

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE ANÁLISIS TÉRMICO  
DIFERENCIAL (ATD)**

**YENFOR COBO QUESADA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**POPAYÁN**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE ANÁLISIS TÉRMICO  
DIFERENCIAL (ATD)**

YENFOR COBO QUESADA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Físico.

**DIRECTORA**

SONIA GAONA JURADO

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

POPAYÁN

**NOTA DE ACEPTACION**

---

---

---

---

---

**Directora**

**Dra. Sonia Gaona Jurado**

---

**Jurado**

**Dr. Germán Bacca**

---

**Jurado**

**Dr. Miguel Corchuelo**

**Fecha de sustentación: Popayán, Diciembre 17 de 2010**

## TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS .....	6
INDICE DE TABLAS .....	9
INTRODUCCION .....	140
<b>CAPÍTULO 1:FUNDAMENTOS TEÓRICOS QUE RIGEN EL ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL .....</b>	<b>14</b>
1.1. PRINCIPIOS DE LA TECNICA.....	16
1.2. ESQUEMA GENERAL DE UN ATD.....	24
1.3. APLICACIONES.....	24
<b>CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL ATD – YECOQ1: EL HORNO.....</b>	<b>23</b>
2.1. LA ESTRUCTURA CERAMICA.....	24
ESTUDIO REOLOGICO.....	24
MOLDE DE YESO.....	24
VACIADO POR COLADO .....	24
TRATAMIENTO TERMICO Y SINTERIZACION .....	31
2.2. RESISTENCIA ELECTRICA.....	32
2.3. EL SENSOR DE TEMPERATURA.....	33
2.4. AISLANTE TERMICO.....	36
2.5. CARCASA.....	37
<b>CAPÍTULO 3:DISEÑO DEL ATD – YECOQ1: EL SISTEMA DE CONTROL ....</b>	<b>39</b>
3.1. CONTROLADOR PID.....	41
3.1.1. DERIVADOR CON GANANCIA LIMITADA.....	44
3.1.2. MODIFICACION DE LA ACCION PROPORCIONAL.....	24
3.1.3. DESCRIPCION MATEMATICA DE LA PLANTA.....	47
3.2. RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL.....	48
3.2.1. CARACTERIZACION DEL HORNO.....	48
3.2.2. PARAMETROS DEL CONTROLADOR PID.....	50
3.2.3. SIMULACION .....	50
<b>CAPÍTULO 4:IMPLEMENTACION DEL ATD – YECOQ1: CONTROL DE TEMPERATURA .....</b>	<b>54</b>
4.1. COMPONENTES.....	55
4.1.1. MICROCONTROLADOR PIC18F452.....	24
4.1.2. COMPENSADOR DE JUNTURA FRIA AD595 DE ANALOG DEVICES.....	56
4.1.3. MAX232.....	58
4.1.4. OPTOACOPLADOR MOC3022.....	58
4.1.5. TRIAC BTA40 600B.....	24

4.2. MONTAJE.....	60
4.2.1. CIRCUITO DEL ACTUADOR.....	60
4.2.2. CIRCUITO DETECTOR DE CRUCE POR CERO.....	62
4.2.3. SEÑAL PWM.....	63
4.2.4. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE LA TERMOCUPLA.....	66
4.2.5. MICROCONTROLADORES.....	67
MICROCONTROLADOR 1.....	24
MICROCONTROLADOR 2.....	67
4.3. IMPLEMENTACION CONTROLADOR DE TEMPERATURA.....	67
<b>CAPÍTULO 5:EL ATD – YECOQ1: PUESTA EN FUNCIONAMIENTO Y PRUEBAS.....</b>	<b>74</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>90</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>98</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1.</b> CURVA TÍPICA ATD DE UNA REACCIÓN ENDOTÉRMICA ...	114
<b>FIGURA 1.2.</b> RESULTADO ATD .....	114
<b>FIGURA 1.3.</b> TERMOGRAMA ATD COMERCIAL .....	19
<b>FIGURA 1.4.</b> ESQUEMA GENERAL DE UN ATD .....	21
<b>FIGURA 2.1.</b> REPRESENTACIÓN DEL MUESTREO POR ZIG-ZAG PARA SUELOS .....	25
<b>FIGURA 2.2.</b> MUESTRAS DE ARCILLAS CAOLINITICA.....	26
<b>FIGURA 2.3.</b> CURVA DE VISCOSIDAD PARA LA BARBOTINA .....	214
<b>FIGURA 2.4.</b> BARBOTINA.....	29
<b>FIGURA 2.5.</b> MOLDE DE YESO.....	30
<b>FIGURA 2.6.</b> VACIADO POR COLADO .....	31
<b>FIGURA 2.7.</b> TRATAMIENTO TÉRMICO EMPLEADO EN LA SINTERIZACIÓN .....	31
<b>FIGURA 2.8.</b> RESISTENCIA ELÉCTRICA EN ALAMBRE KANTHAL A1.....	33
<b>FIGURA 2.9.</b> ESQUEMA DE UNA TERMOCUPLA .....	33
<b>FIGURA 2.10.</b> FEM DE LAS TERMOCUPLAS MÁS USADAS .....	35
<b>FIGURA 2.11.</b> TERMOCUPLA TIPO K UTILIZADA.....	35
<b>FIGURA 2.12.</b> MATERIALES DE AISLAMIENTO TÉRMICO .....	37
<b>FIGURA 2.13.</b> HORNO ELÉCTRICO EN ACERO INOXIDABLE .....	314
<b>FIGURA 3.1.</b> ESQUEMA GENERAL DE UN SISTEMA DE CONTROL .....	40
<b>FIGURA 3.2.</b> ESQUEMA GENERAL DE UN SISTEMA DE CONTROL PID ....	41
<b>FIGURA 3.3.</b> ACCIONES DE CONTROL P, I, D, PID .....	43
<b>FIGURA 3.4.</b> RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN DERIVADOR .....	44
<b>FIGURA 3.5.</b> RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN DERIVADOR CON GANANCIA LIMITADA.....	45
<b>FIGURA 3.6.</b> CONTROL PID CON MODIFICACIONES EN LAS ACCIONES PROPORCIONAL Y DERIVATIVA.....	46

<b>FIGURA 3.7.</b> CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA (HORNO), °C VS S .....	414
<b>FIGURA 3.8.</b> RESPUESTA DEL HORNO ANTE UNA ENTRADA ESCALÓN DE 30 A 40 VOLTIOS AC .....	49
<b>FIGURA 3.9.</b> DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA SIMULACIÓN.....	51
<b>FIGURA 3.10.</b> DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR Y HORNO.	51
<b>FIGURA 3.11.</b> SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CONTROL.....	52
<b>FIGURA 4.1.</b> MICROCONTROLADOR PIC18F452.....	56
<b>FIGURA 4.2.</b> AD595 DE ANALOG DEVICES.....	57
<b>FIGURA 4.3.</b> CONEXIONES AD595.....	57
<b>FIGURA 4.4.</b> MAX232.....	58
<b>FIGURA 4.5.</b> OPTOACOPLADOR MOC3022 .....	59
<b>FIGURA 4.6.</b> TRIAC BTA40600B .....	59
<b>FIGURA 4.7.</b> MONTAJE CIRCUITAL DEL ATD-YECOQ1 .....	60
<b>FIGURA 4.8.</b> CONTROL DE VOLTAJE DE UNA CARGA DE AC .....	61
<b>FIGURA 4.9.</b> VOLTAJE EN LA CARGA .....	62
<b>FIGURA 4.10.</b> CIRCUITO <i>DETECTOR DE CRUCES POR CERO</i> .....	63
<b>FIGURA 4.11.</b> SEÑAL PWM.....	63
<b>FIGURA 4.12.</b> FORMA EN QUE DEBE GENERAR LA SEÑAL PWM.....	65
<b>FIGURA 4.13.</b> VARIACION DEL MONTAJE EN LA CARGA VERSUS EL ANCHO DEL PULSO DE LA SEÑAL PWM .....	65
<b>FIGURA 4.14.</b> CARACTERIZACIÓN TERMOCUPLA UTILIZADA EN EL CONTROL DE TEMPERATURA.....	66
<b>FIGURA 4.15.</b> IMPLEMENTACIÓN CONTROLADOR PID .....	69
<b>FIGURA 4.16.</b> RESPUESTA DEL CONTROLADOR PI CON CONDICIONALES .....	71
<b>FIGURA 4.17.</b> COMPARACION DEL ERROR EN LA PLANTA PARA EL CONTROLADOR PID Y EL CONTROLADOR PI CON CONDICIONALES .....	73
<b>FIGURA 5.1.</b> TERMOGRAMA ATD PARA <i>NaCl</i> .....	75
<b>FIGURA 5.2.</b> TERMOGRAMA ATD PARA <i>Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub></i> .....	77

<b>FIGURA 5.3.</b> TERMOGRAMA ATD PARA $Ba(NO_3)_2$ .....	77
<b>FIGURA 5.4.</b> TERMOGRAMA ATD PARA M29 .....	77
<b>FIGURA 5.5.</b> TERMOGRAMA ATD PARA M27 .....	714
<b>FIGURA 5.6.</b> TERMOGRAMA ATD PARA M28 .....	714
<b>FIGURA 5.7.</b> TERMOGRAMA ATD PARA M40 .....	79
<b>FIGURA 5.8.</b> TERMOGRAMA ATD PARA M4 .....	79
<b>FIGURA 5.9.</b> TERMOGRAMA ATD PARA SBN .....	79
<b>FIGURA 5.10.</b> REPRODUCIBILIDAD DE TERMOGRAMAS PARA EL SBN	140
<b>FIGURA 5.11.</b> TERMOGRAMA ALÚMINA-ALÚMINA PARA CALIBRACIÓN	141
<b>FIGURA A.1.</b> TRIANGULO DE COMPOSICIÓN CERÁMICA .....	144
<b>FIGURA C.1.</b> LAZO DE CONTROL DE TIEMPO CONTINUO (A) Y SU EQUIVALENTE DE TIEMPO DISCRETO (B) .....	90
<b>FIGURA C.2.</b> DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA ECUACIÓN (D-1) .....	90
<b>FIGURA C.3.</b> VALOR MÁS APROXIMADO DE LA INTEGRAL (A) POR “ARRIBA”, (B) POR “ABAJO” Y (C) TRAPEZOIDAL.....	91
<b>FIGURA C.4.</b> DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONTROLADOR CON UN INTEGRADOR DE TUSTIN .....	92
<b>FIGURA C.5.</b> LEY DE CONTROL PROPORCIONAL.....	92
<b>FIGURA C.6.</b> LEY DE CONTROL INTEGRAL.....	93
<b>FIGURA C.7.</b> DERIVADOR DE TIEMPO CONTINUO.....	95
<b>FIGURA C.8.</b> DERIVADOR DE TIEMPO DISCRETO .....	95



## INDICE DE TABLAS

<b>TABLA 2.1.</b> VALORES DE PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN LA OBTENCIÓN DE LA BARBOTINA.....	27
<b>TABLA 2.2.</b> ESPECIFICACIONES MOLDE DE YESO .....	29
<b>TABLA 2.3.</b> TIPOS DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.....	32
<b>TABLA 2.4.</b> TIPOS DE TERMOCUPLAS MÁS COMUNES .....	34
<b>TABLA 3.1.</b> CONDICIONES INICIALES Y FINALES DE LA SEÑAL DE ENTRADA ESCALÓN AL HORNO .....	414
<b>TABLA 3.2.</b> CARACTERIZACIÓN DEL HORNO.....	49
<b>TABLA 3.3.</b> PARÁMETROS DEL CONTROLADOR .....	50
<b>TABLA 5.1.</b> SALES SOMETIDAS A ATD CON EL ATD-YECOQ1 .....	76
<b>TABLA 5.2.</b> MUESTRAS SOMETIDAS A ATD CON EL ATD-YECOQ1 .....	76
<b>TABLA A.1.</b> APLICACIONES CERÁMICAS DE ACUERDO A LA COMPOSICIÓN DE LAS ARCILLAS .....	144

# **INTRODUCCIÓN**

El Departamento del Cauca es uno de los departamentos con mayor diversidad, historia y riqueza en Colombia. Desde la fundación de Popayán en 1537, esta región ha jugado un papel importante, siendo que durante muchos años fue epicentro económico y político del país. No obstante en la actualidad esta situación ha cambiado y el Departamento se mantiene en una situación de rezago.

Los problemas actuales del Cauca son diversos y muy complejos. Uno de los sectores económicos, fuente de gran número de empleos directos, en el Cauca es el de la alfarería [1]. Esta actividad, a pesar de ser una de las más antiguas de la región tiene poco desarrollo tecnológico, limitándose a la producción de materiales cerámicos tradicionales tales como ladrillos, tejas y cerámica artesanal (jarrones, ollas, materas), con poca rentabilidad e insuficiente para cubrir las necesidades del mercado en la región.

El grupo de investigación Ciencia y Tecnología de Materiales Cerámicos de la Universidad del Cauca, CYTEMAC, desarrolló un proyecto de investigación titulado “obtención de alúmina a partir de caolín como alternativa para la fabricación de cerámicos avanzados”, en el que se utilizaron arcillas extraídas de los depósitos de ladrilleras de la zona rural de Popayán [2].

Los resultados obtenidos a partir de esa investigación dejaron claro que la materia prima utilizada por las ladrilleras tiene potencial para ser empleada, tanto en la obtención de ladrillos de mejor calidad, como en cerámica avanzada (refractarios, de aislamiento eléctrico, de resistencia al ataque químico) que tienen cada vez mas acogida y demanda en el mercado.

No obstante, dentro de las conclusiones obtenidas en el proyecto se hizo evidente que es necesario conocer las características y propiedades tanto de la materia prima como de los procesos que se dan durante su transformación hasta la obtención del producto final. Específicamente, el conocimiento de las

propiedades térmicas de las arcillas permite tener un control durante su manipulación y procesamiento, información que puede ser usada para la optimización de los procesos y productos finales, redundando en ahorros de tipo económico. Este conocimiento (análisis térmico) puede ser obtenido a partir del análisis de datos suministrados por equipos de tecnología avanzada, tales como los Analizadores Térmicos Diferenciales (ATD).

El análisis térmico diferencial (ATD), es una técnica de gran importancia en el estudio de diversos minerales, cerámicas y vidrios. Esta técnica realiza un registro de la variación del flujo de calor de la muestra en estudio, cuando es sometida a cambios controlados en la temperatura, comparando en simultánea con las variaciones de temperatura de una muestra de referencia. A través de este método se obtienen *termogramas* que contienen información sobre procesos físicoquímicos en el material de estudio, tales como fusión, absorción, oxidación, reducción y descomposición, además de ser base para estudios de diagramas de fase, transiciones cristalinas, calores de reacción y calores específicos.

En este documento se detalla el proceso de diseño e implementación de un analizador térmico diferencial, el ATD-YECOQ1 (nombre dado por el autor). El ATD construido cumple con los requerimientos tecnológicos básicos característicos de los ATD que ofrece el mercado, permitiendo obtener termogramas para el análisis de reacciones térmicas en diversos materiales.

El proceso de diseño y construcción del ATD-YECOQ1 implicó el alcance de ciertos objetivos específicos tales como:

- Diseñar y construir un horno eléctrico con las características necesarias para la caracterización térmica. Los detalles de esta parte del trabajo se encuentran en el Capítulo II de este documento.

- Diseñar y construir un controlador de temperatura para el horno eléctrico. En el Capítulo III se exponen los detalles respectivos.
- Diseñar el sistema de adquisición de datos, desarrollo que se encuentra explicado en el capítulo IV.
- Implementar y calibrar el ATD-YECOQ1 obteniendo termogramas de muestras con comportamiento térmico conocido, y confirmar la reproducibilidad de los mismos. Los resultados se consignan en el capítulo V, con los respectivos análisis.

Finalmente se presentan las conclusiones, referencias y bibliografía. La fundamentación teórica sobre análisis térmico diferencial y sobre los componentes de un equipo ATD básico se consigné en el capítulo I

Otra información relevante para el desarrollo de este trabajo, se encuentra en los anexos (A-C). El contenido es: el triángulo cerámico y cálculos para la obtención de la densidad de la arcilla (anexo A), el modelo de control interno (anexo B), y la discretización del controlador (anexo C).

**CAPÍTULO I:**

**FUNDAMENTOS TEÓRICOS QUE RIGEN EL  
ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL**

Cuando un material es sometido a variaciones de temperatura, su estructura cristalina y su composición química pueden sufrir cambios en un grado más o menos importante, lo que a su vez tiene un efecto sobre determinada propiedad del material. Estos cambios pueden monitorearse a través de la medida de la variación de las distintas propiedades del material en función de su temperatura. Los cambios más relevantes son:

- Fusión: paso del estado sólido al estado líquido
- Sublimación: paso del estado sólido al estado gaseoso
- Solidificación: paso del estado líquido al estado sólido
- Cristalización: paso al estado sólido ordenado
- Amorfización: paso al estado sólido desordenado
- Transición estructural: cambio en su estructura cristalina
- Reacciones de oxidación/reducción, descomposición.
- Expansiones y/o compresiones en su volumen
- Cambios texturales: sinterización, recristalización.

Bajo la denominación de Análisis Térmico se engloba un conjunto de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales, en las cuales se sigue una propiedad de la muestra en función del tiempo o de la temperatura, cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura controlado o tratamiento térmico, que puede consistir en calentar o enfriar el material a una determinada velocidad, o mantener la temperatura constante, o una combinación de ambas.

Entre las técnicas de análisis térmico más comunes se destacan:

- Termogravimetría (TG)
- Análisis Térmico Diferencial (ATD)
- Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC, del inglés *Diferencial Scanning Calorimetry*)
- Análisis Termomecánico (ATM)

- Análisis Dinamomecánico (ADM)
- Termodifractometría (TDX)

No obstante, cada técnica tiene su fundamento en un proceso específico, por lo tanto, para el diseño y construcción de un analizador térmico diferencial es necesario partir de los fundamentos teóricos que rigen la técnica. En este capítulo se dará una revisión teórica de dichos fundamentos.

### 1.1 Principios de la Técnica.

El **Análisis Térmico Diferencial**, ATD, es una de las técnicas de análisis térmico más utilizadas en los laboratorios de materiales, tanto por la calidad de la información que arroja como por los bajos costos de su implementación. Los principios que rigen esta técnica son englobados en la termoquímica, que estudia los cambios de calor en reacciones químicas.

La termoquímica se basa en dos principios de la termodinámica:

**El incremento de temperatura en la materia registra el aumento de energía cinética de sus componentes internos.**

**Una reacción química puede entenderse como el cambio de un estado de equilibrio de la materia hacia otro estado de equilibrio. Estos cambios pueden ser de estados físicos, formando nuevos compuestos o nuevas fases estructurales y están relacionados con una cantidad de energía que es la que permite establecer el equilibrio general de la materia. Esta energía puede ser absorbida, *proceso endotérmico*, o puede ser liberada, *proceso exotérmico*, por el material.**

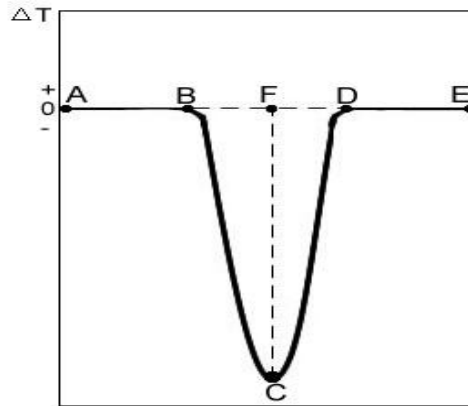
El ATD como técnica de análisis utiliza estos principios. En un **Análisis Térmico Diferencial** se somete a una variación de temperatura tanto a la muestra como a un material de referencia, que es inerte desde el punto de vista térmico, físico y químico. El ATD mide la diferencia de temperatura entre la muestra y el material de referencia, en función del tiempo (a temperatura constante) o de la temperatura alcanzada en cada momento. Estas medidas se pueden realizar en condiciones ambientales o bajo una atmósfera controlada.



En principio, se trata de una técnica cualitativa que permite detectar si se dan procesos endotérmicos o exotérmicos en la muestra, e indica la temperatura a la cual tienen lugar estos cambios energéticos.

