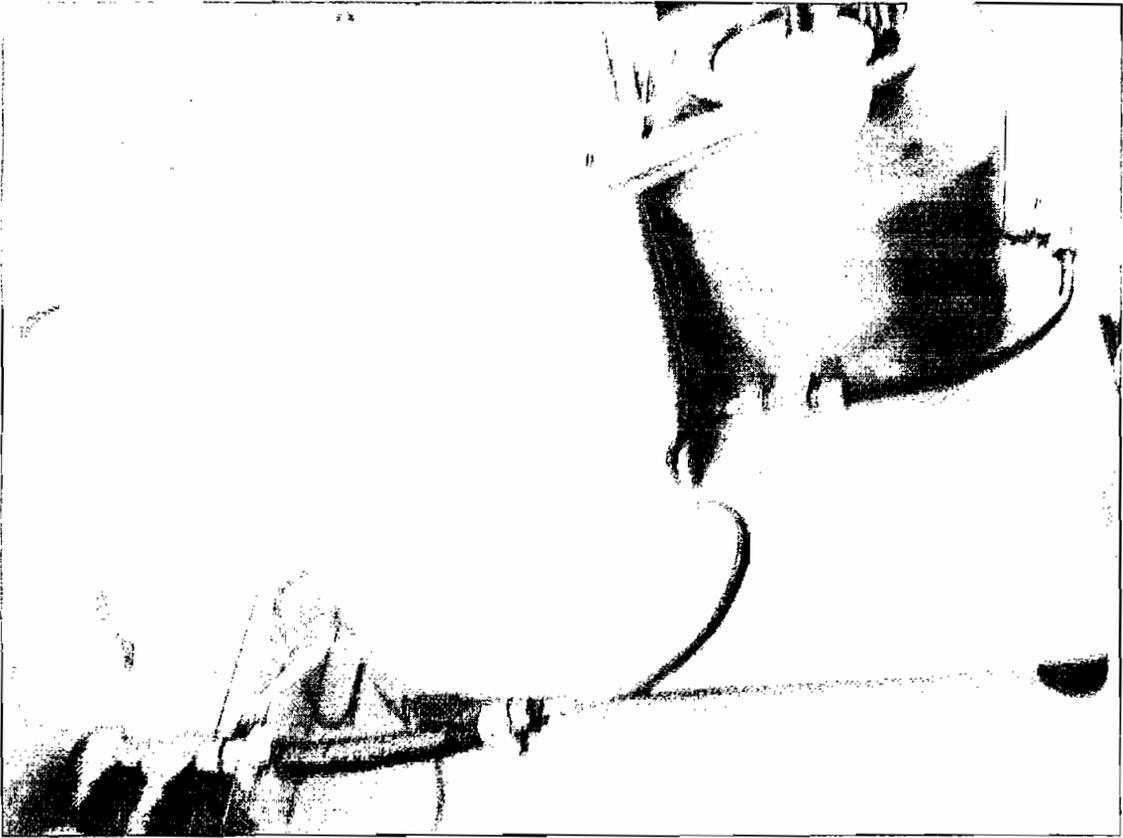


Figura 2.11 Electroválvula que controla el ingreso aire al Amilógrafo Brabender

**ANEXO 3**

**HOJA DE DATOS DE LA Pt100**

## ANEXO 3

## HOJAS DE DATOS DE LA PT100

**Honeywell**22-75-03-10  
7.93  
Page 1 of 3Platinum Resistance  
Thermometer Detector

## Specification

**Function**

Platinum Resistance Detectors (RTD's) (Figure 1) accurately measure temperature variations over a range from  $-195$  to  $850^{\circ}\text{C}$  ( $-320$  to  $1200^{\circ}\text{F}$ ). As the temperature changes, resistance of the platinum wire changes linearly, and this relationship remains very stable over time. RTD sensors can be used with any measuring or controlling instrument having a Wheatstone bridge type measuring circuit.

**Description***Detector Assemblies*

A variety of detector assemblies (Figure 1), including plain, general purpose and spring loaded types are available to meet different mounting requirements.

Spring loaded assembly ensures positive metal to metal contact between bulbs and well, providing improved heat transfer and vibration endurance, the bulb is easily installed or moved through the head without disconnecting head or well.

To reduce the effect of leadwire resistance between the RTD and instrument, platinum RTD assemblies are always supplied for use in 3-wire (copper) systems but can be used in a 2-wire manner if the application permits.

*Detector Elements*

The sensitive portion of a 100 ohm element is a spool of platinum wire approximately 3 mm (0.1 inch) in diameter and 13 mm (0.5 inch) in length located at the tip of the RTD assembly.

200 and 500 ohm elements are also available. They have larger spools to handle the added wire since the resistance change per degree of temperature change is increased two or five times respectively.

*Narrow Temperature Span*

100 ohm bulbs are suitable for spans as low as  $57^{\circ}\text{C}$  ( $120^{\circ}\text{F}$ ); 200 ohm bulbs are suitable for spans as low as  $33^{\circ}\text{C}$  ( $90^{\circ}\text{F}$ ).