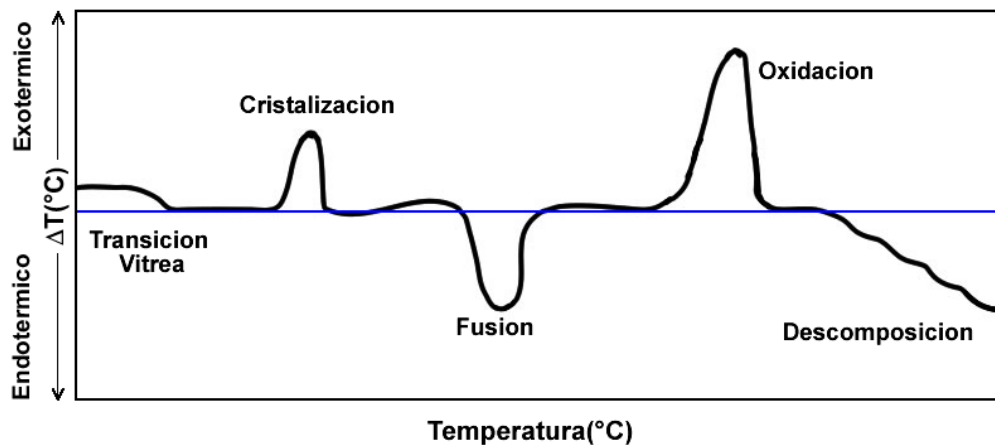
Los cambios se registran mediante picos que se desprenden de una línea base e indican el inicio, punto característico y final de la reacción. Los picos sobre las curvas de ATD varían mucho, no solamente en el área si no también en la nitidez y la simetría. En la figura 1.1 se muestra una curva simple de ATD para un material en una reacción endotérmica.  $\Delta T$  es trazada sobre la ordenada y el tiempo (t) o temperatura (T) en la abscisa. Se han resaltado algunos puntos de interés de acuerdo con los cambios que se dan en la curva. Así, del punto A al B, y del punto D al E no ocurre ninguna reacción, la muestra se calienta en la rampa de temperatura al igual que el material de referencia y  $\Delta T=0$ . Los tramos AB y DE son conocidos como *línea base* y BCD como *pico*. El punto B es llamado *comienzo o inicio del pico*, el punto D *fin del pico* y la temperatura en el punto C se conoce como *temperatura pico*, que se mide respecto al material de referencia. Finalmente, CF es la *altura del pico* o amplitud, BD es el *ancho del pico* y el área encerrada es conocida como *área pico*.

Algunas condiciones particulares en las muestras pueden ocasionar cambios de desplazamiento y forma en los picos. Existe una relación entre el área del pico y la cantidad del componente que reacciona, lo que posibilita el trabajo cuantitativo, esto implica desarrollar una serie de detalles técnicos para estandarizar las condiciones de trabajo.



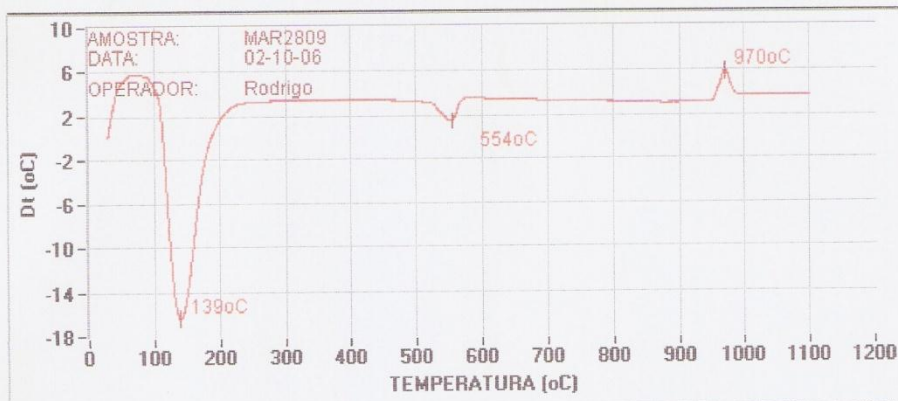
**Figura 1.1.** Curva típica ATD de una reacción endotérmica.

Cada material a lo largo del proceso de calentamiento registra varios picos (transformaciones), lo que permite caracterizar su naturaleza predominante, así como la presencia de otros componentes, tal como se observa en la figura 1.2 que esquematiza un resultado o termograma ATD típico.



**Figura 1.2** Resultado ATD. En el eje  $x$  se monitorea la temperatura de la muestra, en el eje  $y$   $\Delta T$  representa la diferencia de temperaturas entre la muestra analizada y la de referencia. Los picos representan diferentes cambios sufridos por la muestra sometida a un tratamiento térmico.

Lógicamente existe sobreposición de picos que en algunos casos dificulta la evaluación del material. En la figura 1.3 se muestra un termograma ATD tal como se obtiene a partir de equipos comerciales.



ACIDENTES TÉRMICOS SIGNIFICATIVOS

TEMP. °C	DESCRIÇÃO	INTENSIDADE
139 °C	ACIDENTE ENDOTÉRMICO	MÉDIA INTENSIDADE
554 °C	ACIDENTE ENDOTÉRMICO	PEQUENA INTENSIDADE
970 °C	ACIDENTE EXOTÉRMICO	PEQUENA INTENSIDADE

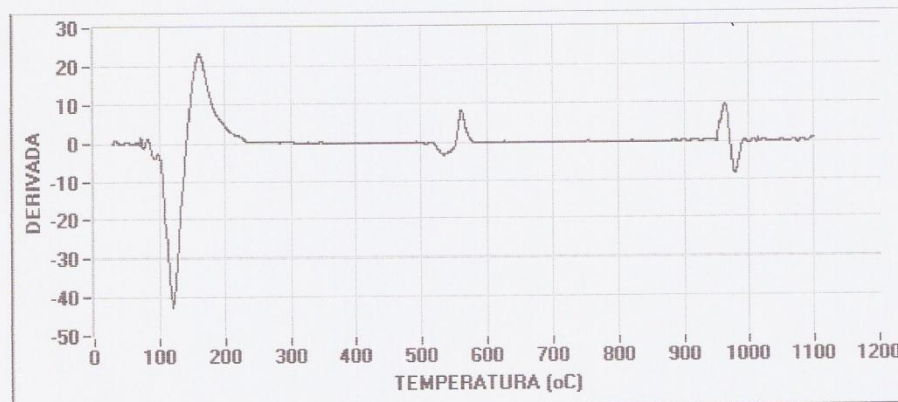


Figura 1.3 Termograma ATD comercial

## 1.2. Esquema General de un ATD

El esquema básico de un ATD puede variar dependiendo de los requerimientos y exigencias del usuario, no obstante, todo ATD consta de ciertos componentes básicos que se describen a continuación

***El Horno;*** generalmente de tipo tubular vertical para lograr una temperatura uniforme, ya que se evita el calor por convección, las resistencias van enrolladas a lo largo del tubo, nicróm o kanthal para temperaturas a 1100°C, platino para 1500°C y platino-rodio para 1750°C, estos materiales son usados de acuerdo al límite de temperatura que se requiera.

En la parte superior va una tapa refractaria que puede ser removida para acelerar el enfriamiento; existen equipos que permiten desarrollar atmósferas particulares, inclusive de carácter reductor.

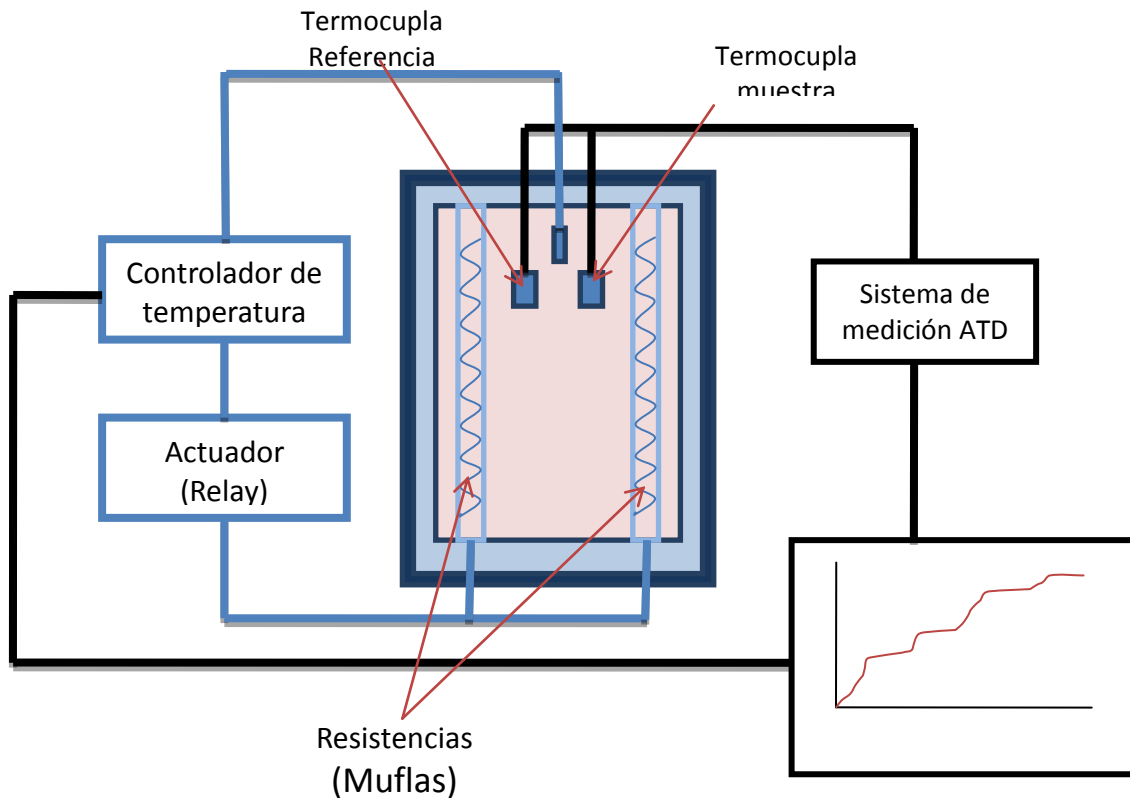
***El Portamuestras;*** las muestras se colocan en pequeños crisoles de material refractario.

Son dos, uno para el material de referencia y otro para la muestra en estudio (existen equipos que presentan mayor número). Existen portamuestras metálicos para mejorar la transmisión de calor. Todos estos aditamentos se ubican en un sistema móvil que permite su introducción hasta un punto fijo del horno.

- ✓ ***Las termocuplas;*** de acuerdo con el diseño del horno, pueden ser de Ni - Cr Ni, para temperaturas hasta 1100°C o las de Pt-Pt Rh hasta 1600°C. Las termocuplas son la encargadas de registrar la evolución térmica de la muestras y regular el horno.

***Registrador;*** presenta un sistema de registro para la muestra de referencia inerte (que mostrará el incremento gradual de temperatura y permitirá ubicar gráficamente la temperatura de trabajo); y otro para la muestra problema (que grafica todo su comportamiento térmico). Actualmente la señal de las termocuplas son recogidas por tarjetas interfase y llevadas al computador que permite mostrar estas gráficas.

En la figura 1.4 se presenta un diseño general de un equipo de ATD.



**Figura 1.4.** Esquema general de un ATD

### 1.3. Aplicaciones

El Análisis Térmico engloba un conjunto de técnicas analíticas muy versátiles, aplicables a distintos campos, tales como:

- Ciencia y tecnología de polímeros
- Ciencia y tecnología de los materiales carbonosos
- Ciencia de materiales
- Catálisis
- Industria farmacéutica
- Industria metalúrgica
- Mineralogía y petrología

En concreto, se pueden citar las siguientes aplicaciones:

- Estudios de descomposición y estabilidad térmica
- Estudios composicionales
- Determinación de la pureza de un material
- Determinación de contenido en humedad, materia volátil, cenizas o carbono
- Estudios de gasificación de muestras carbonosas
- Estudios cinéticos.

En el capítulo V se registran los resultados y análisis obtenidos a partir del ATD diseñado e implementado durante esta investigación, presentando termogramas de muestras de diferente naturaleza.

**CAPÍTULO II:**  
**DISEÑO DEL ATD-YECOQ1:**  
**El Horno**

Como ya fue expuesto, para el diseño y la construcción del horno eléctrico se deben analizar los siguientes ítems:

- La estructura cerámica.

**Las resistencias eléctricas.**

**El sensor de temperatura.**

**Aislante térmico.**

**La carcasa**

**Los portamuestras**

En este capítulo se detalla el proceso de la selección y/o construcción de cada uno de los elementos mencionados.

## **2.1 La Estructura Cerámica**

Con el ánimo de fortalecer lo expuesto en el documento de Cobo J. y colaboradores [3] respecto a la amplia aplicación de las arcillas de fuentes ubicadas en la zona rural de Popayán, para la construcción de la estructura cerámica del horno del ATDYECOQ-1 se hace uso de dichos resultados.

Las arcillas, material de interés en este trabajo, sufren cambios de interés hasta temperaturas alrededor de los 1100° C, por lo que se requiere construir un horno que alcanzase dicha temperatura y, por consiguiente, el material de revestimiento interno del mismo deberá soportar esta temperatura. De acuerdo con lo reportado por Cobo J., se eligió utilizar arcillas caoliníticas como materia prima para la elaboración del refractario del horno. El proceso consta de los siguientes pasos:

**Fase de recolección y tratamiento de la arcilla**

**Obtención de la barbotina (mezcla de agua y arcilla utilizada en cerámica)**

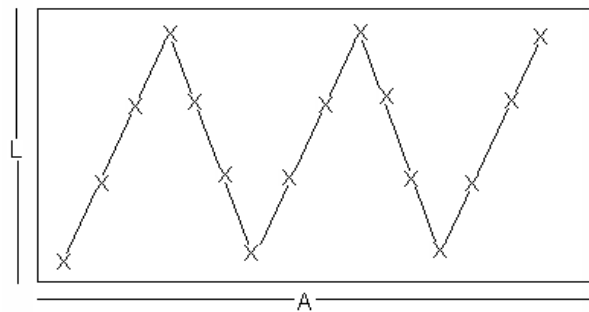
**Estudio reológico de la barbotina que permita conseguir su homogeneidad.**

**Fabricación de molde en yeso y obtención de la estructura cerámica en verde.**



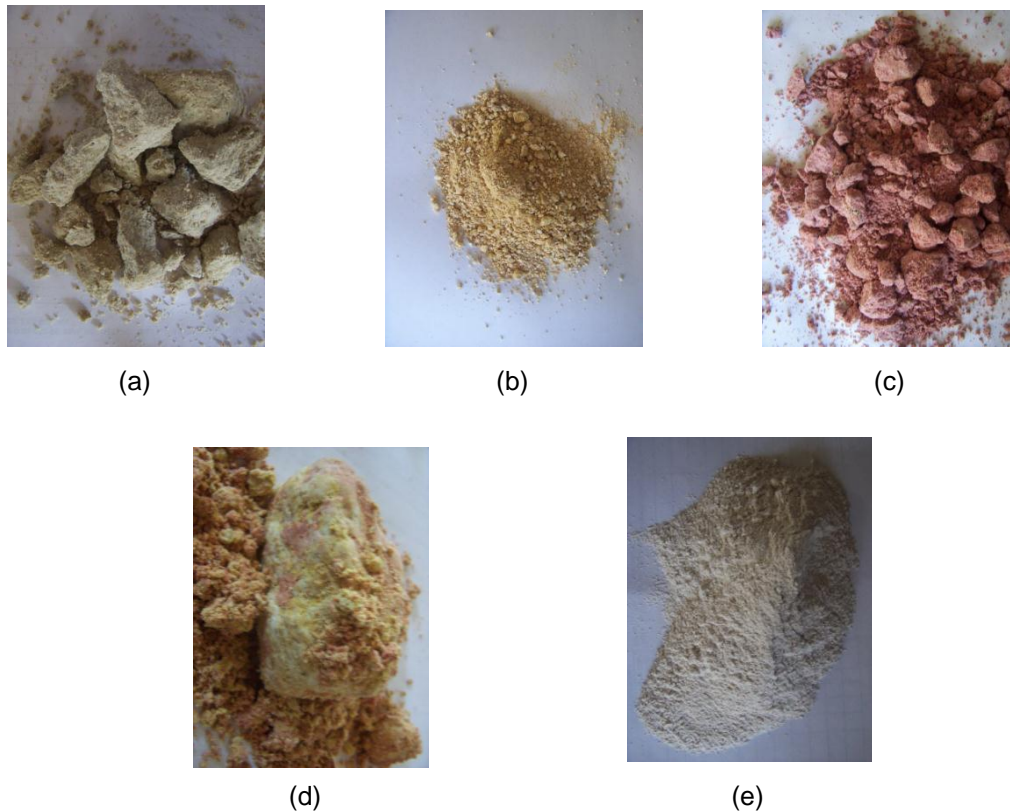
### Secado y sinterización de la estructura cerámica

La fase de recolección inició con un muestreo, eligiendo un área que presentó uniformidad en sus características físicas (color, altura, profundidad), ya que las variaciones de relieve indican variaciones de suelo, así procedan de la misma roca madre. Se procedió a aplicar el método de zig-zag para la toma de muestras por ser el más práctico y representativo (figura 2.1). La profundidad para la toma de muestra fue de 5 y 30 cm, sin tener en cuenta la capa superficial en la toma de muestra (desde 0 a 5 cm) dado que esta parte es la que sufre más procesos de meteorización, haciéndola no representativa del suelo. Posterior a la recolección la muestra fue empacada en bolsas negras.



**Figura 2.1** Representación del muestreo por zig-zag para suelos, donde L= largo (cm) y A=Ancho (cm), del área del terreno a muestrear, las X indican la ubicación de toma de las submuestras.

Se usaron tres muestras de caolín, dos de minas de la región (Cajete y La Tetilla) y una comercial. Las muestras recolectadas presentaron diversidad de colores, tal como se observa en las figuras 2.2(a)-(d), fotografías en las que se evidencian características representativas como color y textura.



**Figura 2.2** Muestras de arcillas caolinitica que presentan diferentes coloraciones y texturas, y de diferentes fuentes (a) Muestra de Cajete Beis b) Muestra de cajete Amarilla (c) Muestra de la tetilla rosada (d) Muestra de la tetilla Amarilla (e) Muestra de la tetilla hueso

Las muestras recolectadas fueron sometidas a un proceso de secado natural a la sombra por 30 días; como paso siguiente se sometieron a molienda, utilizando un molino de tracción durante 24 horas, permitiendo disminuir el tamaño de partícula y aumentando así su actividad química.

Se procedió a obtener la barbotina. Según lo reportado en el trabajo de Cobo J. y colaboradores, para obtener una buena cerámica refractaria utilizando estas arcillas se debe partir de una composición de 44% de caolín de la Tetilla, 36% de caolín de Cajete y un 20% de arcilla plástica (comercial), por otro lado, la barbotina de arcillas debe tener una densidad  $d_s$  en el rango de 1.6 a 1.7 g/cm<sup>3</sup> (ver anexo A). Para este trabajo se eligió  $d_s \approx 1.65$  g/cm<sup>3</sup>.

La fabricación de la barbotina incluyó calcular las concentraciones de agua y de arcilla, para lo cual se empleó la ecuación 2.1, [4]

$$\frac{1}{d_s} = \frac{C_{H_2O}}{d_{H_2O}} + \frac{C_c}{d_c} \quad (2.1)$$

Siendo  $d_s$  la densidad de la barbotina,  $C_{H_2O}$  la concentración de agua en la mezcla,  $d_{H_2O}$  la densidad del agua,  $C_c$  la concentración de caolín en la mezcla y  $d_c$  la densidad del caolín.

Los valores de los parámetros involucrados en la ecuación 2.1 se obtuvieron de la siguiente manera:

La densidad del caolín se calculó haciendo uso de un procedimiento experimental de densidad de suelos, utilizando un picnómetro y una bomba de vacío, el valor obtenido fue de  $d_c=2.7$  g/ml, los detalles experimentales y cálculos se encuentran consignados en el **anexo A**.

La densidad del agua se asume como  $d_{H_2O}= 1$  g/ml y teniendo que:

$$C_{H_2O} + C_c = 1 \quad (2.2)$$

se obtuvieron valores para  $C_{H_2O}=0.37$  y  $C_c=0.64$ .

En la tabla 2.1 se consignan los datos de interés de las diferentes densidades y concentraciones descritas.

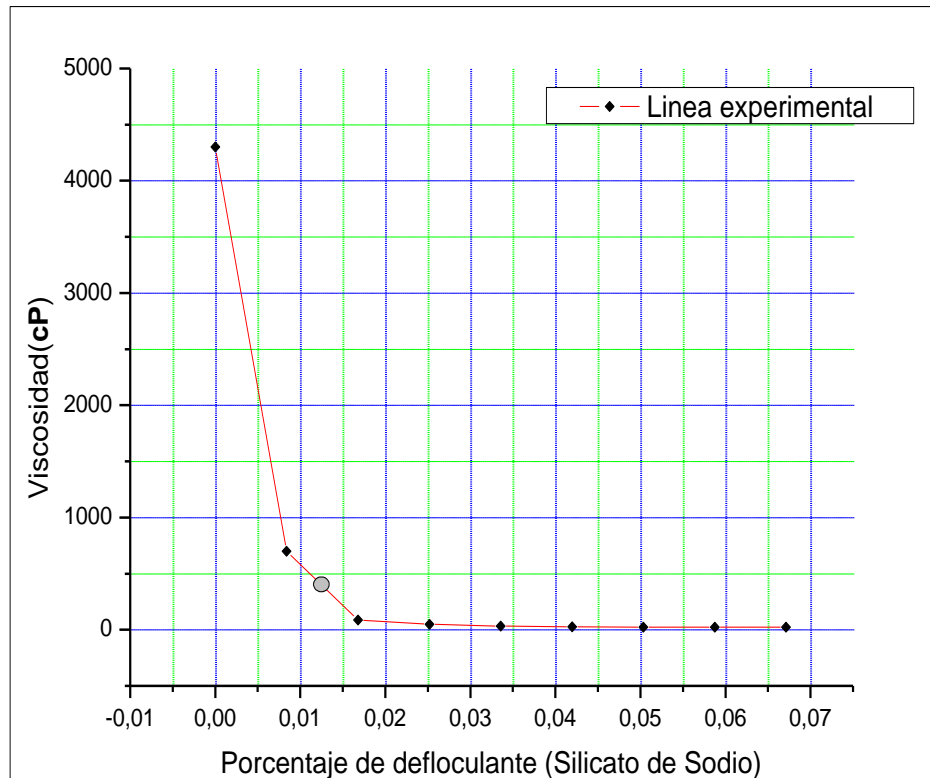
**Tabla 2.1.** Valores de parámetros involucrados en la obtención de la barbotina.

$d_c$ (g/ml)	$d_{H_2O}$ (g/ml)	$C_{H_2O}$	$C_c$	$d_s$ (g/ml)
2.7	1	0.37	0.64	1.65

Con los datos de concentración obtenidos se fabricó la barbotina y se hizo un estudio reológico.

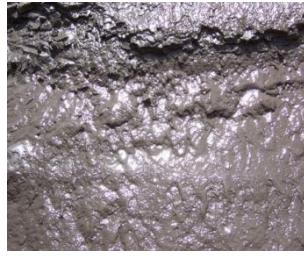
## Estudio reológico

El estudio reológico consiste en adicionar defloculante (silicato de sodio) a la barbotina y registrar los datos de viscosidad en función del porcentaje en peso de defloculante, tal como se observa en la figura 2.3.



**Figura 2.3** Curva de viscosidad ( $\eta$  vs % de defloculante) para la barbotina

El objetivo es determinar la cantidad de defloculante necesario para que las partículas tengan una distribución homogénea dentro de la cerámica cuando esta sea llevada a tratamiento térmico y sinterización, sin sufrir fractura. Este procedimiento es necesario ya que la barbotina sin el agente defloculante es una mezcla sin movilidad y poco homogénea. En las figuras 2.4a y 2.4b se observa la barbotina sin y con defloculante respectivamente.



(a)



(b)

**Figura 2.4** (a) Barbotina sin defloculante (b) Barbotina con defloculante

La cantidad de defloculante a utilizar se determina para el punto óptimo de viscosidad, que en la figura 2.3 está indicado por el punto gris que se resalta. De lo anterior, el porcentaje en peso de defloculante óptimo para la barbotina es de  $1.679 \cdot 10^{-2} \%$ .

### Molde de yeso

La fabricación de la pieza cerámica en verde se hizo mediante el proceso de *vaciado por colado* de la barbotina en un molde poroso de yeso, técnica de bajo costo y con buenos resultados. El molde de yeso debe cumplir unas especificaciones, las cuales están consignadas en la tabla 2.2 [5].

**Tabla 2.2** Especificaciones del molde de yeso

Consistencia	Densidad de la suspensión	Factor $H_2O$	Factor yeso
75	1.48 g/ml	0.63	0.84

Las cantidades de agua y yeso están directamente relacionadas con el volumen de la cerámica en verde mediante las formulas 2.3 y 2.4.

Para el agua:

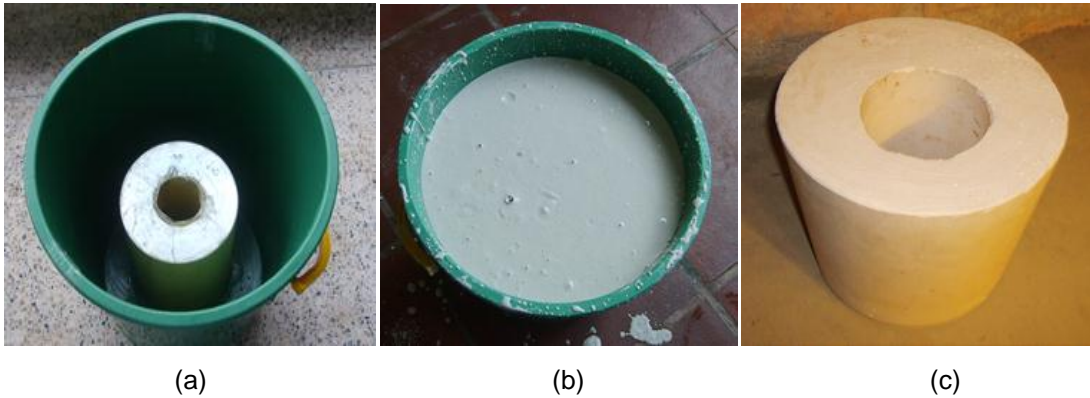
$$V_{\text{Refractario}} * \text{Factor}_{H_2O} = \text{Cantidad}_{H_2O}(\text{ml}) \quad (2.3)$$

Para el yeso:

$$V_{\text{Refractario}} * \text{Factor}_{\text{yeso}} = \text{Cantidad}_{\text{yeso}}(\text{ml}) \quad (2.4)$$

A partir de las dos fórmulas se obtienen volúmenes, en el caso del yeso se hace necesario utilizar su densidad para calcular la masa a utilizar en el molde.

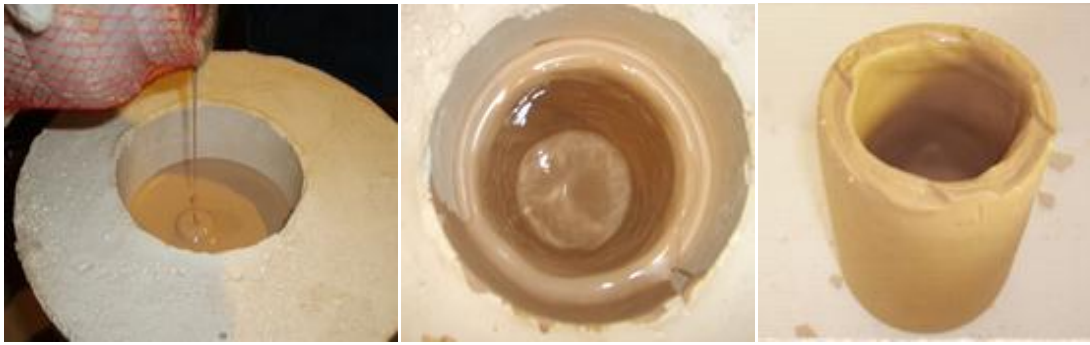
En la figura 2.5 se muestra el molde construido para la fabricación de la pieza cerámica.



**Figura 2.5** (a) Premolde, (b) Premolde con yeso en el proceso de secado, (c) Molde de yeso seco

### Vaciado por colado

Es una técnica de modelado, adaptada a la cerámica artística desde su desarrollo en la industria, consiste en verter dentro de un molde de yeso una barbotina líquida. A seguir se da inicio a un fenómeno de intercambio electrolítico (ósmosis) entre la barbotina y las paredes del molde. Como consecuencia, el agua y materiales solubles pasan al yeso, dando lugar a la formación de una capa de barbotina de arcilla en forma sólida. El grosor de la capa depende del tiempo de exposición de la barbotina en el molde, como se muestra en las figuras 2.6. Cuando se obtiene el grosor de capa previsto, se debe retirar la barbotina en exceso, dejando que se seque la pieza en el molde y se forme la cerámica en verde.



(a)

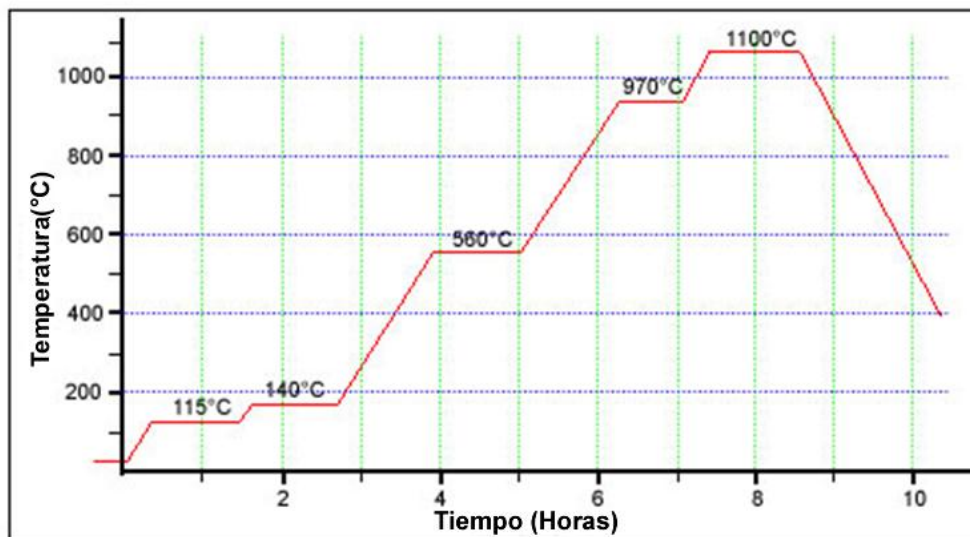
(b)

(c)

**Figura 2.6** (a) Vaciado de la barbotina en el molde de yeso, (b) Secado de la pieza cerámica en el molde, (c) Pieza cerámica en verde

### Tratamiento Térmico y Sinterización

El tratamiento térmico de la pieza cerámica en verde se realizó con el fin de obtener una fase térmicamente estable. Se tuvieron en cuenta los termogramas de ATD de las arcillas empleadas en la fabricación del refractario, de donde se extrajo información concerniente a las temperaturas donde ocurren los accidentes térmicos que determinan la estabilidad térmica del refractario. Teniendo en cuenta que los accidentes térmicos de la arcilla de La Tetilla ocurren a 115°C, 560°C, 970°C y los de la arcilla de Cajete a 115°C, 560°C y 970°C el tratamiento térmico es el que se muestra en la figura 2.7.



**Figura 2.7** tratamiento térmico empleado en la Sinterización de la pieza cerámica

## 2.2 Resistencia Eléctrica

Un calefactor eléctrico es un elemento que produce energía calórica a partir de la eléctrica. El más utilizado en hornos de laboratorio y de tratamientos térmico son las *resistencias eléctricas*, donde la generación del calor se debe al efecto *Joule*. El calor se genera proporcionalmente al cuadrado de la corriente eléctrica que fluye a través de las resistencias, relación conocida como "*Ley de Joule*".

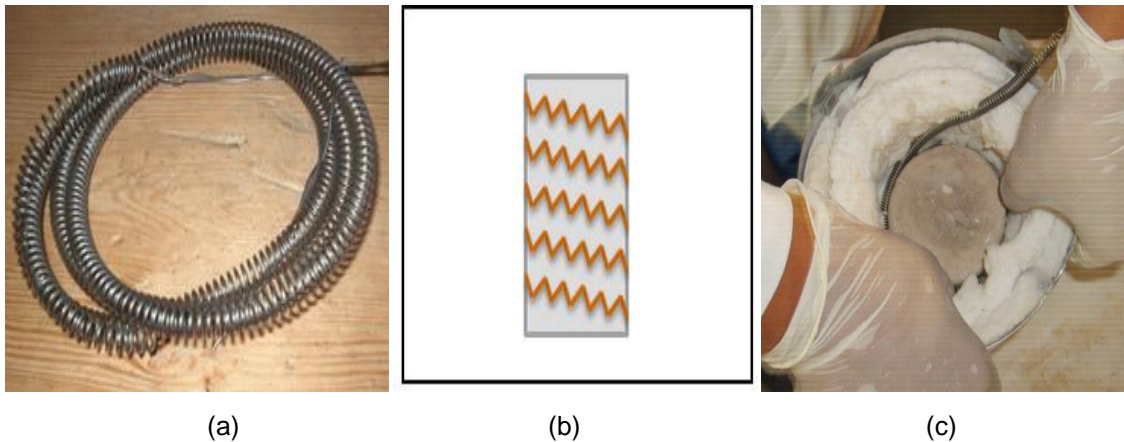
En la tabla 2.3 se muestran algunos materiales utilizados como elementos calefactores de hornos eléctricos, indicando su máxima temperatura de trabajo.

**Tabla 2.3** Tipos de resistencias eléctricas.

Tipo de alambre	Temperatura máxima de trabajo
Kanthalsuper AR	1850°C
Kanthal APM	1450°C
<b>Kanthal A-1</b>	<b>1375°C</b>
Kanthal A	1300°C
Kanthal AF	1250°C
Nicrothal 80	1200°C
Alcrothal	1050°C

En la tabla se ha resaltado el alambre tipo Kanthal A-1 ya que fue el empleado en este trabajo. La elección se hizo basada en su temperatura máxima de operación. Con el alambre se hizo una espiral, que a su vez envuelve el cerámico refractario como lo muestra la figura 2.8, esto con el fin de que no haya gradientes de temperatura en el interior del horno.



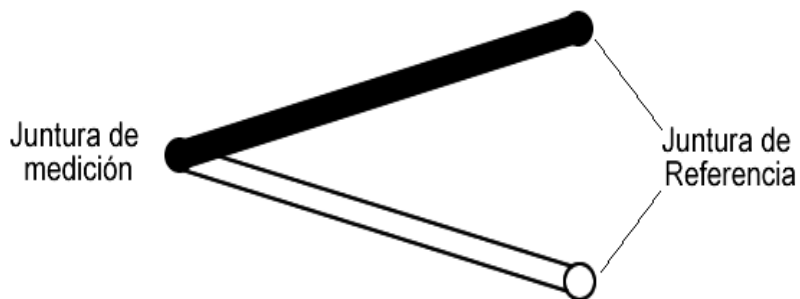


**Figura 2.8** (a) Alambre kanthal en espiral, (b) y (c) Espiral envolviendo el refractario

### 2.3 El sensor de temperatura

La temperatura es una de las variables físicas de mayor incidencia en la industria, en la actualidad existen un sin número de instrumentos que se dedican al monitoreo y control de esta variable.

Uno de los sensores más utilizados para la medición de la temperatura es la termocupla, elemento que consta de dos alambres de metales diferentes (como se muestra en la figura 2.9) unidos en un extremo formando lo que se conoce como junta de medición, donde ocurre un fenómeno llamado *efecto seebeck*, que consiste en el flujo de corriente desde uno de los metales hacia el otro metal debido a la densidad de electrones a lo largo de un conductor con gradiente de temperatura. El resultado es la producción de una fuerza termoeléctrica o electromotriz *fem*.



**Figura 2.9** Esquema de una termocupla.

Los metales que forman la termocupla deben cumplir ciertas características:

**Temperatura de fusión alta.**

**Alta temperatura de funcionamiento.**

**Baja resistividad eléctrica.**

**Bajo coeficiente térmico de resistencia.**

**Alta resistencia a la corrosión.**

**Propiedades estables con el tiempo.**

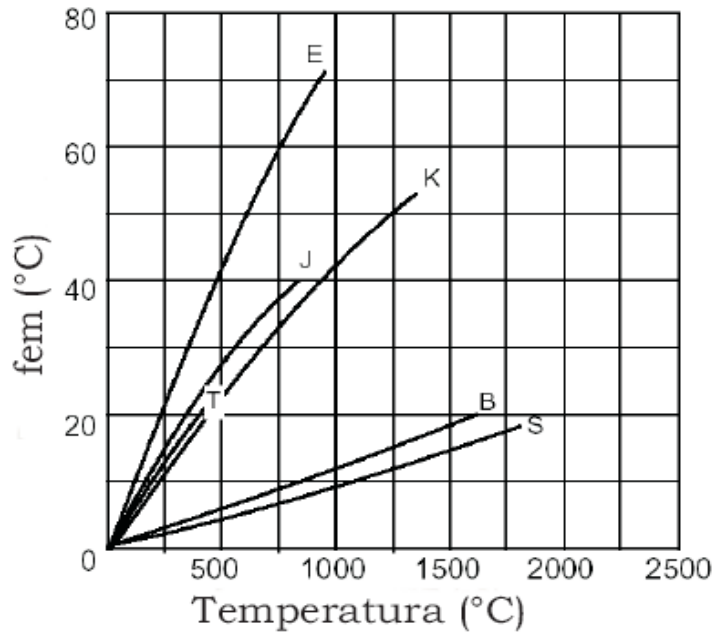
**Una relación continua y preferiblemente lineal entre las *fem* y la temperatura.**

Hay varios tipos de termocuplas que cumplen con estas características, según el estándar internacional IEC584 de la International electro-technical-commission. Las más conocidas se muestran en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4.** Tipos de Termocuplas más Comunes

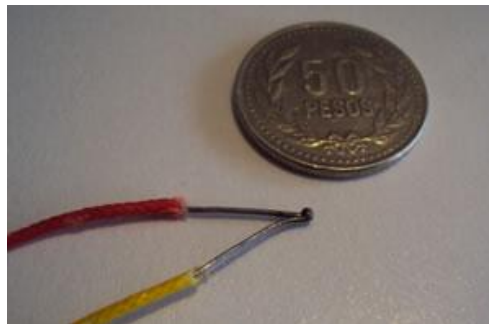
<b>Código</b>	<b>Composición</b>	<b>Rangos de temperatura °C</b>
T	Cobre/Cobre-Níquel	-200 a 371
J	Hierro/Cobre-Níquel	0 a 760
E	Níquel-Cromo/Cobre-Níquel	-200 a 900
K	Níquel-Cromo/Níquel-Aluminio	-200 a 1100
N	Níquel-Cromo-Silicio/Níquel-Silicio	0 a 1260
S	Platino-10%Rodio/Platino	0 a 1480
R	Platino-13%Rodio/Platino	0 a 1480
B	Platino-30%Rodio/Platino-6%Rodio	0 a 1820

La fem versus temperatura de las termocuplas más usadas son mostradas en la figura 2.10.



**Figura 2.10.** fem de las termocuplas más usadas.

La termocupla empleada en el desarrollo del presente trabajo es la tipo K, con una composición de Níquel – Cromo/Níquel – Aluminio, (90%Ni – 10%Cr / 95%Ni – Al, Si, Mn), también conocida como Cromel/Alumel. Esta termocupla puede extender su rango de operación a 1300°C, además, como se observa en la figura 2.10, su fem está cerca de la linealidad para un amplio rango de valores de temperatura, lo que hace que sea una de las más usadas. Esta termocupla es resistente a atmosferas oxidantes pero es afectada por atmósferas reductoras y por azufre que esté contenido en gases a altas temperaturas. En la figura 2.11 se muestra la termocupla tipo K utilizada.



**Figura 2.11.** Termocupla tipo K utilizada para en el desarrollo del ATD-YECOQ1

La señal que proviene de la termocupla tiene niveles de voltajes demasiado bajos, haciéndose necesario una etapa de acondicionamiento y amplificación de la misma, para tal fin se utilizó el AD595 de ANALOG DEVICES, circuito compensador de juntura fría diseñado para termocuplas tipo K. La descripción de este circuito integrado se encuentra en el capítulo IV.

#### **2.4 Aislante Térmico.**

Un aislante térmico es un material que se caracteriza por su alta resistencia térmica. Para el óptimo funcionamiento de un horno es necesario un buen aislamiento térmico que evite cualquier intercambio térmico de su interior con el exterior (sumidero), permitiendo una dinámica aislada del horno respecto del ambiente, esto contribuye a la reducción de pérdidas energéticas, reducción de contaminación ambiental y prevención de accidentes (incendios).

Para la fabricación del horno se utilizaron dos tipos de aislantes térmicos (ver figura 2.12), manta cerámica y placa refractaria tipo RS-100, que cumplen con las siguientes características.

**Baja conductividad térmica.**

**Excelente resistencia al choque térmico.**

**Bajo peso.**

**No contiene asbesto.**

**Resistencia a la corrosión.**

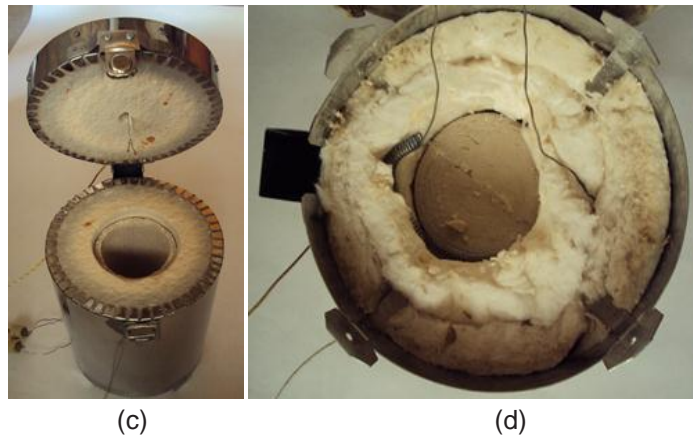
**Resistencia a la mayoría de ataques químicos.**



(a)



(b)



**Figura 2.12. Aislante térmico** (a) Manta cerámica (b) Placa refractaria (c) Placa refractaria en la parte superior del horno (d) manta cerámica en el interior de la carcasa

La placa refractaria se utilizó para sostener la estructura cerámica y para la tapa, mientras que la manta cerámica se utilizó para rellenar el espacio entre la carcasa y la estructura cerámica, tal como se muestra en la figura 2.12, de modo que al cerrar la tapa se obtenga un aceptable aislamiento entre el interior del horno con los alrededores, permitiendo que los procesos de tratamiento térmico tengan su propia inercia, sin ser afectados por los cambios en el ambiente.