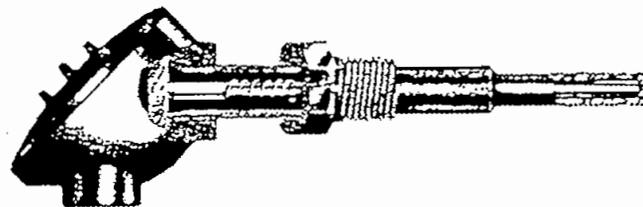
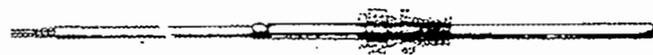


Figure 1 — Typical Platinum Resistance Bulb Assemblies

Specification  
22-75-03-10  
Page 2

## Specifications

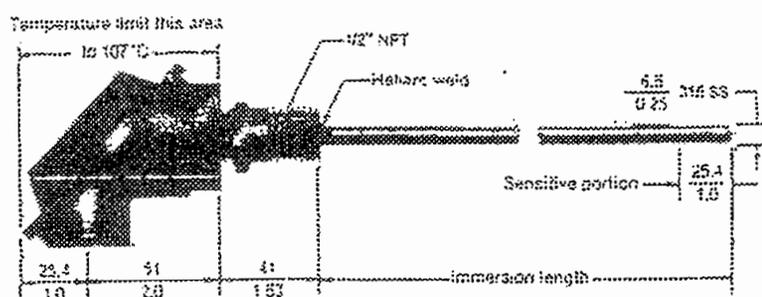
Element Resistance	100 ohms or 200 ohms at 0°C (32°F).
Accuracy	±0.4°F or 1/2% of the temperature being measured whichever is greater over range of -185°C to 650°C (-300°F to 1200°F).
Repeatability	±0.05°C over range of -18°C to 480°C. ±0.1°F over range 0°F to 900°F. ±0.1% of span for other temperature ranges.
Temperature Limits	<i>Standard Limits:</i> -185°C to 480°C (-300°F to 900°F) with element enclosed in type 316 SS sheath. Type "G" maximum, 204°C (399°F). <i>Extended Limits:</i> -185°C to 650°C (-300°F to 1200°F) with element enclosed in an inconel sheath.
Time Constant	Five seconds for a 63.2% response to a step change in temperature in water moving at one metre (three feet) per second.
Sheath Material	<i>Standard Range:</i> Type 316 stainless steel. <i>Extended Range:</i> Inconel for temperatures to 650°C (1200°F).
Pressure Rating	20.47 MPa (3000 psi) standard.

## Assembly Types

Dimensions:  $\frac{\text{millimetres}}{\text{inches}}$

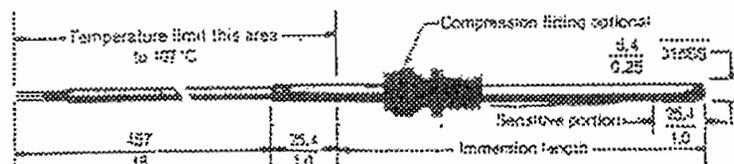
### Type "A"

General purpose detector for mounting bare or in a well. Used in tanks, pipes, ovens, lehrs, process vessels, etc. General purpose head is supplied, a screw cover head is optional.



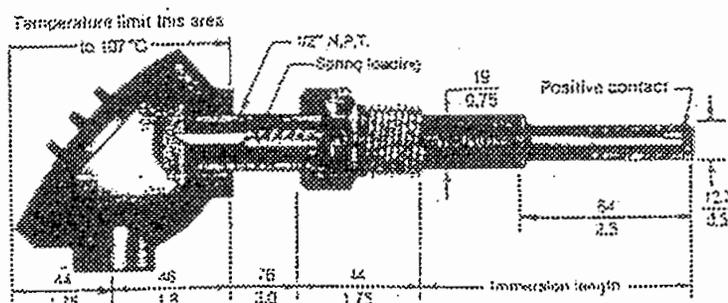
### Type "D"

Plain detector with flexible Teflon® cable is a versatile sensor. Compression fittings may be supplied for mounting into molding machines, heated dies, environmental chambers, etc.



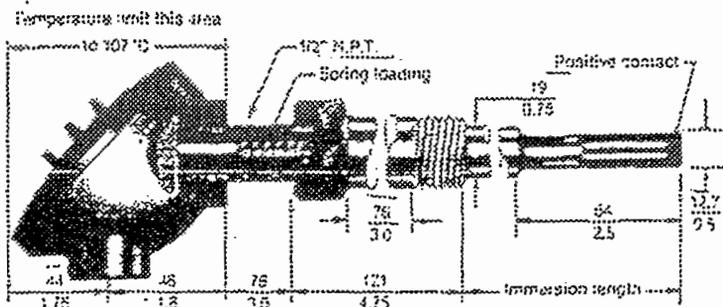
### Type "E"

Spring loaded assembly. The spring holds the detector in constant firm contact with the well, ensuring improved heat transfer and vibration endurance. Detector is removable without disconnecting head or well. Screw cover head is supplied as standard.



**Type "F"**

Spring loaded detector and well which is the same as Type "E" except well has lag of 79 mm (3.0 inches).

**Type "G"**

Plain detector with 64 mm (2.5") sensitive tip and 153 cm (50") Teflon leads.