## 2.5 Carcasa.

El horno diseñado, tiene forma cilíndrica con un radio de 7 cm y altura de 22 cm, la envolvente (carcasa) es de acero inoxidable, la tapa dispone de una bisagra que permite un accionamiento manual, tal como se muestra en la figura 2.13.

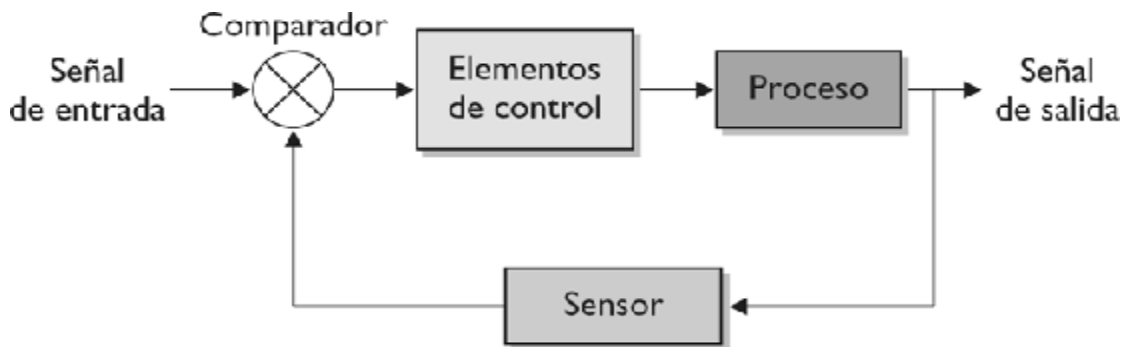


**Figura 2.13.** Horno eléctrico en acero inoxidable.

Todo horno dispone de un componente de control eléctrico, el controlador de este equipo se describe en el siguiente capítulo.

**CAPÍTULO III:**  
**DISEÑO DEL ATD-YECOQ1:**  
**EL SISTEMA DE CONTROL**

Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados. Está constituido básicamente por un controlador automático, un actuador, una planta y un elemento de medición, tal como se observa en el esquema general presentado en la figura 3.1.



**Figura 3.1** Esquema general de un sistema de control

El **controlador** detecta una señal de error que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida, haciendo que el control automático inyecte una señal de control a un **actuador** (tal como un motor eléctrico, una válvula neumática, un interruptor) que la convertirá en una variable que pueda manipular la **planta**. El **sensor o elemento** de medición hace una lectura de la acción ejecutada en la planta y la convierte en una señal que pueda ser comparada con la señal de entrada, completándose el sistema de control en lazo cerrado.

Existen diferentes tipos de control que se ajustan a los requerimientos del sistema a controlar y de la tecnología con la que se cuenta, así, se tiene el controlador *lineal* y el *no lineal*, el controlador *invariante en el tiempo* y el *variante en el tiempo*, el de *tiempo continuo* y el de *tiempo discreto*, con *parámetros concentrados* y con *parámetros distribuidos*, los *determinísticos* y *estocásticos*.



Además de las clasificaciones anteriores, se pueden discriminar los siguientes tipos de controladores, que son ampliamente utilizados en la industria.

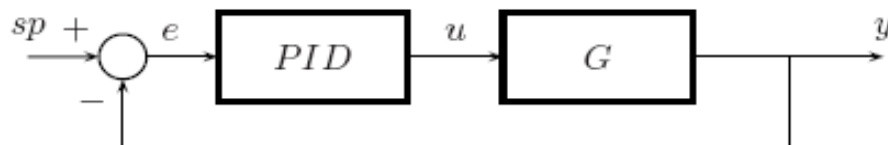
**On/Off**  
**Proporcionales**  
**Integrales**  
**Proporcionales-Integrales**  
**Proporcionales-Derivativos**  
**Proporcionales-Integrales-Derivativos**

Para el ATD-YECOQ1 se implementó un controlador de temperatura basado en un control de proceso proporcional–integral, PI, con condicionales. El proceso de implementación partió de la base del controlador proporcional-integral-derivativo, PID.

En este capítulo se expone tanto la base teórica del controlador PID como los diferentes resultados del sistema de control, tales como parámetros de la planta, sintonización, simulación y rampas de temperatura.

### 3.1 Controlador PID

La ley de control de un controlador tipo PID se deriva de una ley de control basada en la suma de tres términos, **Proporcional** (P), **Integral** (I) y **Derivativo** (D). Estos términos también suelen ser conocidos como modos del controlador. Un esquema general para un sistema de control PID se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2.** Esquema general de un sistema de control PID.

En la figura, “ $sp$ ” es la señal de referencia o SetPoint, “ $u$ ” es la señal de control que está limitada a un valor máximo,  $u_{max}$ , y un valor mínimo,  $u_{min}$ , “ $y$ ” es la variable controlada o señal de salida y “ $G$ ” es el modelo de la planta o sistema a controlar, sobre la cual recae la acción de control.

Cada uno de los términos P, I, D hace referencia a una acción de control, así:

**P: acción de control proporcional**, da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir:

$$u_p(t) = Ke(t) \quad (3.1)$$

Que aplicando transformada de Laplace:

$$\frac{U_p(s)}{E(s)} = K \quad (3.2)$$

Donde  $K$  es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

**I: acción de control integral**: da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u_i(t) = \frac{K}{T_i} \int e(t) dt \quad (3.3)$$

aplicando transformada de Laplace puede expresarse como:

$$\frac{U_i(s)}{E(s)} = \frac{K}{sT_i} \quad (3.4)$$

La señal de control  $u_i(t)$  tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error  $e(t)$  es cero, de donde se concluye que para una referencia constante, o perturbaciones constantes, el error en régimen permanente es cero.

**D: acción de control derivativa:** La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error (si el error es constante solamente actúan los modos proporcional e integral).

$$u_d(t) = KT_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

que puede ser descrita aplicando la transformada de Laplace como:

$$\frac{U_d(s)}{E(s)} = KT_d s \quad (3.6)$$

La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente a la misma velocidad con que se produce; de esta manera evita que el error se incremente.

**La acción de control proporcional-integral-derivativa, PID,** reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales, tal como se observa en la figura 3.3. La ecuación del controlador PID queda:

$$u(t) = Ke(t) + \frac{K}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + KT_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

y su función transferencia resultante:

$$C_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.8)$$

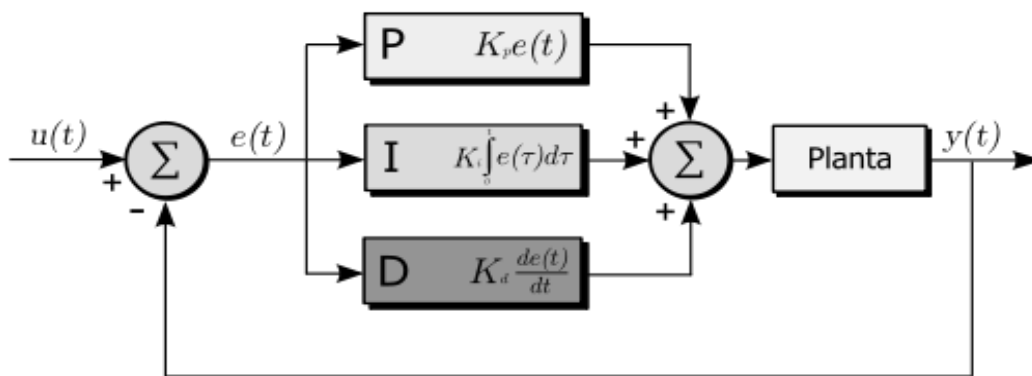


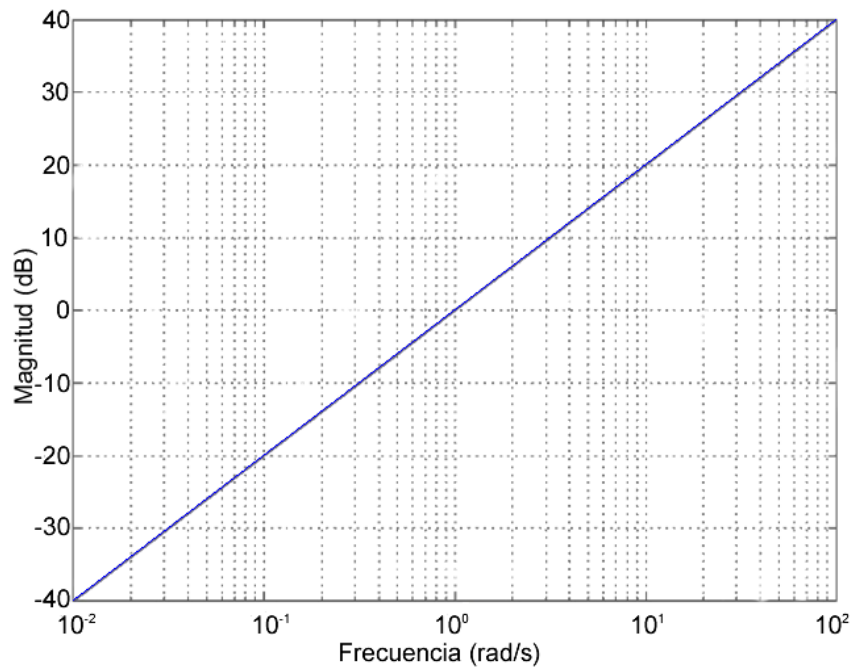
Figura 3.3. Acciones de control PID

No obstante, el controlador PID planteado es teórico. Cuando se requiere de su implementación a una planta “real” se hacen necesarias algunas modificaciones sobre las acciones proporcional y derivativa, tal como se describe a continuación.

### 3.1.1 Derivador con Ganancia Limitada

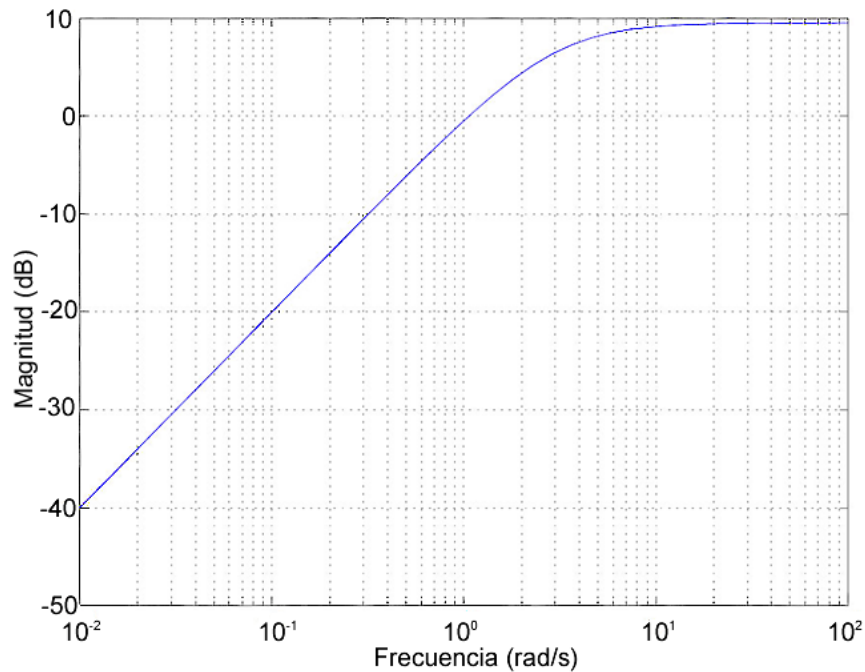
Un problema que presenta la acción de control derivativa es que resulta sensible a altas frecuencias, como se ve en la figura 3.4, amplificando las señales de ruido. Para evitarlo, la ganancia del controlador debe ser limitada modificando la acción de la siguiente manera:

$$\frac{U_D(s)}{E(s)} = \frac{KsT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} \quad (3.9)$$



**Figura 3.4.** Respuesta en frecuencia de un derivador

Este derivador tiene la ganancia limitada por  $N$  en altas frecuencias. El valor de  $N$  está entre 3 y 20. La figura 3.5, muestra la respuesta en frecuencia de un derivador con ganancia limitada.



**Figura 3.5.** Respuesta en frecuencia de un derivador con ganancia limitada.

### 3.1.2 Modificación de la Acción Proporcional

Se hace necesaria una modificación de la acción proporcional debido a un esfuerzo excesivo de control en la derivada de la señal de referencia, además es conveniente introducir un término  $b$  en la señal de referencia como parte de la acción proporcional, de modo que la acción proporcional se puede expresar como:

$$U_p(s) = K(bSP(s) - Y(s)) \quad (3.10)$$

Esta es una manera de separar la respuesta de la señal de referencia de la respuesta a disturbios. También se puede ver como una manera de posicionar los ceros de lazo cerrado.

Del parámetro  $b$  se puede decir que tiene poca influencia en las cercanías del estado estable, de modo que la acción integral dominará. Ahora, si  $b=1$ , la acción proporcional es diferente de cero en estado estable.

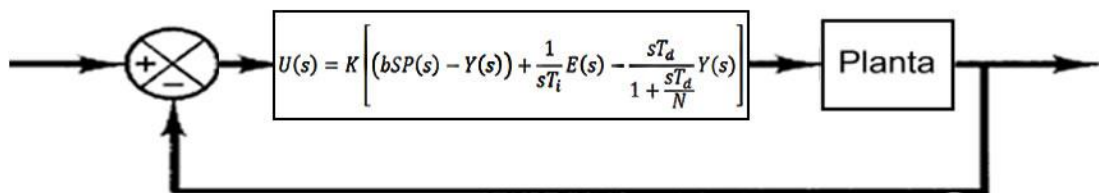
Después de hacer las respectivas modificaciones en la acción derivativa y proporcional, el controlador PID se describe así:

$$U(s) = K \left[ (bSP(s) - Y(s)) + \frac{1}{sT_i} E(s) - \frac{sT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} Y(s) \right] \quad (3.11)$$

Ahora, hacer el control de sistemas en tiempo continuo es muy costoso, por lo que se hizo necesaria una etapa de acondicionamiento para obtener un modelo con comportamiento similar en tiempo discreto. Esta etapa se conoce como *discretización* del controlador PID.

En el anexo D se muestra detalladamente la construcción del modelo en tiempo discreto utilizado en este trabajo, equivalente al controlador PID de la ecuación 3.11.

La figura 3.6 muestra el control PID de la planta (horno).



**Figura 3.6.** Control PID con modificaciones en las acciones proporcional y derivativa.

Se deben determinar los parámetros del controlador  $K$ ,  $T_d$  y  $T_i$  que cumplan las especificaciones del sistema de control en lazo cerrado, esto siempre y cuando se conozca el modelo matemático de la planta. Sin embargo, si la planta es algo compleja de modo que no sea fácil obtener su modelo matemático, no será posible desarrollar un enfoque analítico en el diseño del controlador. En este caso se deben realizar análisis experimentales para la *sintonización* del controlador PID de la planta. Se entiende por sintonización de controlador el proceso que determina los parámetros del controlador PID que cumplen con las especificaciones de la planta. Dentro de los más utilizados se encuentran las

reglas de Ziegler y Nichols, modelo de primer orden con retardo (via pade) y el *modelo de control interno IMC*, que fue el utilizado en el desarrollo de este trabajo y por el que se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{T_i}{K_H(\lambda+L)} \quad (3.12)$$

$$T_i = \tau + \frac{L^2}{2(\lambda+L)} \quad (3.13)$$

$$T_d = \frac{L^2}{2(\lambda+L)} \left[ 1 - \frac{L}{3T_i} \right] \quad (3.14)$$

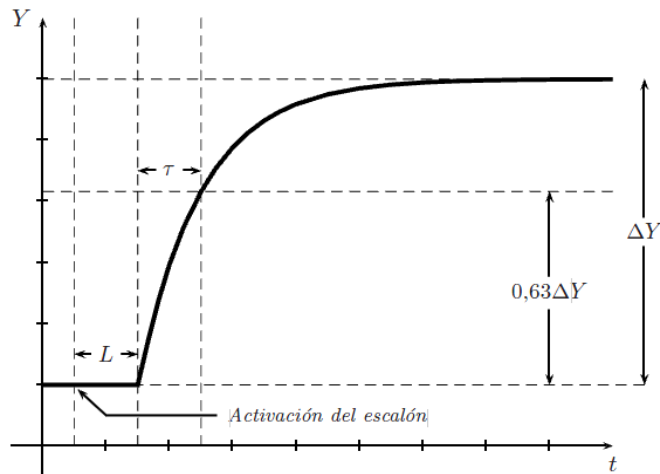
El desarrollo del modelo de control interno IMC se encuentra en el anexo C. Los valores de  $K_H$ ,  $L$  y  $\tau$  corresponden al modelo matemático del horno, que se describe en el siguiente apartado.

### 3.1.3 Descripción Matemática de la Planta (Horno)

Las propiedades dinámicas y estáticas de un horno (planta), pueden ser descritas de una manera aproximada por la siguiente función de transferencia:

$$G_H(s) \approx \frac{K_H e^{-sL_H}}{1+s\tau_H} \quad (3.15)$$

Donde  $K_H$  es la constante del sistema,  $L_H$  es el retardo del sistema, y  $\tau_H$  es la constante de tiempo del sistema. Los parámetros del horno (planta) son determinados caracterizándolo por medio de su respuesta ante una entrada escalón, obteniendo una grafica como se muestra en la figura 3.7 y determinando a partir de ella los valores de los parámetros de la planta  $L_H$ ,  $\tau_H$  y  $K_H$ , siendo que  $K_H$  se obtiene a partir del cociente entre  $\Delta Y$  y la diferencia de voltajes en la entrada escalón.



**Figura 3.7.** Caracterización de la planta (horno), °C vs s, obtenida para determinar los parámetros de interés  $L_H$ ,  $\tau_H$  y  $K_H$ .

### 3.2 Resultados del sistema de control

A continuación se presentan los diferentes resultados requeridos por el sistema de control, obtenidos específicamente para el ATD-YECOQ1.

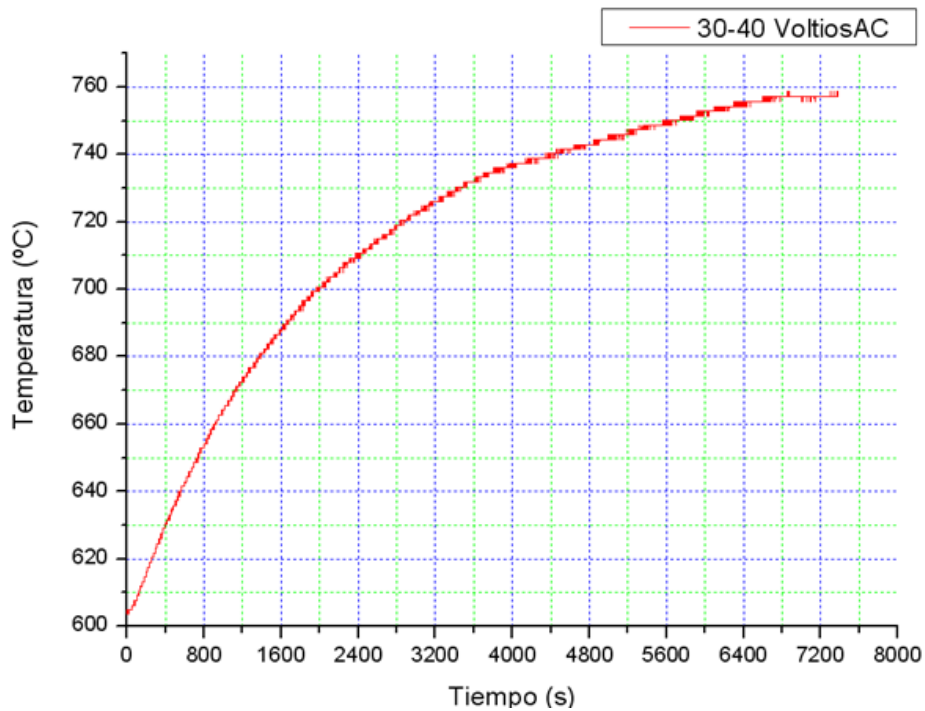
#### 3.2.1 Caracterización del horno.

Como se mencionó en la descripción matemática de la planta, la caracterización se realizó mediante la respuesta del horno ante una entrada escalón de voltios AC, registrándose una salida en grados centígrados, obteniéndose la curva experimental de la figura 3.8. Los valores de voltaje y temperatura de la respuesta ante la entrada escalón se registran en la tabla 3.1. Las condiciones iniciales se refieren al estado estable antes de la entrada escalón, mientras que las finales se refieren a las condiciones estables alcanzadas después de la entrada escalón.