**Ordering information**

Please specify

1. Model number from Table below
2. Options, as required.

Type	Model Number	Insertion Length		Resistance Element ohms (5°C)	Options; Selections
		mm	Inches		
A	HP6A1-5-1/2-3A	140	5.5	100	Add prefix "E" to model number to extend range from 480°C to 650°C (900°F to 1200°F). For 200 ohm element, change "1" in model number to "2". For screw cover head, change "3" in model number to "1". Add suffix "D" if dual element bulb is required.
	HP6A1-8-1/2-3A	216	8.5	100	
	HP6A1-11-1/2-3A	292	11.5	100	
	HP6A1-17-1/2-3A	449	17.5	100	
	HP6A1-23-1/2-3A	597	23.5	100	
D	HPOD1-5-1/2-3A	140	5.5	100	Add prefix "E" to model number to extend range from 480°C to 650°C (900°F to 1200°F). For 200 ohm element, change "1" in model number to "2". Add suffix "L" and specify desired lead length for lengths over 457 mm (18 inches). Compression fitting add suffix "C" to model number.
	HPOD1-8-1/2-3A	216	8.5	100	
	HPOD1-11-1/2-3A	292	11.5	100	
	HPOD1-17-1/2-3A	449	17.5	100	
	HPOD1-23-1/2-3A	597	23.5	100	
E	HP7E1-10-1/2-3A*	114	4.5	100	Add prefix "E" to model number to extend range from 480°C to 650°C (900°F to 1200°F). For 200 ohm element, change "1" in model number to "2".
	HP7E1-13-1/2-3A*	191	7.5	100	
	HP7E1-18-1/2-3A*	257	10.5	100	
	HP7E1-22-1/2-3A*	419	16.5	100	
F	HP7F1-10-1/2-3A*	114	4.5	100	Add prefix "E" to model number to extend range from 480°C to 650°C (900°F to 1200°F). For 200 ohm element, change "1" in model number to "2".
	HP7F1-13-1/2-3A*	191	7.5	100	
	HP7F1-18-1/2-3A*	257	10.5	100	
	HP7F1-22-1/2-3A*	419	16.5	100	
G	HPOG2-2-1/2-3B	64	2.5	100	Add suffix "L2" to model number for Teflon <sup>®</sup> lead length of 3.05 m (10 feet); longer lengths are available on special order.
	HPOG2-2-1/2-3B	64	2.5	200	
	HPOG22-2-1/2-4A-D**	64	2.5	200	

\*Well material must be selected, specify: 1 for carbon steel, 2 for 304 SS, and 3 for 316 SS.

Add the selected digit after A in the model number.

\*\*This model has 2 elements and 8.25 mm (0.28 inch) sheath diameter.

†Trademark

**NOTE.**

Add suffix "T" to model number if SS equipment ID tag is required (all models).

Add suffix "O" to model number for dual element (2 wire/element connections).

Add suffix "C" to model number compression fitting (Type D assemblies only)

Specifications are subject to change without notice.

Temp. °C	Resist. ohmios	Temp. °C	Resist. ohmios	Temp. °C	Resist. ohmios	Temp. °C	Resist. ohmios
180	25,81	45	117,70	265	200,84	485	278,31
175	27,99	50	119,66	270	202,67	490	280,01
170	30,17	55	121,61	275	204,49	495	281,70
165	32,33	60	123,55	280	206,30	500	283,39
160	34,48	65	125,50	285	208,12	505	285,07
155	36,62	70	127,44	290	209,93	510	286,76
150	38,76	75	129,37	295	211,74	515	288,44
145	40,88	80	131,31	300	213,55	520	290,11
140	43,00	85	133,24	305	215,35	525	291,79
135	45,11	90	135,17	310	217,15	530	293,46
130	47,21	95	137,10	315	218,95	535	295,13
125	49,31	100	139,02	320	220,74	540	296,79
120	51,40	105	140,94	325	222,53	545	298,45
115	53,48	110	142,86	330	224,32	550	300,11
110	55,55	115	144,77	335	226,10	555	301,77
105	57,62	120	146,68	340	227,89	560	303,43
100	59,69	125	148,59	345	229,67	565	305,08
95	61,74	130	150,50	350	231,44	570	306,72
90	63,80	135	152,40	355	233,22	575	308,37
85	65,84	140	154,30	360	234,99	580	310,01
80	67,88	145	156,20	365	236,76	585	311,65
75	69,92	150	158,09	370	238,52	590	313,29
70	71,95	155	159,98	375	240,28	595	314,92
65	73,98	160	161,87	380	242,04	600	316,55
60	76,00	165	163,75	385	243,80	605	318,18
55	78,02	170	165,64	390	245,55	610	319,80
50	80,04	175	167,52	395	247,30	615	321,42
45	82,05	180	169,39	400	249,05	620	323,04
40	84,06	185	171,27	405	250,80	625	324,66
35	86,06	190	173,14	410	252,54	630	326,27
30	88,06	195	175,00	415	254,28	635	327,88
25	90,06	200	176,87	420	256,01	640	329,49
20	92,05	205	178,73	425	257,74	645	331,09
15	94,03	210	180,59	430	259,47	650	332,69
10	96,03	215	182,44	435	261,20	655	334,29
5	98,02	220	184,30	440	262,93	660	335,88
0	100,00	225	186,15	445	264,65	665	337,48
5	101,98	230	187,99	450	266,36	670	339,07
10	103,96	235	189,84	455	268,08	675	340,65
15	105,93	240	191,68	460	269,79	680	342,24
20	107,90	245	193,52	465	271,50	685	343,82
25	109,86	250	195,35	470	273,21	690	345,39
30	111,83	255	197,19	475	274,91	695	346,97
35	113,79	260	199,02	480	276,61	700	348,54
40	115,75						

Tabla 3.1 Valores de resistencia según la temperatura en °C para las sondas de resistencia Pt 100(Pt 200 y Pt 500 se debe multiplicar por 2 y 5 respectivamente los valores de la Tabla)

**ANEXO 4**

**ANÁLISIS ECONÓMICO**

## ANEXO 4

## ANÁLISIS ECONÓMICO

En la Tabla 4.1 se presenta la lista de materiales utilizados para la construcción del controlador de temperatura.

Cantidad	Descripción	Costo Unitario	Costo USD
1	Microprocesador (PIC16F877A)	15,0	15,0
1	LCD(16x2)	20,0	20,0
2	Amplificador Operacional(TI084)	1,5	3,0
1	Amplificador Operacional(TI082)	1,5	1,5
1	Compuerta Schmitt Trigger (CD40106B)	2,5	2,5
1	Buzzer (12VDC)	2,5	2,5
1	Optotriac(MOC3041)	1,5	1,5
3	Otpotransistor(4N25)	1,5	4,5
3	Transistores (TIP110)	1,5	4,5
1	Triac ( ECG 56006)	2,7	2,7
1	Oscilador (4Mhz)	2,5	2,5
6	Diodos(1N4007)	0,2	0,9
7	Zener(5,1V)	0,2	1,1
4	Leds	0,2	0,6
7	Condensadores	0,2	1,1
1	Condensador Electrolítico	0,7	0,7
25	Resistencias	0,1	1,3
4	Potenciómetros(precisión)	1,5	6,0
1	Transformador	3,5	3,5

2	Relés (110V ,10A)	1,5	3,0
3	Pulsadores	0,2	0,6
1	Disipador	3,0	3,0
14	Borneras	0,5	7,0
1	Placa de baquelita	1,5	1,5
1	Materiales construcción de la placa	10,0	10,0
1	Case	30,0	30,0
2	Carátula metálica	15,0	30,0
16	Plugs	0,3	4,0
1	Switching Power Supply(ATX-450W-PIV)	17,0	17,0
1	Electroválvula (110V,60Hz)	12,0	12,0
2	Acoples (Codo)	3,5	7,0
1	Acoples (T)	3,5	3,5
1	Otros	60,0	60,0
		<b>Total(USD)</b>	<b>263,85</b>

Tabla 4.1 Lista de materiales

El costo de los materiales utilizados para la construcción del controlador de temperatura es de 263.85 dólares americanos.

**ANEXO 5**

**MANUAL DEL USUARIO**

## ANEXO 5

MANUAL DEL USUARIO PARA EL CONTROLADOR DE TEMPERATURA  
DEL AMILÓGRAFO BRABENDER

## 5.1 FUNCIONES Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

En la Figura 5.1 se muestra el controlador de temperatura para el Amilógrafo Brabender

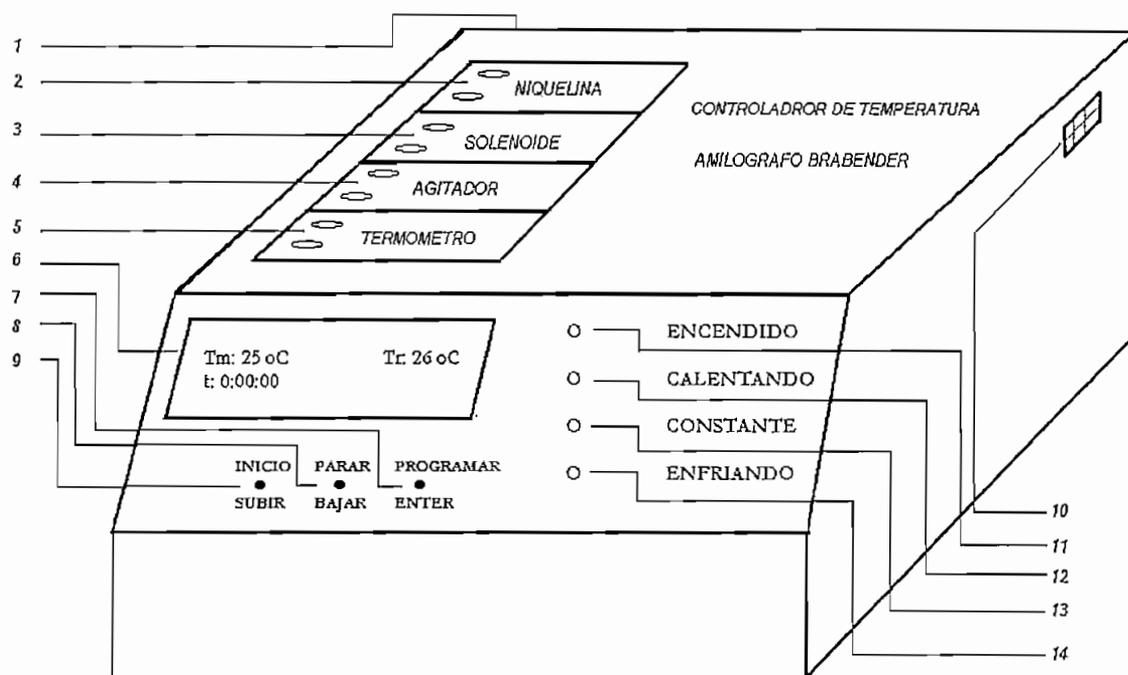


Figura 5.1 Controlador de temperatura

## 5.2 FUNCIONES

1. Botón de encendido y apagado del controlador.
2. Plug para conectar la Niquelina.
3. Plug para conectar el Solenoide.
4. Plug para conectar el AGITADOR.
5. Plug para conectar el TERMÓMETRO.
6. Display de Cristal Líquido (LCD) para indicar datos y mensajes.
7. Pulsador que sirve para ingresar al modo programar y para confirmar el dato.
8. Pulsador que sirve para decrementar el valor del dato ingresado y para detener el proceso.
9. Pulsador que sirve para incrementar el valor del dato ingresado y para iniciar el proceso.
10. Buzzer suena cuando está desconectado el sensor de temperatura y ha finalizado el proceso.
11. Led que indica que el equipo está encendido.
12. Led que indica que el proceso está en la fase de calentamiento.
13. Led que indica que el proceso está en la fase de constante.
14. Led que indica que el proceso está en la fase de enfriamiento.

### 5.3 CONEXIÓN DE DISPOSITIVOS

Para el funcionamiento del equipo primero se debe realizar las conexiones de los dispositivos:

Niquelina : Se conecta en el plug respectivo respetando el código de color.

Solenoide : Se conecta en el plug respectivo respetando el código de color.

Agitador : Se conecta en el plug respectivo respetando el código de color.

Termómetro : Se conecta en el plug respectivo respetando el código de color.

Finalizado la conexión de los dispositivos se procede a conectar el enchufe del controlador a la red de voltaje de alimentación.