**Tabla 3.1.** Condiciones iniciales y finales de la señal de entrada escalón al horno.

Condiciones	Voltaje AC	Temperatura °C
iniciales	30	603.52
finales	40	757.09





**Figura 3.8.** Respuesta del horno ante una entrada escalón de 30 a 40 Voltios AC.

La determinación de los valores de  $L_H$  y  $\tau_H$  se hizo a partir de la Figura 3.8, como se indicó en el apartado anterior, y el valor de  $K_H$  se calculó de la razón entre la diferencia del valor de las condiciones iniciales y finales de voltaje y temperatura respectivamente. Estos valores se consignaron en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Caracterización del horno.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Tiempo de respuesta	$\tau_H$	1972	s
Tiempo muerto	$L_H$	45	s
Constante del Horno	$K_H$	15.36	°C/V

Con estos parámetros se puede escribir el modelo matemático del horno así:

$$G(s) = \frac{15.36 e^{-45s}}{1972s+1} \quad (3.16)$$

### 3.2.2 Parámetros del controlador PID.

Teniendo la descripción matemática se pueden conocer los parámetros del controlador aplicando la sintonización por modelo de control interno, es decir reemplazando los valores de  $L_H$ ,  $\tau_H$  y  $K_H$  y considerando  $\lambda=0.5$  en las ecuaciones 3.12, 3.13 y 3.14. Los valores de los parámetros calculados para el controlador PID se encuentran consignados en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Parámetros del controlador.

Parámetro	símbolo	Valor calculado	unidades
Tiempo integral	$T_i$	1994.25	s
Tiempo derivativo	$T_d$	22.08	s
Constante del controlador	$K$	2.72	V/°C

Llevando a la ecuación 3.11 los valores de la tabla 3.3 y haciendo  $b=1$  y  $N=3$ , el controlador puede ser escrito de la siguiente manera:

$$U(s) = 2.72 \left[ (SP(s) - Y(s)) + \frac{1}{1994.25 \text{ s}} E(s) - \frac{22.08 \text{ s}}{1 + \frac{22.08 \text{ s}}{3}} Y(s) \right] \quad (3.17)$$

### 3.2.3 Simulación.

Teniendo los parámetros de la planta y el controlador, se hace posible realizar la simulación que describa el posible comportamiento del proceso ante los requerimientos de un operario. Hay que aclarar que en la simulación se utilizó el modelo discretizado. La simulación se realizó con la herramienta *Simulink* de *MatLab*. El diagrama de bloques simulado se encuentra en la figura 3.9.

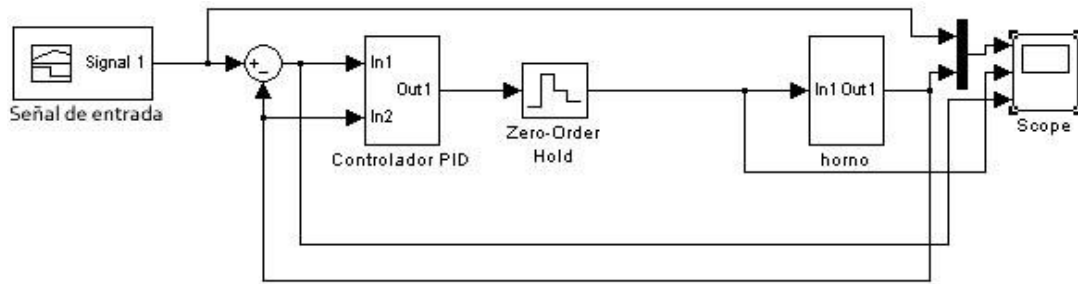


Figura 3.9. Diagrama de bloques para la simulación

En la figura 3.10 se observan los diagramas del controlador PID y del horno.

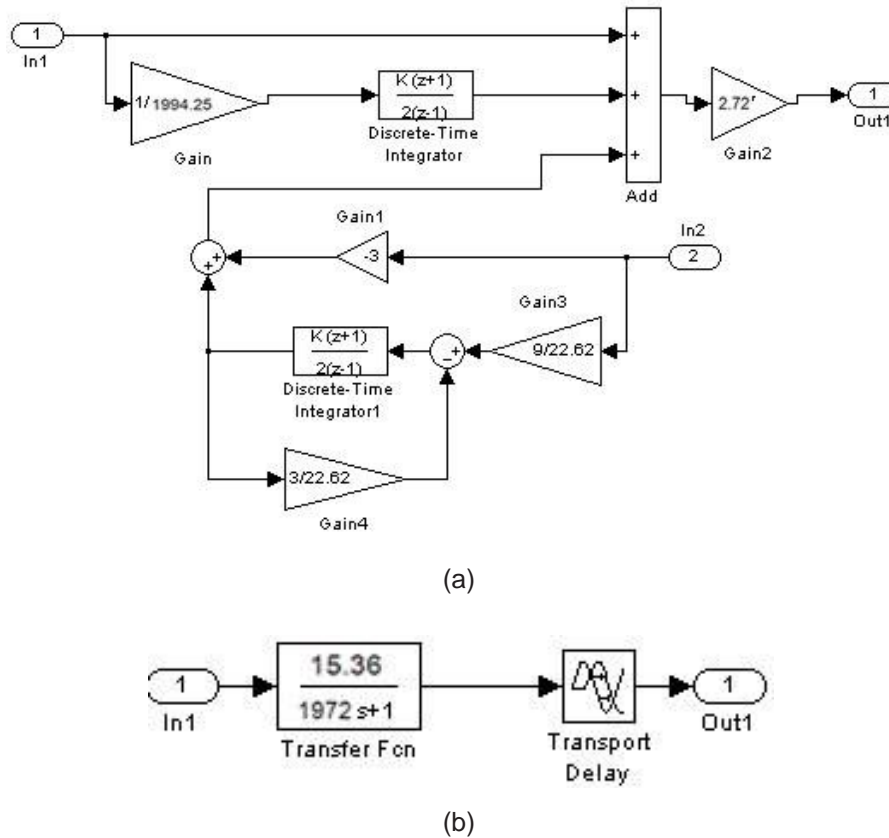
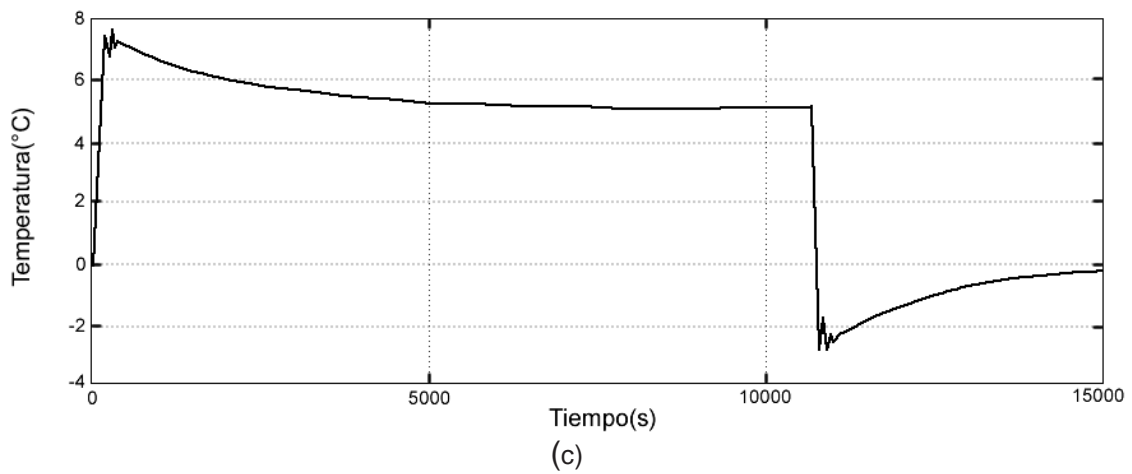
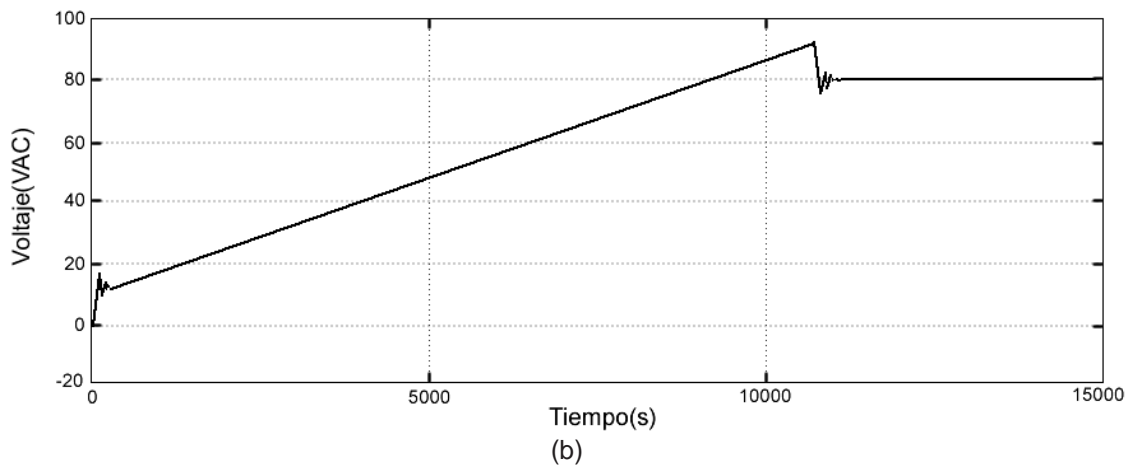
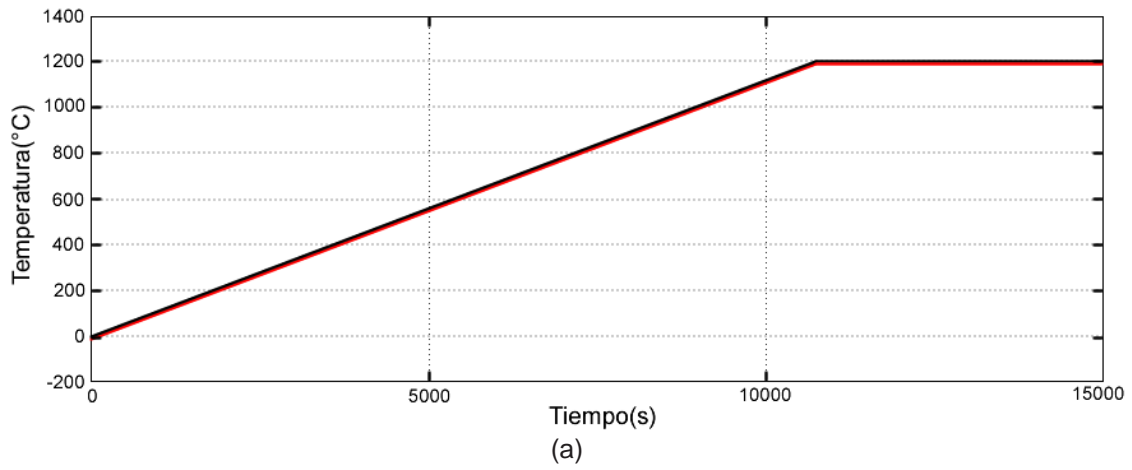


Figura 3.10. (a)Diagrama de bloques del controlador, (d) Diagrama de bloques del horno

En la simulación se utilizó un tiempo de muestreo  $h=1s$ , los resultados de la simulación se muestran en la figura 3.11.



**Figura 3.11.** Simulación del proceso de control (a) Relación entrada salida, (b) Acción de control, (c) Señal del error

La figura 3.11(a) muestra el posible comportamiento, en temperatura, de la salida respecto a la señal de referencia en la entrada. La línea morada le hace un seguimiento permanente a la señal de referencia (amarilla), lo cual se confirma en la figura (c), donde el máximo valor en el error sería de  $8^{\circ}\text{C}$ , que disminuye en el tiempo mientras avanza el proceso. La figura (b) hace referencia a la acción de control que se ejecuta sobre el horno, para que la salida haga el seguimiento permanente a la referencia.

La implementación del controlador PID se explica en el capítulo IV, donde se hará referencia a los dispositivos y metodología seguida.

**CAPÍTULO IV:**  
**IMPLEMENTACIÓN DEL ATD-YECOQ1:**  
**CONTROL DE TEMPERATURA**

En este capítulo se describe la implementación del controlador de temperatura del ATD-YECOQ1. Se presenta cada uno de los componentes empleados, el montaje realizado y los pasos seguidos en la implementación del controlador de temperatura.

#### **4.1. Componentes.**

Los principales componentes utilizados en la implementación del proceso de control se enuncian a continuación y se describen a seguir.

**Microcontrolador PIC18F452**  
**Compensador de junta fría AD595 de ANALOG DEVICES**  
**MAX232**  
**Optoacoplador MOC3022**  
**Triac BTA40 600B**  
**Computador**

##### **4.1.1. Microcontrolador PIC18F452.**

Dispositivo integrado programable fabricado por *Microchip* que se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada. Debido a su reducido tamaño suele ir incorporado en el dispositivo a controlar (controlador embebido).

Sus líneas de entrada y salida soportan la conexión de sensores y actuadores de dispositivos a controlar y todos los recursos complementarios disponibles tienen como única prioridad atender los requerimientos del programador.

Su arquitectura interna está provista de:

**Procesador**  
**Memoria no volátil (para contener el programa)**  
**Memoria de lectura y escritura**  
**Líneas de entrada-salida (control de periféricos)**  
**Protocolos de comunicación (USART, I<sup>2</sup>C)**

También posee recursos auxiliares tales como:

- Conversión AD de 10 bits de resolución**
- Modulo USART**
- Modulo I<sup>2</sup>C**
- Timers (Timer0, Timer1, Timer2, Timer3)**
- Dos módulos PWM**
- Puertos digitales de entrada y/o salida.**
- Interrupciones**
- Estado de reposo o de bajo consumo**

Un esquema general del Microcontrolador PIC18F452 se muestra en la figura 4.1

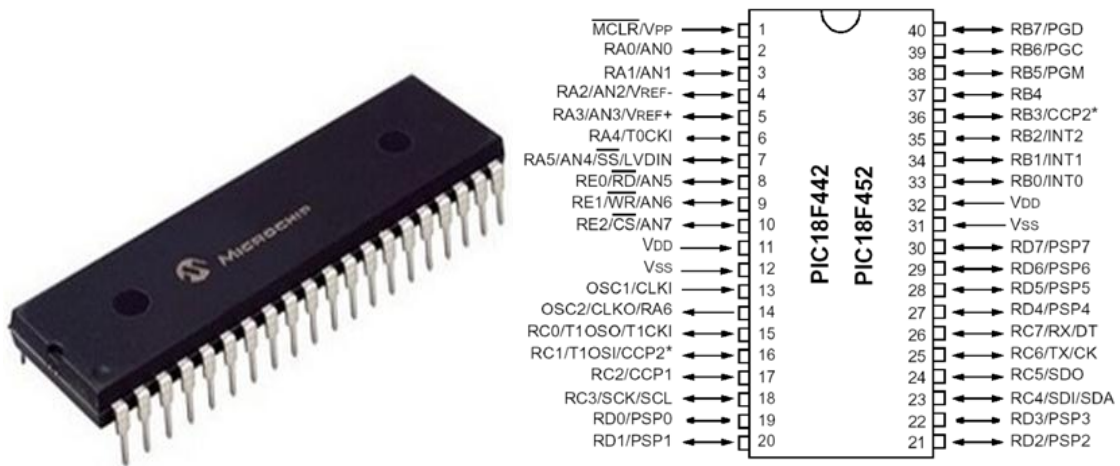
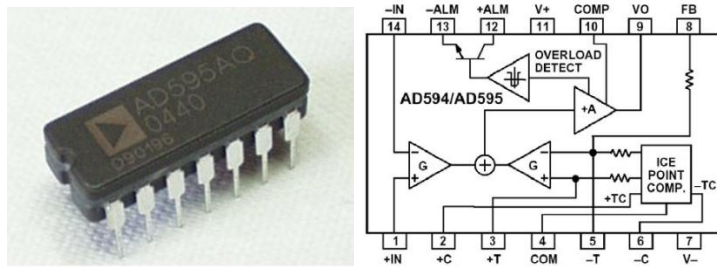


Figura 4.1. Microcontrolador PIC18F452 [5]

Como se señaló en el capítulo II, la señal que proviene de la termocupla tiene niveles de voltajes demasiado bajos, lo que hace necesaria una etapa de acondicionamiento y amplificación. Para tal fin se utilizó el circuito compensador AD595 de ANALOG DEVICES que se describe a continuación.

#### 4.1.2. Compensador de junta fría AD595 de ANALOG DEVICES



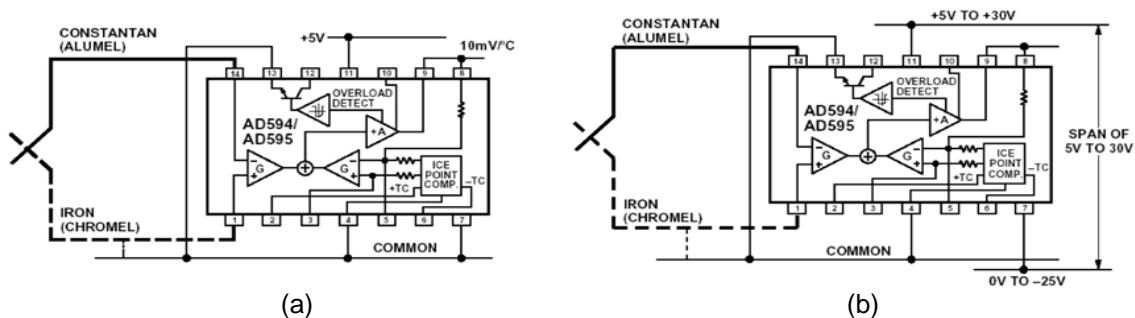


**Figura 4.2.** AD595 de ANALOG DEVICES

El AD595 es un amplificador de instrumentación y un compensador de junta fría para termocuplas, embebidos en un chip. El amplificador está precalibrado para dar una salida de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  directamente desde la señal de la termocupla. Puede ser usado como un amplificador lineal o como controlador de set point.

El AD595 es alimentado por una fuente simple o por una fuente dual, en cuyo caso pueden medirse temperaturas por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$ . El AD594 es precalibrado para termocuplas tipo *J*, mientras que el AD595 es precalibrado para termocuplas tipo *K*.

La figura 4.3 muestra cómo debe conectarse el AD595. En 4.3a se describe la conexión para una fuente simple de  $+5\text{VDC}$  que provee un rango de medición de temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$ . En 4.3b se muestra una conexión para una fuente dual, lo que incrementa el rango de las mediciones. Si el rango de voltaje positivo se incrementa de  $5\text{V}$  a  $15\text{V}$  se pueden obtener medidas de temperatura hasta  $1250^{\circ}\text{C}$  para termocuplas tipo *K* usando el AD595.



**Figura 4.3.** Conexión del AD595. (a) por una fuente simple (b) por una fuente dual

### 4.1.3. MAX232

El MAX232 es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL y viceversa. Lo interesante de este dispositivo es que sólo necesita una alimentación de 5VDC, ya que genera internamente algunas tensiones que son necesarias para el estándar RS232 [6].

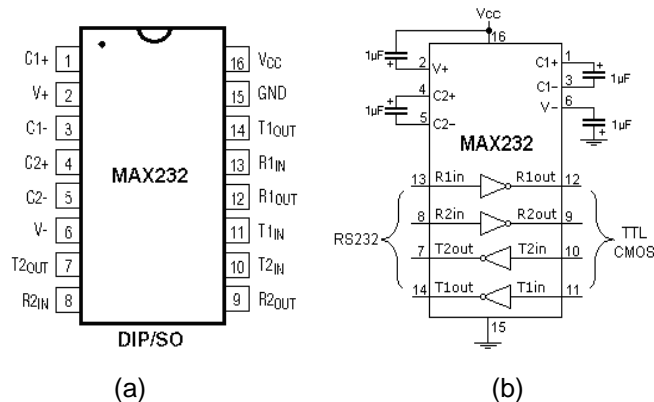


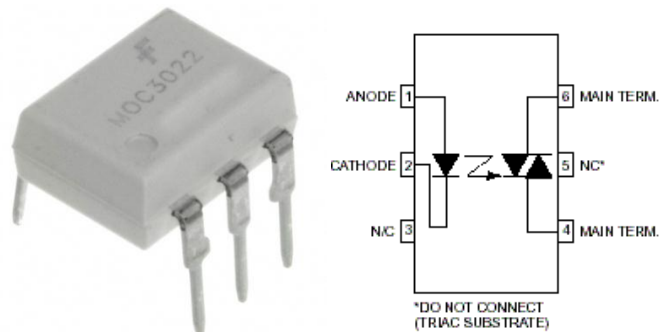
Figura 4.4. (a)MAX232 (b) Conexión MAX232 [6]

El MAX232 sirve para comunicar el puerto serie de un PC con cualquier otro circuito, con funcionamiento en base a señales de nivel TTL/CMOS. Este circuito integrado posee dos convertidores de nivel TTL a RS232 y otros dos que, a la inversa, convierten de RS232 a TTL. Estos convertidores son suficientes para manejar las cuatro señales más utilizadas del puerto serie del PC, que son TX (señal de transmisión de datos), RX (de recepción de datos), RTS y CTS (para establecer el protocolo de envío y recepción de los datos).