### 5.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- |  |                |
|--|----------------|
| 1. LCD: Resolución                             | : 0.1°C        |
| 2. Rango de temperatura                        | : 0°C a 102 °C |
| 3. Voltaje de alimentación para el controlador | : 110V 60Hz    |
| 4. Voltaje de alimentación para la Niquelina   | : 220V 60Hz    |
| 5. Voltaje de alimentación para el Agitador    | : 110V 60Hz    |

## 5.5 INTRODUCCIÓN

En el Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología (DECAB) de la EPN se tiene instalado un "Amilógrafo Brabender" que sirve para medir la viscosidad de mezclas de productos de almidón.

Para medir la viscosidad de las mezclas tratadas se requiere tres fases de cocción: calentamiento, mantenimiento y enfriamiento.

1. Calentamiento, subida lineal de la temperatura hacia una temperatura máxima predeterminada, con un gradiente de temperatura.
2. Mantenimiento, donde se mantiene constante la temperatura durante un tiempo predeterminado.
3. Enfriamiento, bajada lineal de temperatura hacia una temperatura determinada, con un gradiente de temperatura.

El controlador de temperatura diseñado para el Amilógrafo Brabender regula la variación de potencia que disipa la níquelina y el ingreso de aire frío para generar la curva de temperatura vs tiempo que se muestra a continuación en la Figura 5.2.

El operador fija los valores de la temperatura: mínima, máxima y enfriamiento, los gradientes de temperatura y el tiempo que debe mantenerse constante el valor de la temperatura para realizar el proceso de cocción.

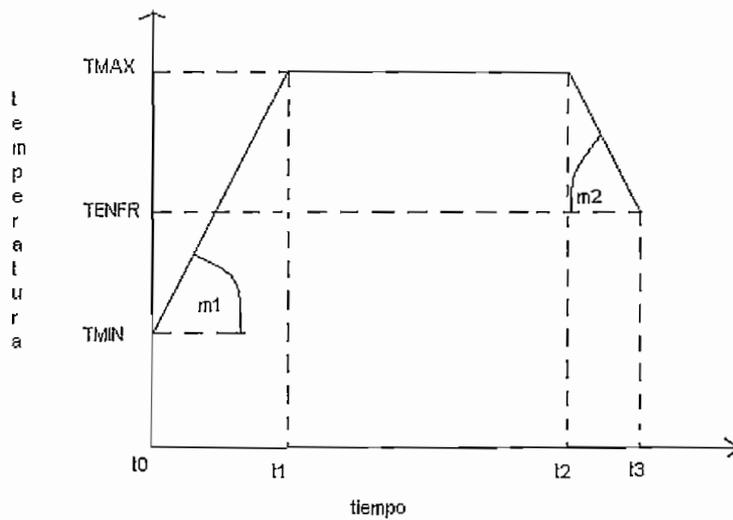


Figura 5.2 Curva temperatura vs tiempo

Tramos de temperatura:

1. Tramo  $[t_0$  a  $t_1]$ , es la fase de calentamiento donde la temperatura sube en forma lineal desde la temperatura mínima hasta la temperatura máxima con una gradiente de temperatura ( $m_1$ ).
2. Tramo  $[t_1$  a  $t_2]$ , en esta fase se debe mantener constante la temperatura en un valor predeterminado.
3. Tramo  $[t_2$  a  $t_3]$ , es la fase de enfriamiento donde la temperatura debe bajar en forma lineal hacia la temperatura de enfriamiento con una gradiente de temperatura ( $m_2$ ).

El rango de temperatura y gradiente en el cual trabaja el controlador de temperatura para las tres fases son:

FASES	TEMPERATURA	GRADIENTE
Calentamiento	$25^{\circ}C$ a $90^{\circ}C$	$0^{\circ}C/min$ a $2.1^{\circ}C/min$
Mantenimiento	$90^{\circ}C$	$0^{\circ}C/min$
Enfriamiento	$90^{\circ}C$ a $55^{\circ}C$	$0^{\circ}C/min$ a $2.1^{\circ}C/min$

Las pruebas que se pueden realizar con el controlador de temperatura son de tres tipos:

1. Fase de calentamiento.
2. Fase calentamiento + Fase mantener constante la temperatura
3. Fase calentamiento + Fase mantener constante la temperatura + Fase de enfriamiento.

## 5.6 OPCIONES QUE PRESENTA EL CONTROLADOR

El controlador de temperatura presenta dos opciones, para realizar el proceso de cocción de productos de almidón estas son: DEFECT y PROGRAMAR

### 5.6.1 DEFECT

Si se escoge esta opción los valores que se cargan por defecto son:

1. Temperatura mínima:  $25^{\circ}C$
2. Temperatura máxima:  $90^{\circ}C$
3. Temperatura enfriamiento:  $55^{\circ}C$
4. Gradiente de calentamiento ( $m1$ ) = Gradiente de enfriamiento ( $m2$ ) =  $1.5^{\circ}C / \text{min}$
5. Tiempo (fase mantenimiento): 20 minutos.

### 5.6.2 PROGRAMAR

Si se escoge esta opción el usuario necesita ingresar los valores de:

1. Temperatura mínima (Tmin)
2. Temperatura máxima (Tmax)
3. Temperatura enfriamiento (Tenf)
4. Gradiente de calentamiento (mcal)
5. Gradiente de enfriamiento (menf)
6. Tiempo (mantenimiento) (tiempo)

## 5.7 CONFIGURACION DEL CONTROLADOR PARA INICIAR EL PROCESO

Se debe conectar al controlador de temperatura: la niquelina, solenoide, agitador y el sensor de temperatura en su respectivo plug, previo a la configuración de los parámetros que se necesita el controlador para iniciar el proceso.