### 4.1.4. Optoacoplador MOC3022

El MOC3022 es un optoacoplador con Triac de baja corriente de mantenimiento, no superior a 10mA. Su principal función es separar los circuitos de baja potencia de los de alta potencia, de forma tal que se proteja la parte circuital de una aplicación específica. Este elemento lleva incorporado un diodo infrarrojo de GaAs, el cual, cuando le llega el impulso de corriente hace que se

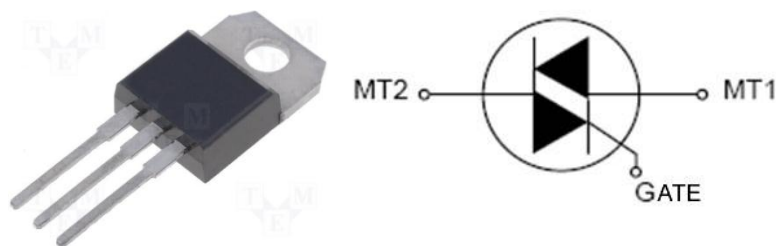
active el interruptor bilateral de silicio (o Triac). El Triac entra en funcionamiento con un corte y conduce, permitiendo así realizar el control de la etapa de potencia. Estos elementos son comúnmente utilizados para activar el disparo de un Triac que controle cargas de resistencias y de inductancias. Comúnmente son utilizados en la industria para diferentes aplicaciones que requieran el uso de corriente alterna [7].



**Figura 4.5.** Esquemático y encapsulado del Optoacoplador Moc3022 [7].

#### 4.1.5. Triac BTA40 600B

Este dispositivo maneja rangos de corriente de 0.8 a 40 A, voltajes que van desde los 200VAC a los 1000VAC, potencia de disipación de 1w y su corriente de compuerta es de 50 mA. Este elemento funciona como compuerta de bloqueo u obstrucción de conducciones para una u otra polarización de voltaje utilizando corriente alterna, por lo tanto permite control de fase para diferentes aplicaciones como velocidad de un motor, temperatura de una planta, modulación de señales, alumbrado y conmutación estática Relays [8].



**Figura 4.6.** Esquemático y encapsulado del Triac BTA40600B [8].

## 4.2. Montaje

En el presente trabajo se siguió el montaje que se muestra en la figura 4.7, donde se resaltan los circuitos de la termocupla, del actuador, del cruce por cero, de comunicación serial con el PC y el correspondiente a los microcontroladores. A continuación se dará una explicación detallada de cada uno de estos circuitos.

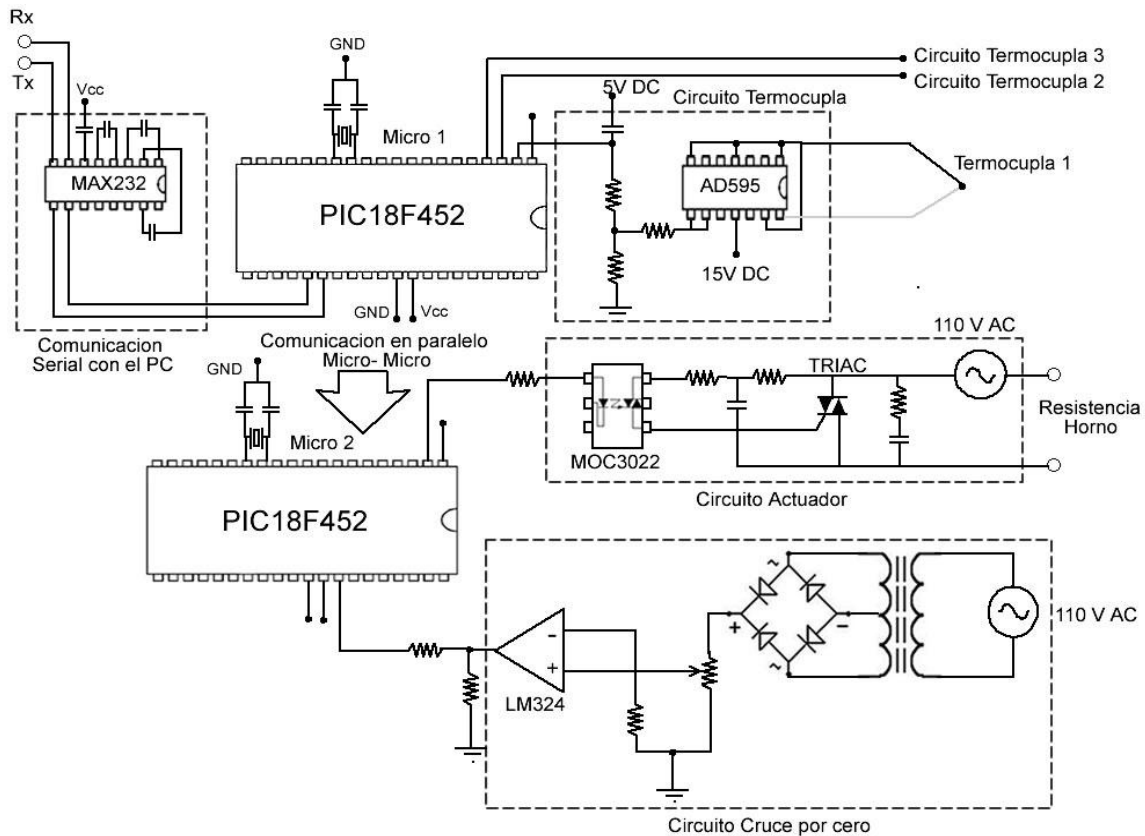


Figura 4.7. Montaje circuital del ATD-YECOQ1

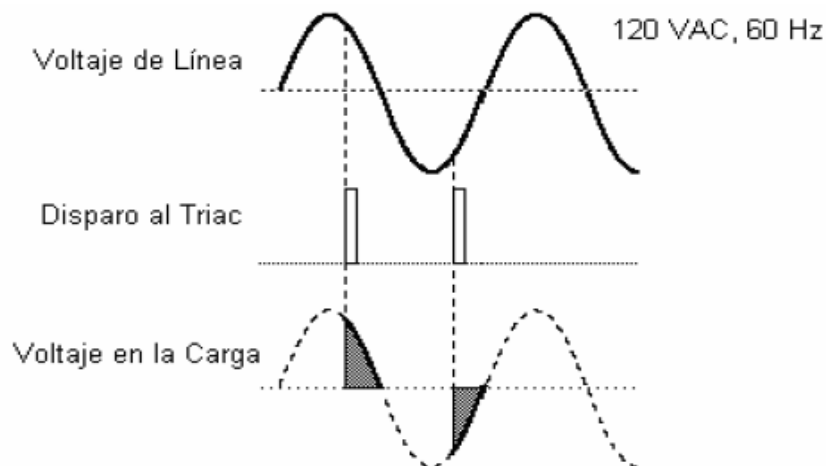
### 4.2.1. Circuito del actuador.

Este circuito está compuesto principalmente por el octoacoplador, el Triac y la carga (resistencias del horno). Tiene como función controlar la potencia que se suministra a la resistencia del horno para controlar la temperatura en el mismo. Como ya se dijo en apartados anteriores, el octoacoplador cumple la función de

aislar el circuito de baja potencia de la de alta. El componente más importante de este circuito es el TRIAC, por lo que se centró el mayor interés en su funcionamiento.

El TRIAC es un dispositivo que, al aplicarle un pulso en la compuerta Gate, entra en un estado de conducción hasta que el voltaje caiga a cero de nuevo, es decir, cuando el voltaje en el MT2 es más positivo con respecto a MT1. Se debe mantener un mínimo de corriente para que el TRIAC siga conduciendo (ver Figura 4.6).

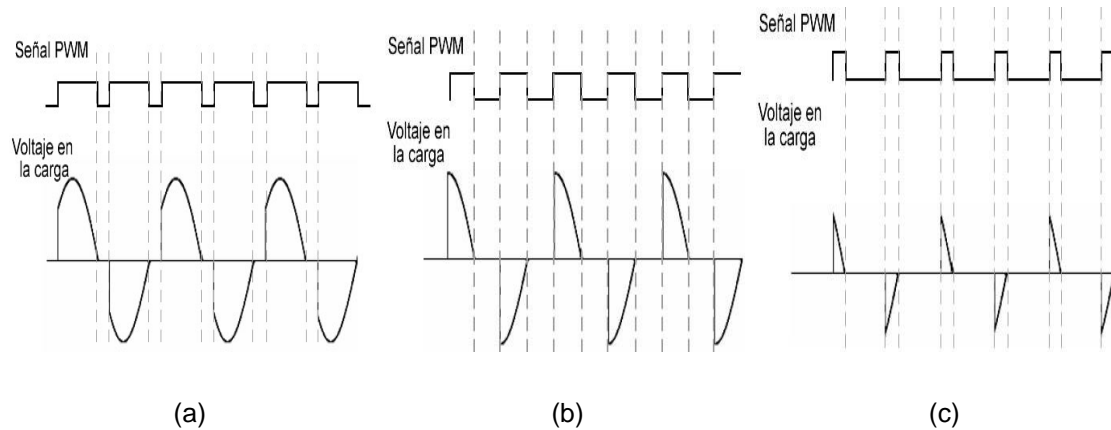
Para poder generar el voltaje de carga deseado, es necesario controlar el ángulo de disparo del TRIAC por medio de una señal PWM que se encuentre sincronizada con la señal de la línea AC (110VAC, 60 Hz), de esta manera se puede controlar el disparo y el ángulo de fase de la señal que se quiere aplicar a la carga. (Figura 4.8)



**Figura 4.8.** Control de voltaje de una carga de AC

Como se observa en la figura 4.8, cuando ocurre un disparo en el TRIAC comienza a conducir hasta que la señal cruza por el cero y cuando se vuelve a disparar el TRIAC comienza a conducir de nuevo hasta que cruza por cero. Por este motivo es necesario sincronizar la señal de la línea con la señal PWM que se va a generar para el disparo del TRIAC, tal como se observa en la figura 4.9.

Para hacer esta sincronización es necesario montar un circuito detector de cruces por cero para saber el momento de disparo y posibilitar la conducción en el TRIAC.



**Figura 4.9.** Voltaje en la carga (a) potencia máxima (b) potencia media (c) Potencia mínima

La figura 4.9a muestra un voltaje en la carga cuando el TRIAC se dispara unos pocos milisegundos después de detectado el cruce por cero. La figura 4.9b indica un voltaje en la carga cuando el TRIAC se dispara a la mitad del cruce por cero y la figura 4.9c cuando el disparo del TRIAC ocurre pocos milisegundos antes del cruce por cero de la señal.

Para poder generar una señal PWM que dispare al TRIAC de forma que se controle el voltaje entregado a la carga, es necesario diseñar un circuito que detecte los cruces por cero de la señal de la línea AC.

#### 4.2.2. Circuito detector de cruce por cero.

Para poder detectar el cruce por cero de la señal de la línea AC, se montó el circuito que se muestra en la figura 4.10, que consta de un transformador que

reduce la señal de 110 VAC a 12 VAC, señal que se rectifica utilizando un puente de diodos, para posteriormente ser llevada a un amplificador operacional que cumple la función de comparador entre la señal y un voltaje próximo a 0VDC, voltaje que es generado por un potenciómetro. Así, cuando la señal de 12 VAC sea menor que el valor en el potenciómetro, el amplificador operacional producirá un pulso que se repetirá cada que la señal de 12 VAC sea menor; esta señal de pulsos se conoce como cruce por ceros y es la encargada de manejar la señal de PWM con ayuda de un Microcontrolador [9].

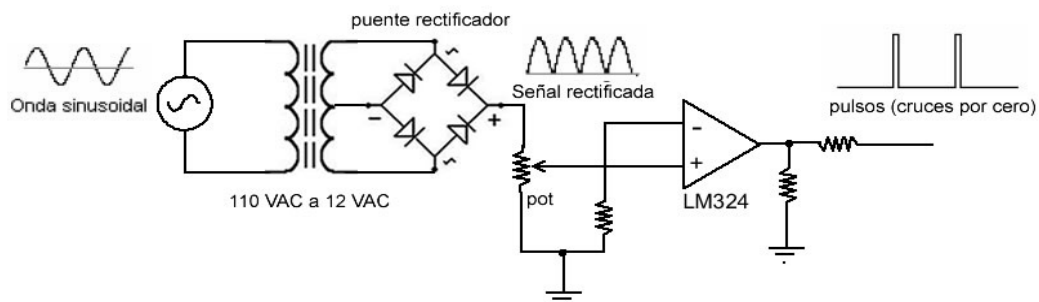


Figura 4.10. Circuito detector de cruces por cero

### 4.2.3. Señal PWM

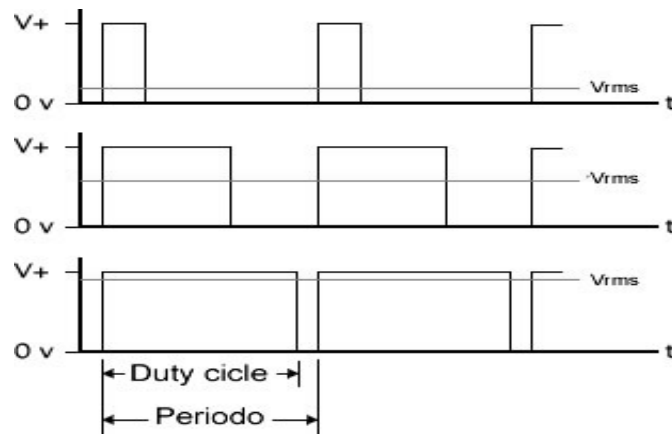


Figura 4.11. Señal PWM

La modulación por ancho de pulsos (conocida como PWM *pulse-width modulation*) de una señal, es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal) para controlar el voltaje de una

carga. Esta señal se caracteriza por tener un periodo establecido, el cual se divide en dos Zonas, una alta (*Duty Cycle*) y una baja (ver figura 4.11). La variación controlada del ancho del *Duty Cycle* dentro del intervalo del periodo es lo que permite controlar el voltaje que se suministra a la carga.

Para poder generar el voltaje deseado en la carga es necesario controlar el disparo del TRIAC en el momento adecuado. Teniendo ya detectado los cruces por cero es posible generar la señal PWM utilizando un microcontrolador PIC18F452. Aunque este Microcontrolador cuenta con un módulo capaz de generar una señal PWM, no se utilizó debido a que no es capaz de generar un PWM con una frecuencia del orden de la señal de la línea, que se caracteriza por tener una frecuencia de 60Hz y de semiciclo de 120Hz, y como se tiene que disparar el TRIAC tanto para el semiciclo positivo y negativo es necesario generar una señal PWM con una frecuencia de 120Hz.

Para tal fin se utilizó el TIMER0 como temporizador y la interrupción externa del pin RB0/INT del microcontrolador. El procedimiento utilizado fue el siguiente:

**Se calcula el tiempo en alto, equivalente al Duty cycle.**

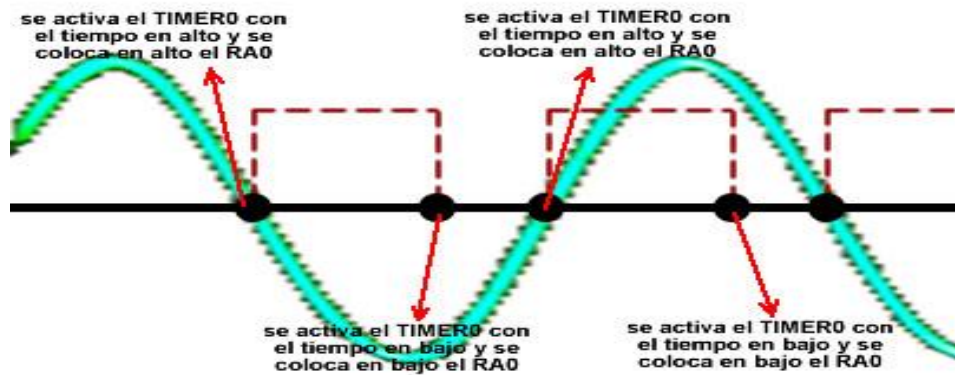
**Se calcula el tiempo en bajo, equivalente a la diferencia del periodo y el Duty cycle  
(*periodo – Duty cycle*)**

**Se activa el temporizador del TIMER0 con el valor de tiempo en alto y se coloca en alto el pin RA0.**

**Cuando se desborda el TIMER0, se clarea y se activa nuevamente pero con el valor del tiempo en bajo y se coloca en bajo el pin RA0.**

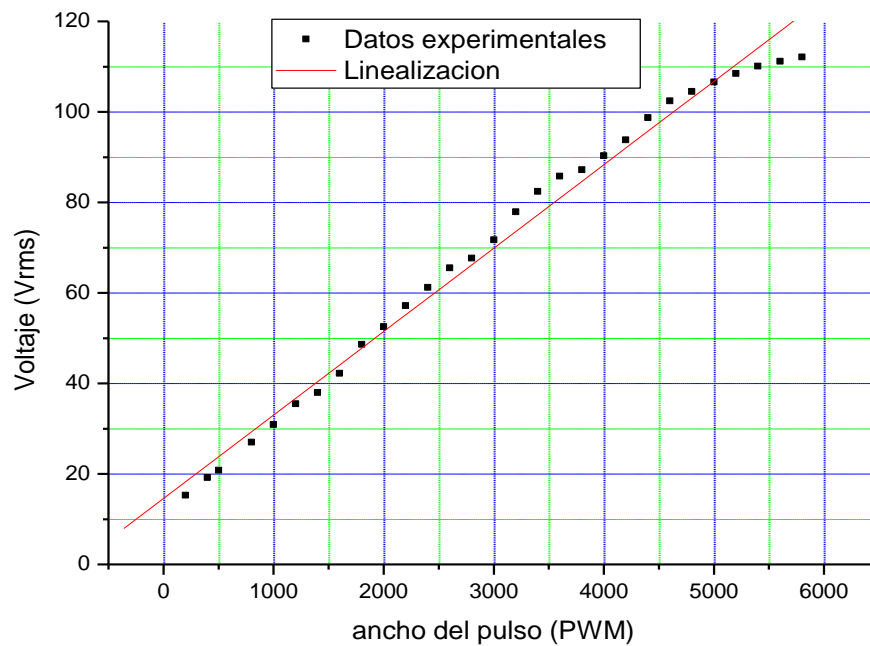
Este proceso se repite cada que se activa la interrupción en el pin RB0/INT (cada cruce por cero), también se debe tener en cuenta que la señal va tener una frecuencia de 120 Hz, es decir un periodo de 8.33 milisegundos. (ver figura 4.12.)





**Figura 4.12.** Forma en que debe general la señal PWM.

Se realizó una variación en el ancho de pulso de la señal PWM con el objetivo de hacer la medición del voltaje en la carga. Los resultados se presentan en la figura 4.13.



**Figura 4.13.** Variación del voltaje en la carga versus el ancho del pulso de la señal PWM

Se hizo una linealización de los datos para determinar la acción ejercida por el controlador PID sobre la planta por medio del circuito actuador.

#### 4.2.4. Circuito de acondicionamiento de la termocupla.

Este circuito está compuesto principalmente por el compensador de junta fría AD595 de ANALOG DEVICES, diseñado y precalibrado para termocuplas tipo K. Este circuito es alimentado por una fuente de voltaje de 15 VDC para garantizar un rango de operación entre los 0°C y los 1250°C, tal como se indicó en el apartado 4.1.2. Fue necesario hacer un divisor de voltaje a la salida para garantizar que el voltaje que se entregara al microcontrolador no excediera los 5 VDC. Se montó también un filtro RC en la salida para limpiar la señal de posibles ruidos.

La señal proveniente de este circuito es análoga y maneja niveles de voltaje entre los 0 VDC a 5 VDC, señal que es tratada por el conversor análogo digital del que está provisto el microcontrolador. En este microcontrolador se hizo un filtro digital y se desarrollaron las operaciones requeridas para la adquisición de datos referentes a la temperatura de la planta.