### 5.7.1 INGRESO DE DATOS

Encender el equipo, aparece la pantalla de presentación que se muestra en la Figura 5.3, luego se presenta la pantalla del menú principal que se muestra en la Figura 5.4.

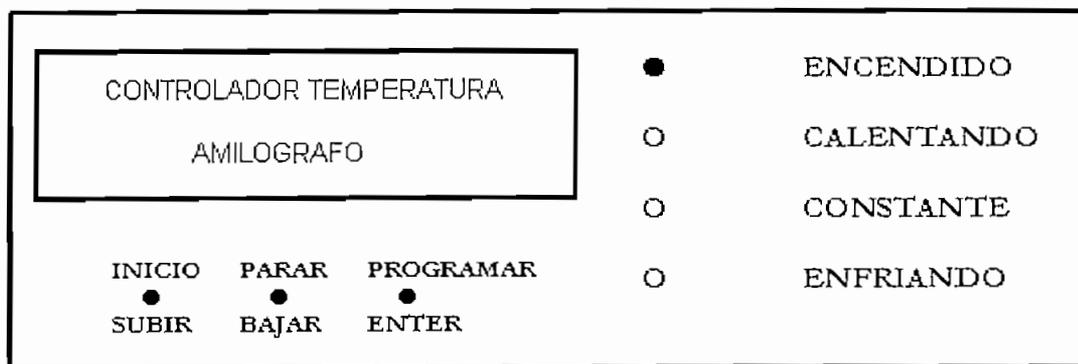


Figura 5.3 Pantalla de presentación

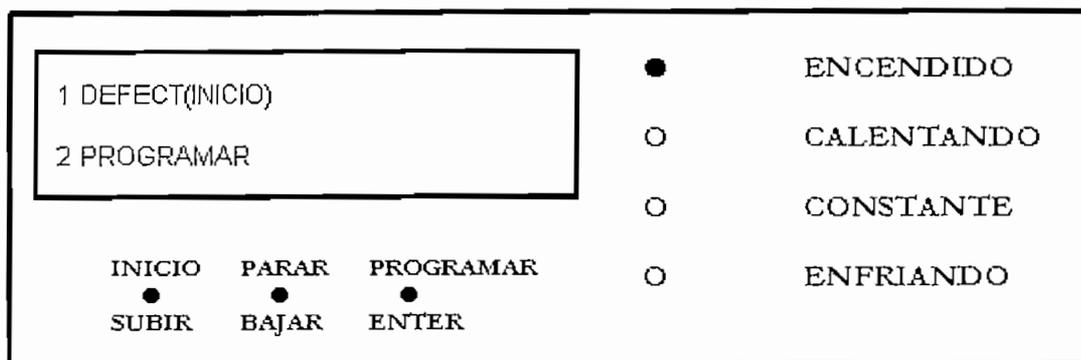


Figura 5.4 Pantalla de menú principal

Se puede escoger las siguientes opciones: DEFECT Y PROGRAMAR

### 5.7.2 DEFECT

Para escoger está la opción presione el pulsador INICIO y automáticamente comienza el proceso de cocción y aparecerá la siguiente pantalla que se muestra en la Figura 5.5. Está es la pantalla que se muestra durante la ejecución de todo el proceso.

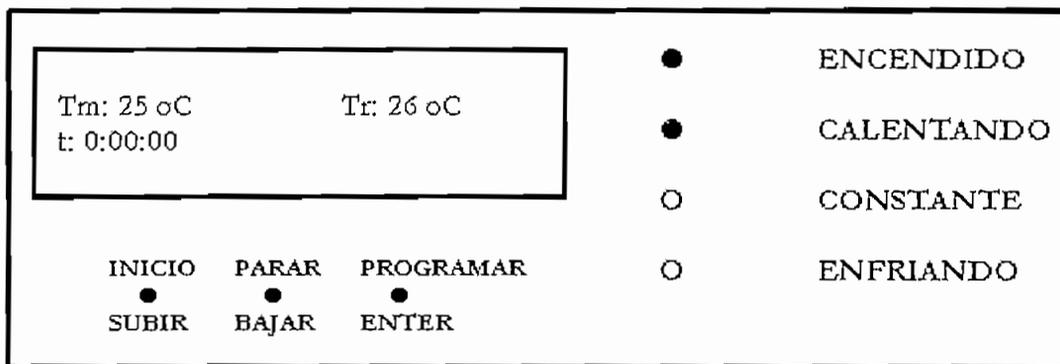


Figura 5.5 Pantalla de ejecución de secuencia

Donde:

Tm : muestra el valor medido de la temperatura actual

Tr : muestra el valor de la temperatura que debe alcanzar

t : muestra el tiempo de que dura cada fase del proceso.

### 5.7.3 PROGRAMAR

Para escoger esta la opción presione el pulsador PROGRAMAR el controlador le pedirá que ingrese los valores de temperatura, tiempo y gradiente, presentará la siguiente pantalla que se muestra en la Figura 5.6

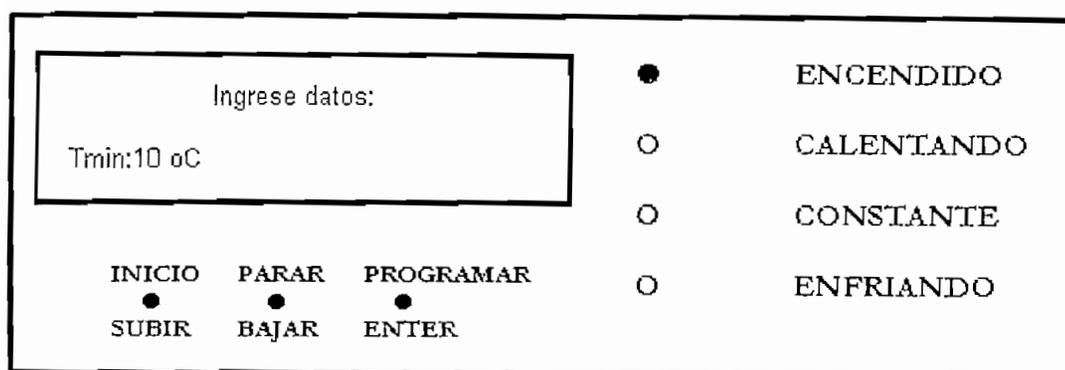


Figura 5.6 Pantalla para el ingreso de datos

Para el ingreso de datos se utiliza los pulsadores SUBIR Y BAJAR y para confirmar el dato presione el pulsador ENTER.

Finalizado el ingreso de datos se presenta la siguiente pantalla que se muestra en la Figura 5.7.

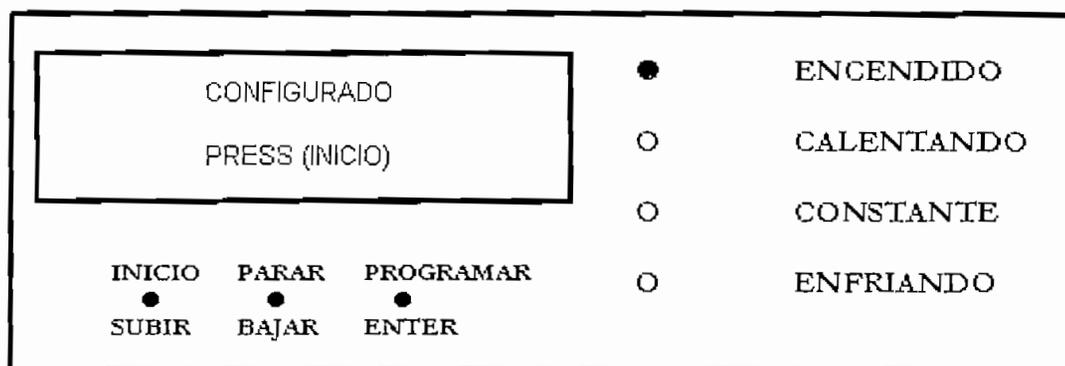


Figura 5.7 Pantalla Controlador al finalizar ingreso de datos

Para iniciar el proceso se presiona pulsador INICIO y presenta la pantalla que muestra en la Figura 5.8. Está es la pantalla que se muestra durante la ejecución de todo el proceso.

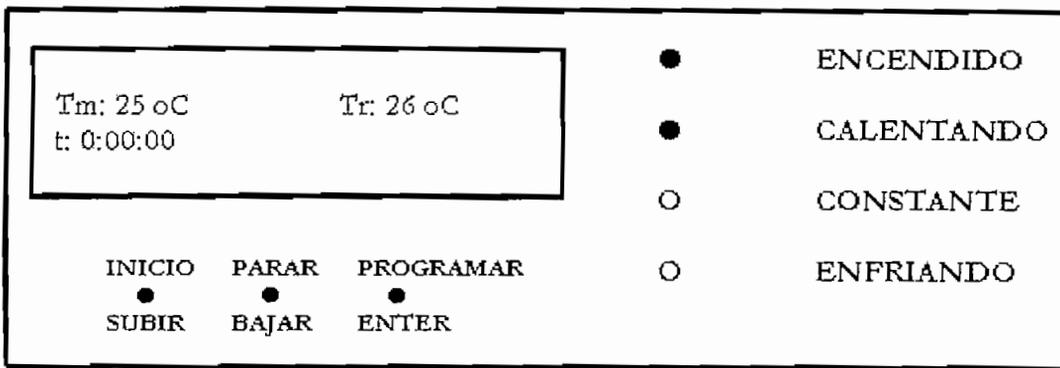


Figura 5.8 Pantalla de ejecución de secuencia

## 5.8 FINALIZACIÓN DEL PROCESO

Finalizado el proceso el controlador presenta la siguiente pantalla que se muestra en la Figura 5.9, durante 15 segundos luego muestra la pantalla que se muestra en la Figura 5.10, durante 40 segundos y se repite esta secuencia hasta que el operador escoja una de las opciones.