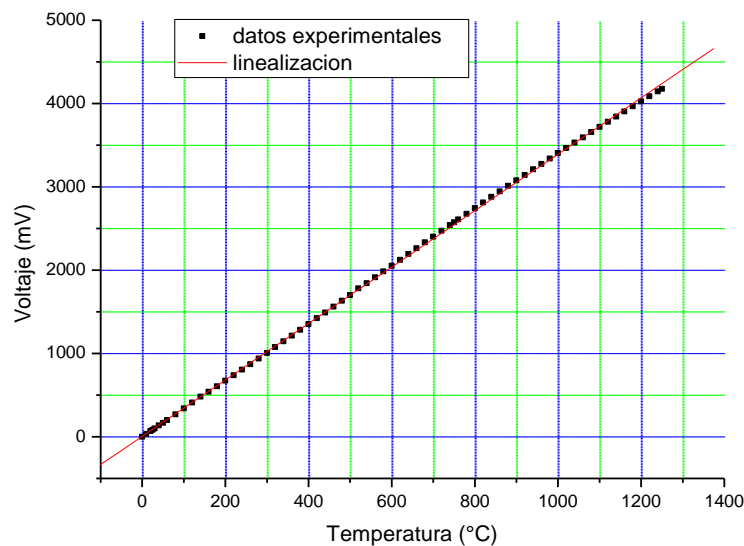


Figura 4.14. Caracterización termocupla utilizada en el control de temperatura

La figura 4.14 muestra la caracterización de la termocupla utilizada para el control de temperatura (voltaje vs. temperatura), cuya linealización fue utilizada en el tratamiento de los datos requeridos en el controlador de temperatura.

#### **4.2.5. Microcontroladores.**

En este diseño se utilizaron dos microcontroladores para desarrollar tareas específicas del ATD-YECOQ1.

##### **Microcontrolador 1**

Este microcontrolador es el encargado de realizar la conversión análoga-digital de las señales de las tres termocuplas (control de temperatura, muestra de referencia y muestra problema), señales que fueron tratadas por un filtro digital de media móvil (*Moving Average*) cuya fórmula recursiva es [10].

$$y(n) = \left(1 - \frac{1}{N}\right)y(n-1) + \frac{x(n)}{N} \quad (4.1)$$

En el microcontrolador se implementó el controlador PI discretizado con condicionales, cuya señal de control se transmite al microcontrolador 2 utilizando el PORTB0-3 y el PORTD0-7, teniendo en cuenta que la señal de control tuvo que ser pasada de decimal a binario para poder manejar la comunicación entre microcontroladores de forma paralela (PIN a PIN, bits a bits guardando una correspondencia). Además, se utilizó su módulo USART para establecer la comunicación serial con el computador, al cual se le transmiten los datos relacionados con la temperatura del horno, temperatura de la muestra de referencia y la temperatura de la muestra problema, teniendo en cuenta que cada variable tiene un etiquetado para que sea reconocida en el computador. La adaptación de niveles de voltaje para la comunicación serial se realizó utilizando el MAX232 como se indicó en el apartado 4.1.3.

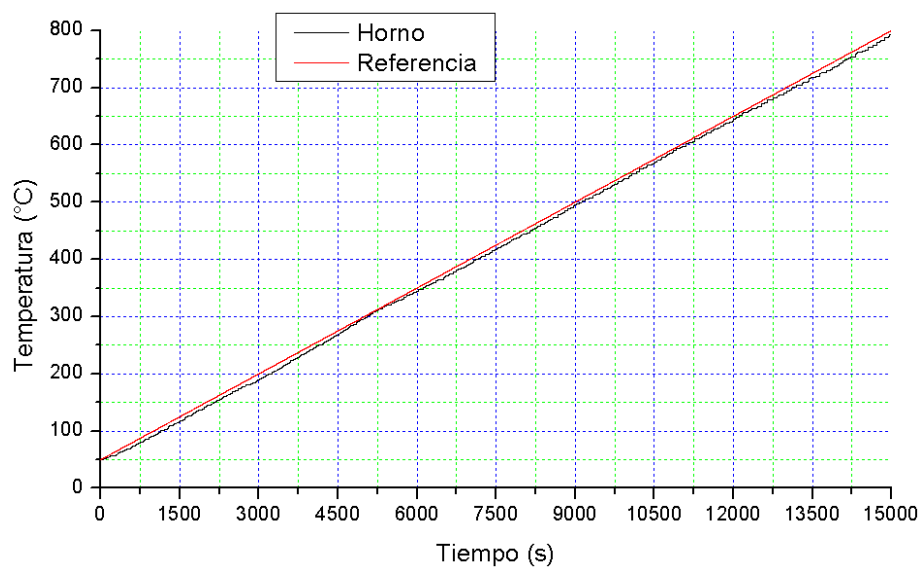
##### **Microcontrolador 2**

Este microcontrolador es el encargado de generar la señal PWM que llega al actuador.

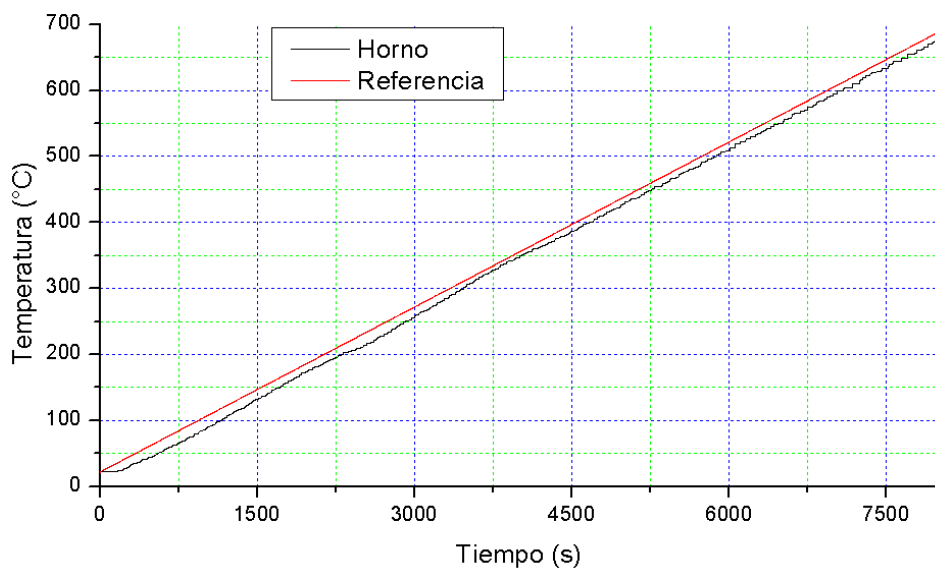
Para tal fin se tiene en cuenta el valor de la señal de control proveniente del microcontrolador 1 (o duty cycle). Con los cruces por cero que activan la interrupción externa RB0/INT puede ser generada la señal PWM utilizando el TIMER0 como temporizador (tal como se explicó en el apartado 4.2.3).

#### **4.3. Implementación controlador de temperatura.**

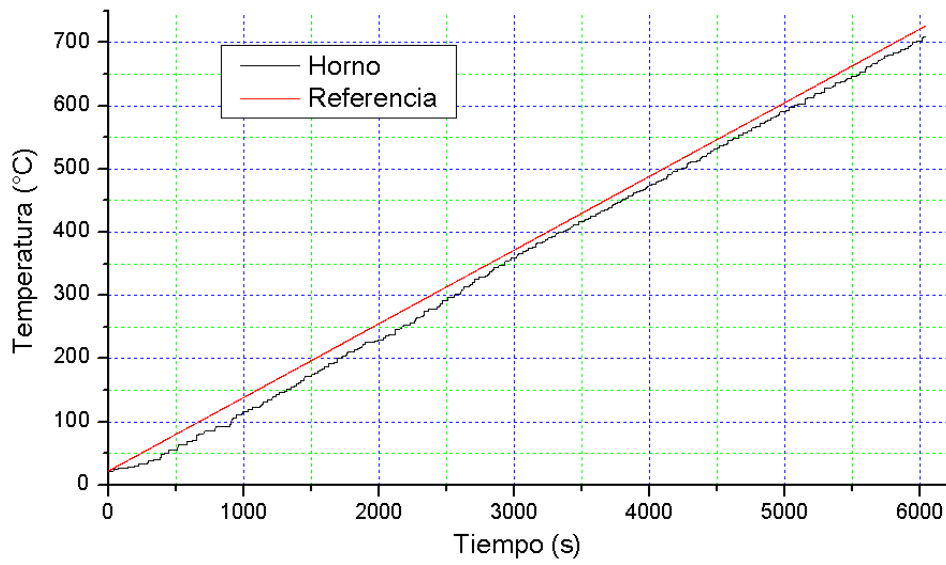
Después de realizada la caracterización del horno, de las termocupas y de determinar los parámetros tanto de la planta como del controlador, se procedió a hacer la implementación con el montaje expuesto en los apartados anteriores. Los resultados que se obtuvieron se muestran en la figura 4.15, para rampas de  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y  $7^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Las líneas rojas corresponden a la referencia mientras que las negras son las respuestas de la planta.



(a)



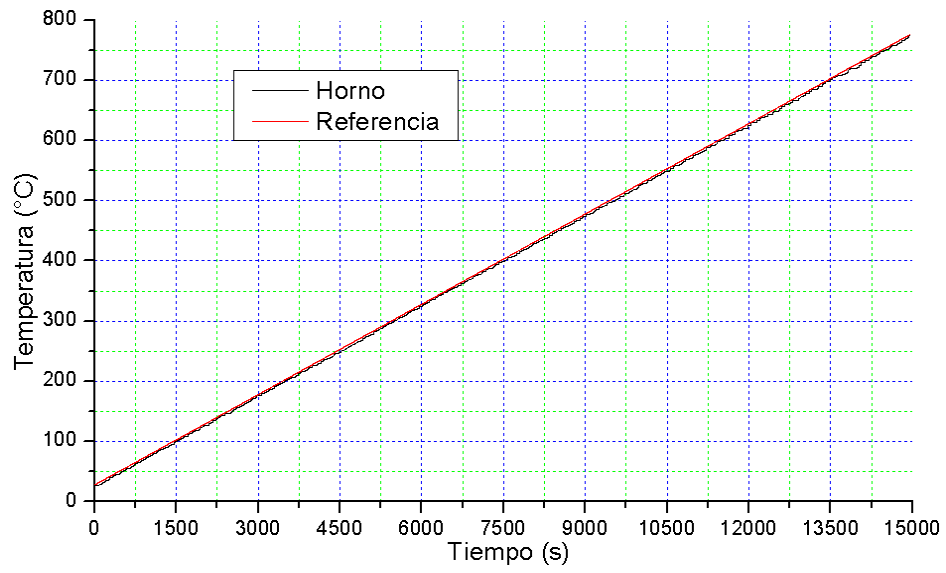
(b)



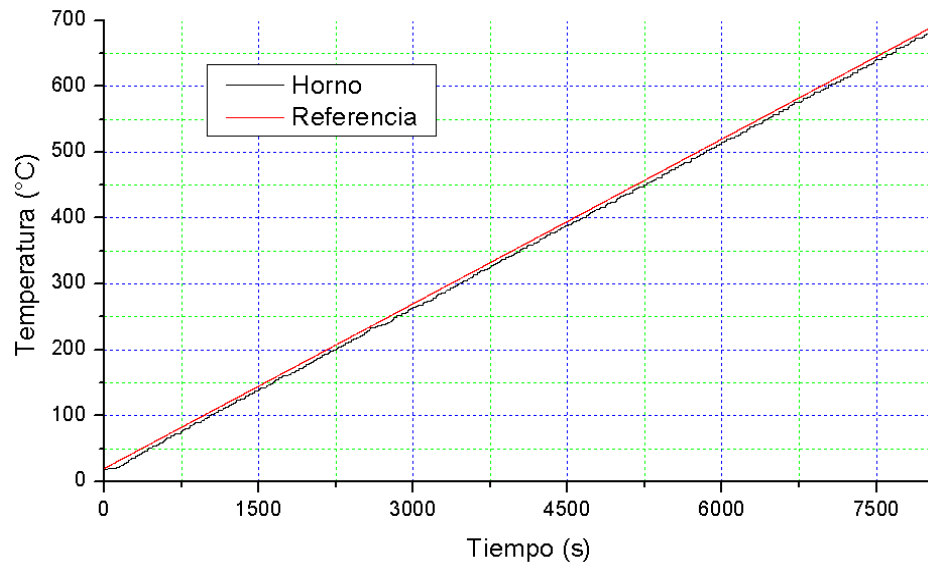
(c)

**Figura 4.15.** Implementación controlador PID. **(a)** Respuesta ante una rampa de 3°C/min **(b)** Respuesta ante una rampa de 5°C/min **(c)** Respuesta ante una rampa de 7°C/min

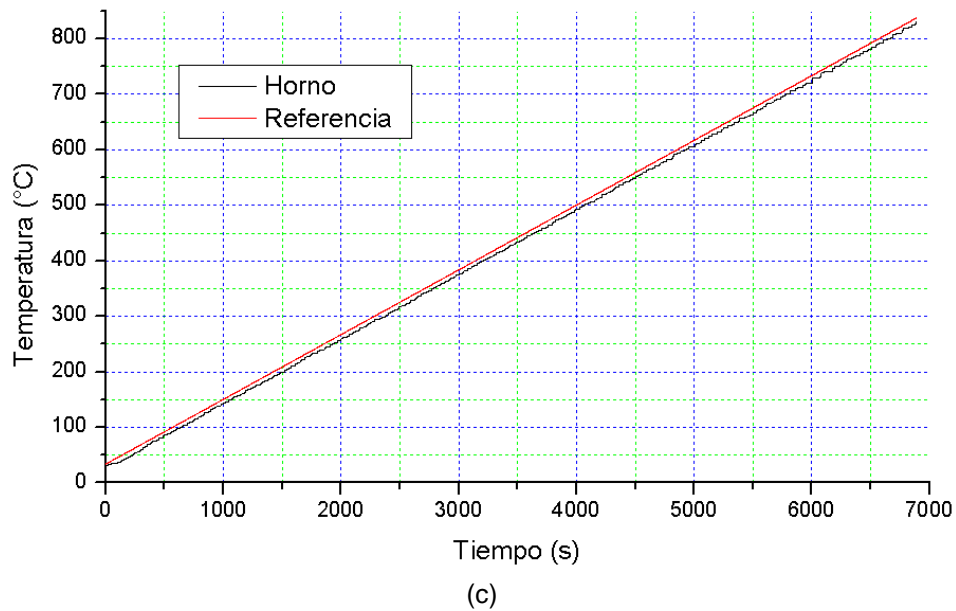
Los resultados que se muestran en la figura 4.15 presentan un error promedio para la rampa de 3°C/min de 8°C, para la rampa de 5°C/min de 12°C y para la rampa de 7°C/min de 15°C, lo que los hace no adecuados para un ATD. Para disminuir el error se hicieron modificaciones al controlador PID, encontrándose que la acción de control derivativa no funcionaba de manera adecuada pese a los intentos realizados, por lo que se decidió suprimir esta acción quedando un controlador PI. Con esta modificación se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 4.16, para rampas de 3°C/min, 5°C/min y 7°C/min.



(a)



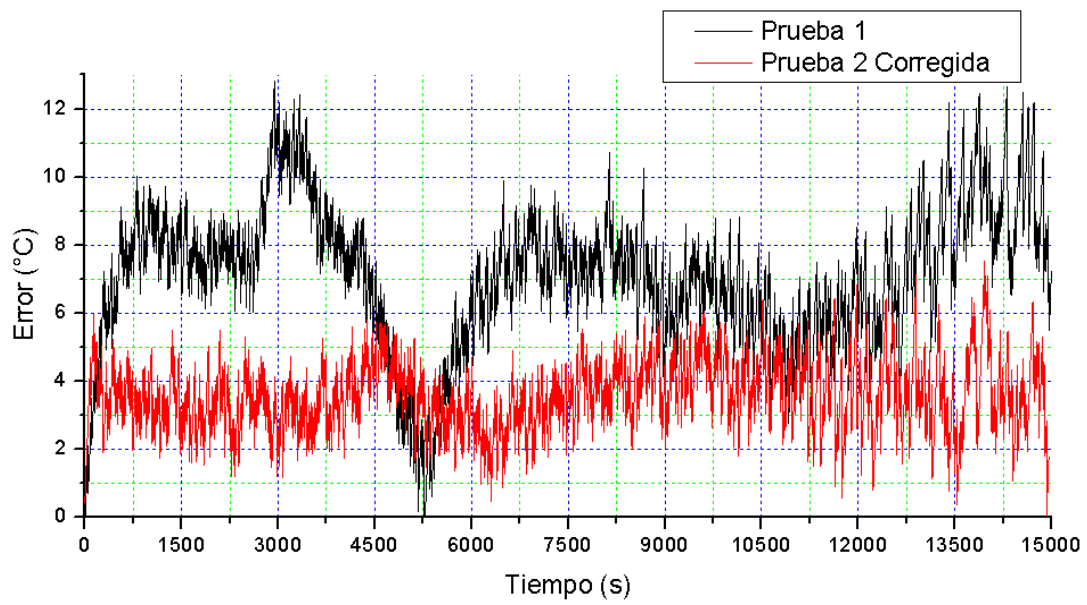
(b)



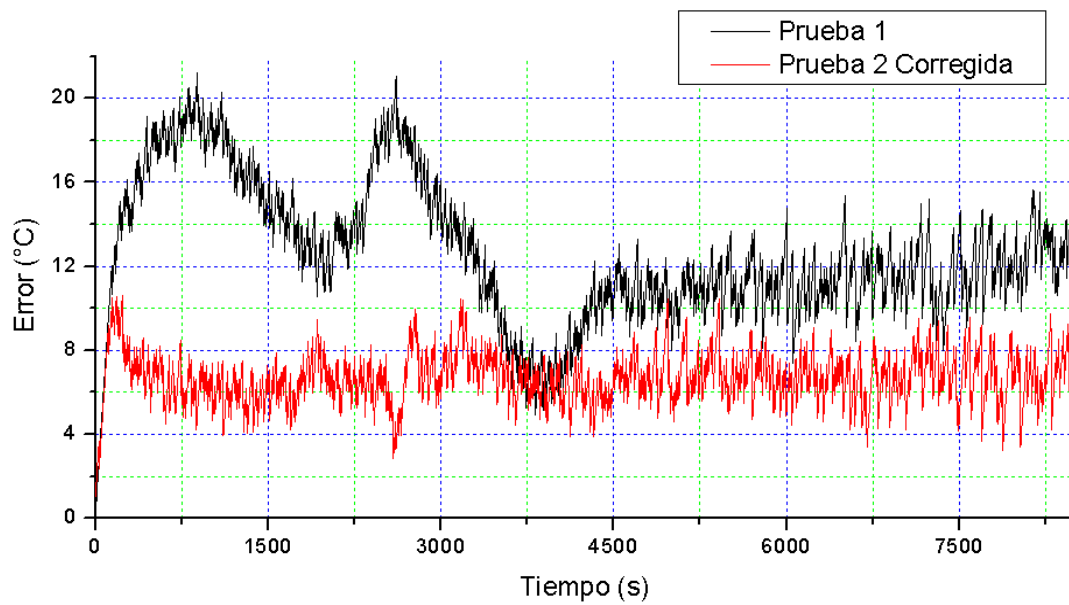
**Figura 4.16.** Respuesta del controlador PI (a) Rampa 3°C/min

(b) Rampa 3°C/min (c) Rampa 7°C/min

En la figura 4.17 se observa una comparación entre los errores en temperatura respecto a la referencia para el controlador PID (línea negra) y para el controlador PI (línea roja). En el resultado se ve una disminución en el error cuando se empleó el controlador PI para todas las rampas probadas, de donde se concluye que las modificaciones hechas en el controlador son adecuadas. El error promedio para la rampa de 3°C/min fue de 4°C, para la rampa de 5°C/min fue de 7°C y para la rampa de 7°C/min fue de 8°C.