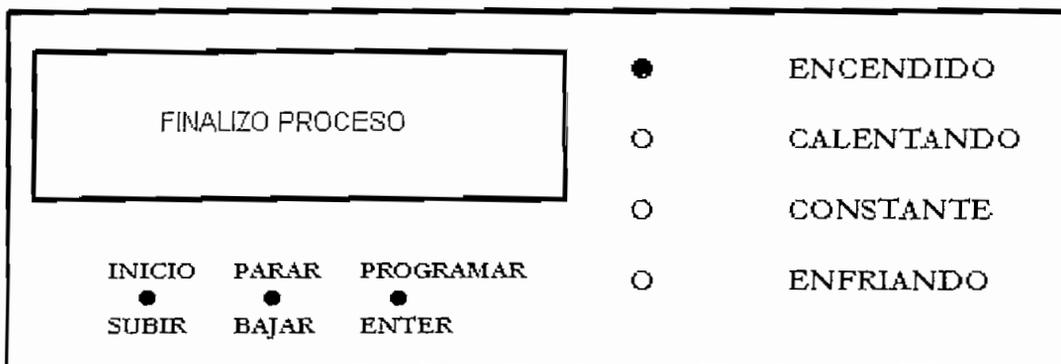


Figura 5.9 Pantalla a la finalización del proceso

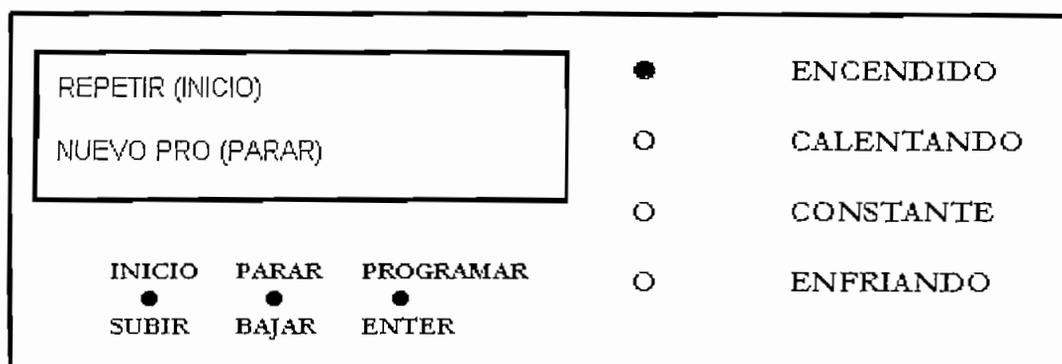


Figura 5.10 Pantalla del menú final

Para escoger una de las opciones del menú final se lo debe realizar durante la presentación de la pantalla de la Figura 10.

### 5.8.1 REPETIR (INICIO)

Para escoger esta opción se presiona el pulsador INICIO y el controlador presenta la siguiente pantalla que se muestra en la Figura 5.11.

Para repetir el proceso se presiona el pulsador inicio.

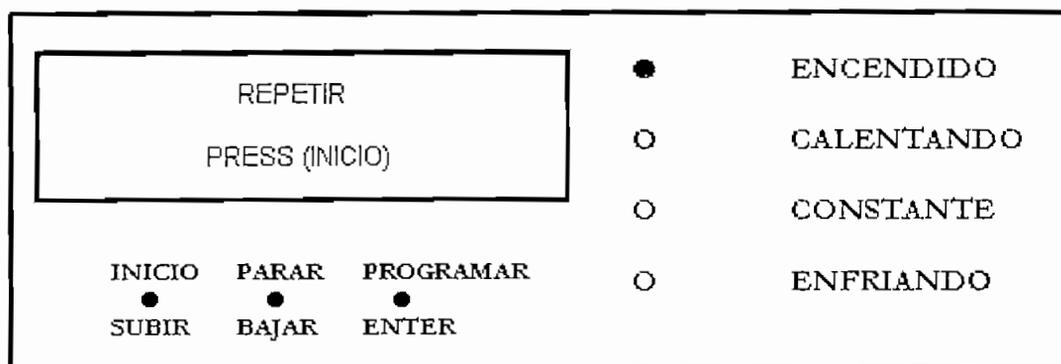


Figura 5.11 Pantalla para repetición del proceso

### 5.8.2 NUEVO PRO (PARAR)

Para escoger esta opción se presiona el pulsador PARAR y el controlador presenta la siguiente pantalla que se muestra en la Figura 5.12. Está es la pantalla del menú principal y se repite el proceso nuevamente.

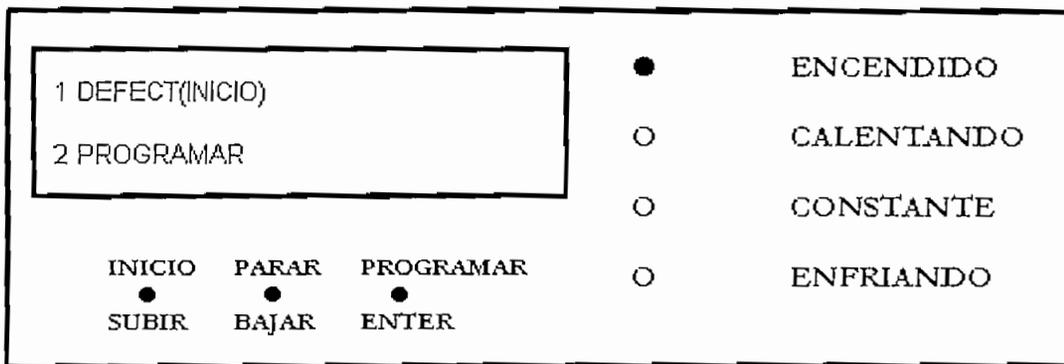


Figura 5.12 Pantalla del menú principal

### 5.9 MENSAJE QUE MUESTRA EL CONTROLADOR

El controlador presenta la pantalla que se muestra en la Figura 5.13. Cuando el sensor esta desconectado.

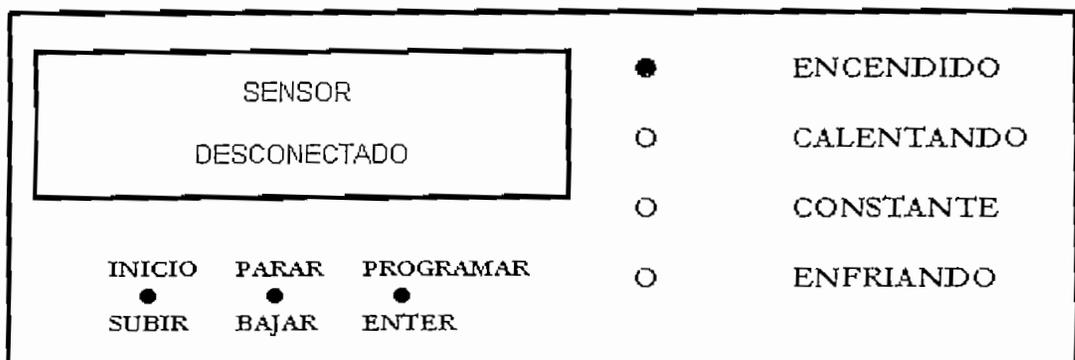


Figura 5.13 Pantalla de Sensor desconectado