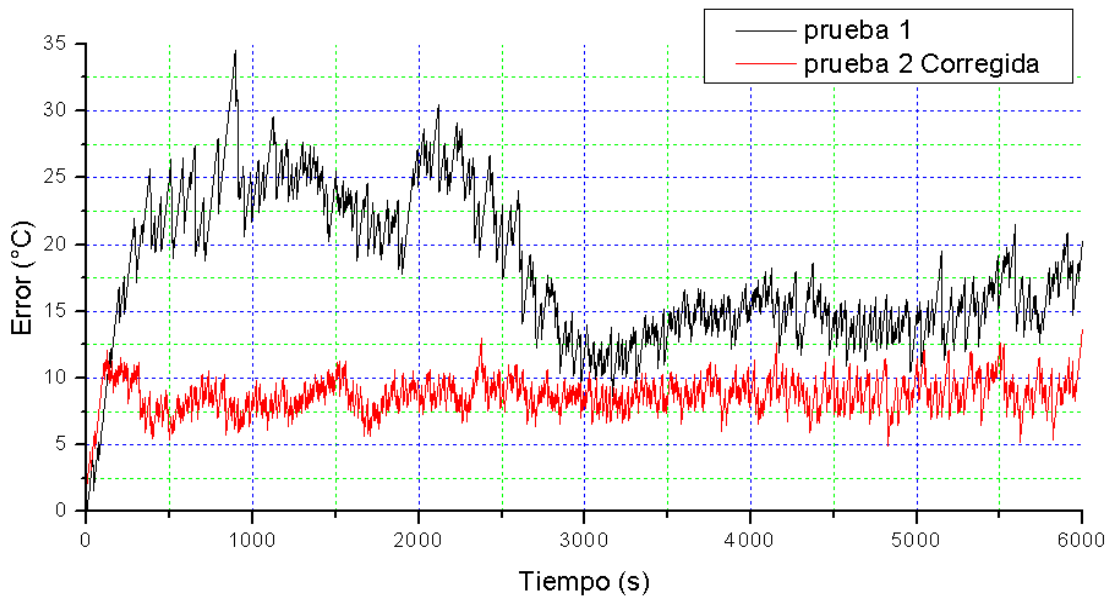


(a)



(b)





(c)

**Figura 4.17.** Comparación del error en la planta para el controlador PID línea negra y el controlador PI, línea roja **(a)** Error en la rampa de 3°C/min **(b)** Error en la rampa de 5°C/min **(c)** Error en la rampa de 7°C/min

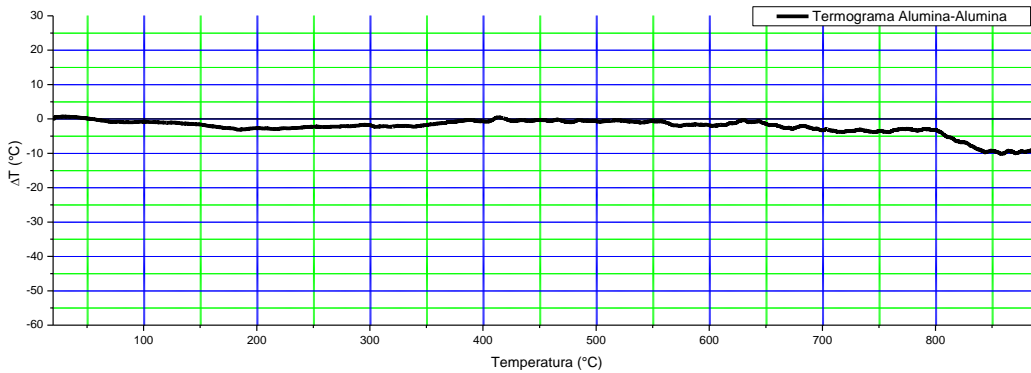
Habiendo implementado el controlador de temperatura de la planta y verificado el adecuado funcionamiento de la misma, la última etapa es la y puesta en funcionamiento de todos los componentes (horno, controlador) y la prueba de funcionamiento del ATD.

**CAPÍTULO V:**

**EI ATD-YECOQ1: Puesta en funcionamiento  
y pruebas**

En este capítulo se describen una serie de resultados obtenidos con el ATD-YECOQ1 que permiten determinar la funcionalidad del instrumento.

El primer objetivo fue la obtención de la línea base a partir de la toma de un termograma para una muestra de alúmina de idénticas características de la muestra patrón. El resultado se observa en la figura 5.1



**Figura 5.1.** Termograma alúmina-alúmina para calibración.

Como se observa, se registró un  $\Delta T$  menor a los  $5^{\circ}\text{C}$  para temperaturas inferiores a  $800^{\circ}\text{C}$ . Este valor es menor que el error registrado por la acción de control ejercida por el controlador PI con condicionales implementado en el controlador de temperatura (figura 4.17.(c)). De esta termograma se puede afirmar que el equipo ATD-YECOQ1 tiene una calibración aceptable conforme a su implementación.

Como segundo paso se obtuvieron termogramas de muestras con comportamiento térmico conocido, con el fin de verificar el funcionamiento del ATD. En las figuras 5.2, 5.4 y 5.4 se muestran los termogramas obtenidos por el ATD-YECOQ1 para tres sales comerciales, tal como se describe en la tabla 5.1.

Como se observa, a pesar de que en los diferentes termogramas se presentan accidentes térmicos a temperaturas cercanas a las esperadas ( $880^{\circ}\text{C}$  para NaCl,  $118^{\circ}\text{C}$  y  $170^{\circ}\text{C}$  para  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  y  $470^{\circ}\text{C}$ ,  $650^{\circ}\text{C}$  y  $690^{\circ}\text{C}$  para  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ), en

la figura 5.2 y 5.4 aparecen picos alrededor de 100 y 70°C que no corresponden al comportamiento de estos materiales y que, en principio pueden ser adjudicados a procesos de deshidratación de las sales.

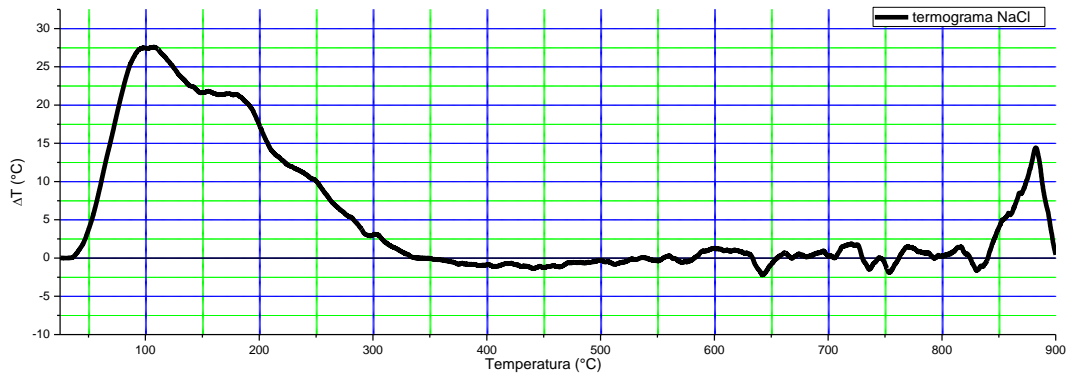
**Tabla 5.1** Sales sometidas a ATD con el ATD-YECOQ1

Sal	Fórmula	T de fusión (°C)	T de ebullición (°C)	T de descomposición (°C)
Cloruro de Sodio	NaCl	801	1413	1413
Nitrato de aluminio	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	73	135	135
Nitrato de bario	Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	592	Se descompone	592

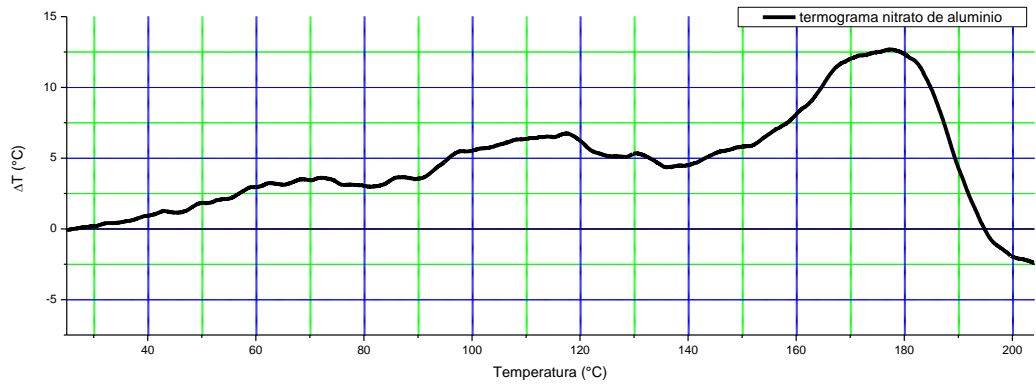
Nuevamente, como el objetivo era verificar el comportamiento del ATD y con los termogramas 5.2-5.4 quedan dudas sobre este, se decidió probar con seis muestras de diferente naturaleza a las anteriores. Las características de las muestras se describen en la tabla 5.2.

**Tabla 5.2.** Muestras sometidas a ATD con el ATD-YECOQ1

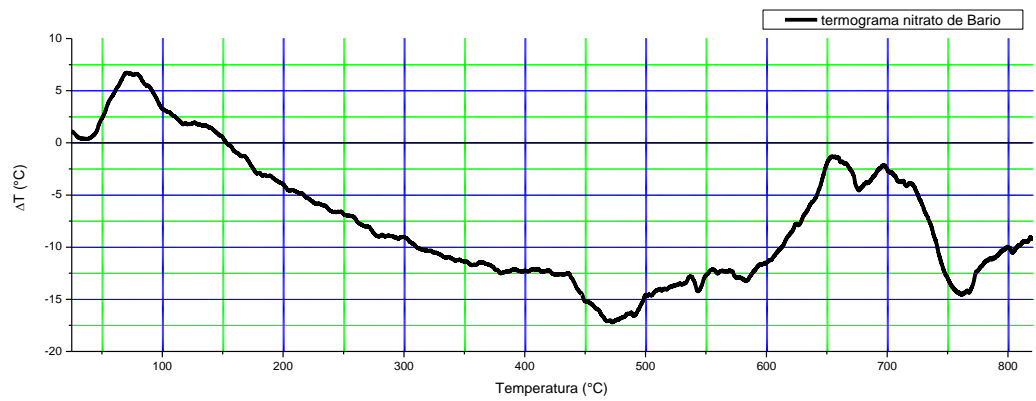
Muestra	Nombre	Fórmula	pH	Método	Temp	Razón Fe:Ba
M29	Hexaferrita de Bario	BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	7.49	coprecipitación	60	12:1
M47	Hexaferrita de Bario	BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	9.86	coprecipitación	60	12:1
M28	Hexaferrita de Bario	BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	7.12	Pechini	450	12:1
M40	Hexaferrita de Bario	BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	9.82	Combustión	500	11.75:1
M4	Hexaferrita de Bario	BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	9.33	Combustión	450	12:1



**Figura 5.2** Termograma ATD para NaCl

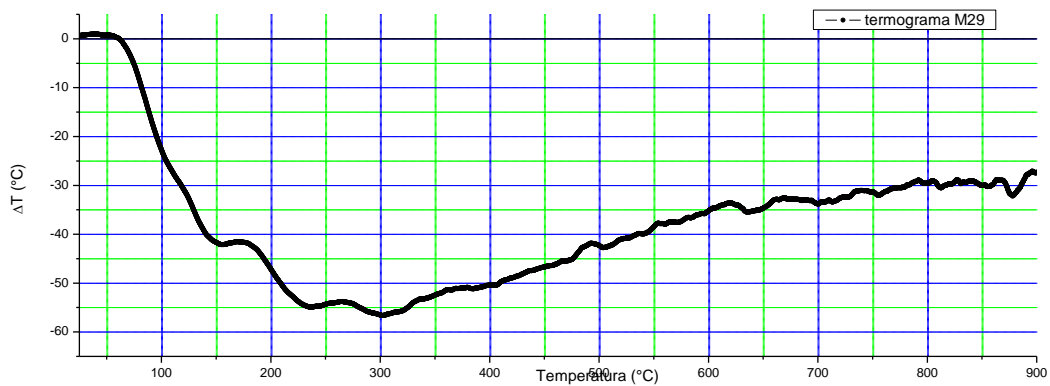


**Figura 5.3** Termograma ATD para Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>

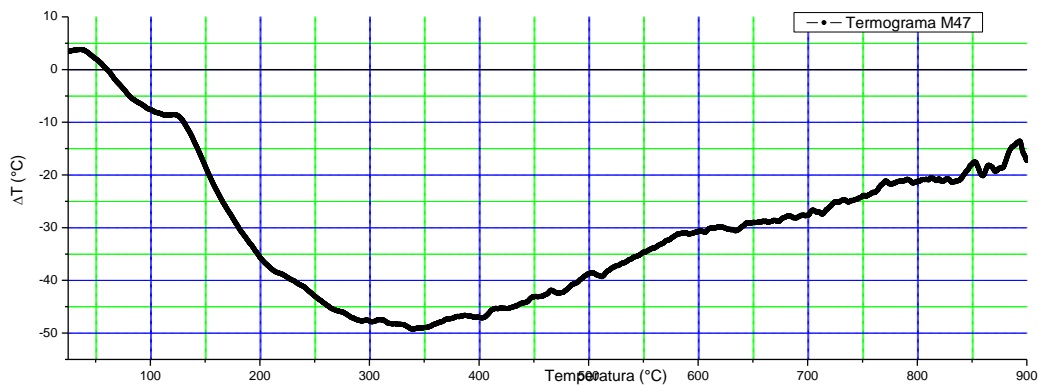


**Figura 5.4** Termograma ATD para Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

A continuación se presentan los termogramas correspondientes a las muestras descritas en la Tabla 5.2.



**Figura 5.5** Termograma ATD para M29



**Figura 5.6** Termograma ATD para M47

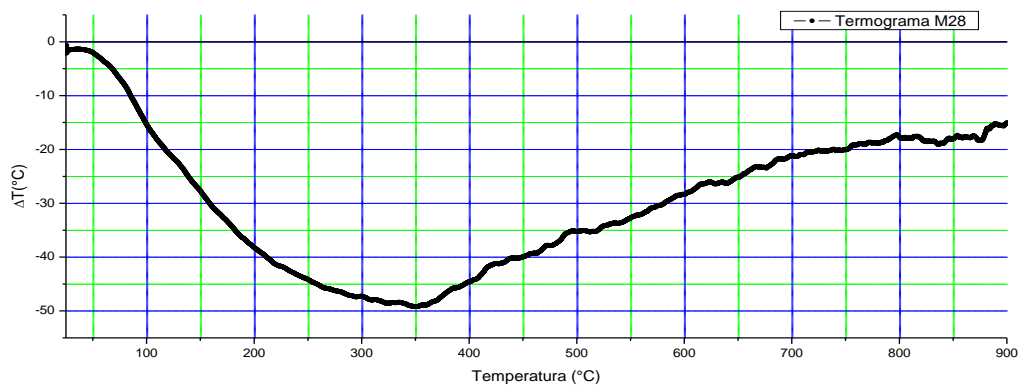


Figura 5.7 Termograma ATD para M28

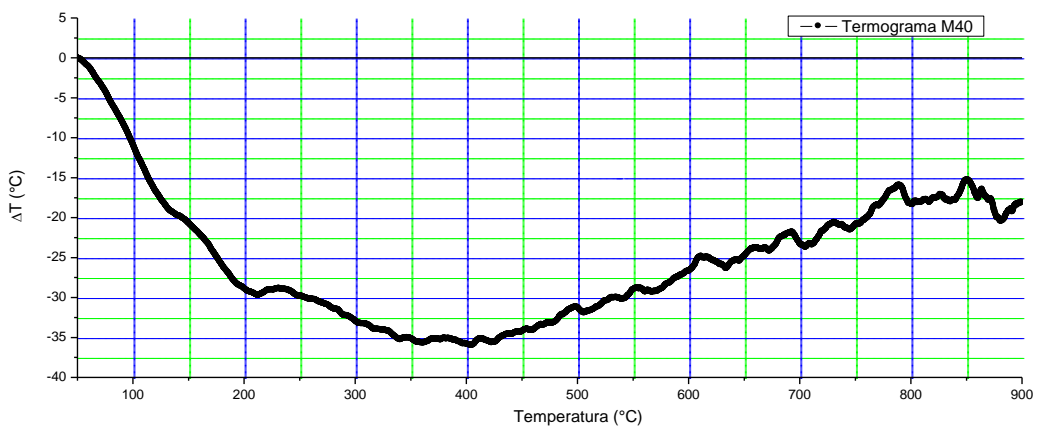


Figura 5.8 Termograma ATD para M40

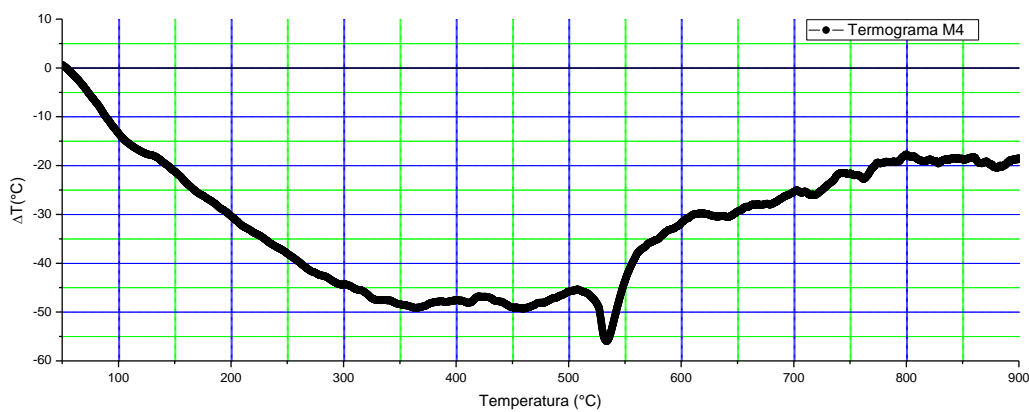
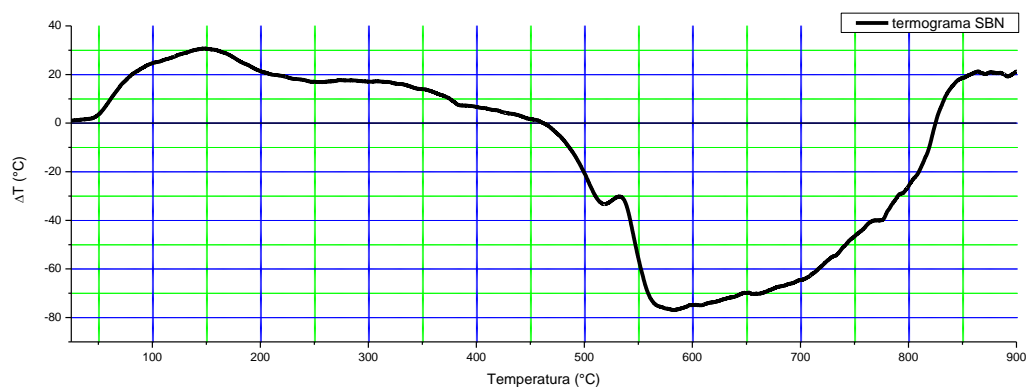


Figura 5.9 Termograma ATD para M4

Al observar las figuras 5.4 – 5.9, se ve un comportamiento térmico similar entre ellas y considerablemente diferente cuando se comparan con los termogramas de las sales (figuras 5.2-5.4). Además, para reforzar la conclusión sobre funcionalidad del ATD se tomó un termograma para una muestra diferente, el niobato de estroncio, con la siguiente descripción:

SBN	Niobato de estroncio-bario	$\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$	9.7	Pechini	200
-----	----------------------------	---	-----	---------	-----

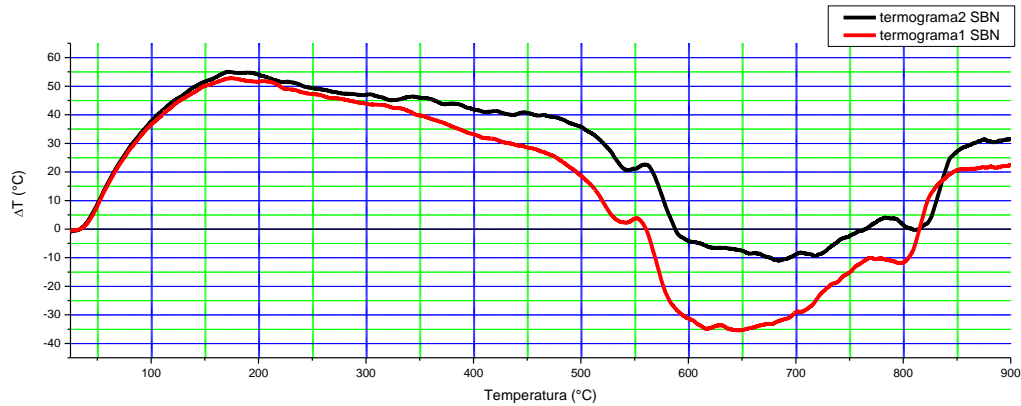
La figura 5.10 presenta el termograma de esta muestra. Como se observa, es diferente a todos los anteriores, como era de esperarse a partir de un correcto funcionamiento del ATD-YECOQ1.



**Figura 5.10** Termograma ATD para SBN

El paso siguiente es confirmar la reproducibilidad en los resultados. Para ello se tomó dos veces un termograma a la muestra de SBN. El resultado se presenta en la figura 5.11.





**Figura 5.11** Reproducibilidad de termogramas para el SBN.

Como se observa, se consigue una reproducibilidad de los termogramas en lo que se refiere a las temperaturas que marcan accidentes térmicos, fin primordial del ATDYECOQ1, mostrando diferencias en lo que respecta al  $\Delta T$ . Esto puede ser atribuido, inicialmente a la diferencia de masa de muestra en cada medida.

Una prueba más fiable de la funcionalidad del instrumento es la comparación directa de sus termogramas con algunos obtenidos con equipos comerciales (para las mismas muestras), no obstante, por razones de presupuesto esta comparación deja para un futuro.

El análisis de los termogramas corresponde a un estudio específico de cada material que no se encuadra dentro de los objetivos de este trabajo de investigación.

## CONCLUSIONES

El objetivo general, se cumplió. Se diseñó e implementó un equipo de análisis térmico diferencial que permite la caracterización e identificación cualitativa de las propiedades térmicas de diversos materiales. Para alcanzar este objetivo se hizo indispensable la construcción de un horno eléctrico con su respectivo controlador de temperatura y un sistema de monitoreo desde un computador con puerto serial.

Durante la ejecución de la investigación se llegó a conclusiones relevantes tanto en lo que respecta a la construcción del horno como a los diferentes implementos, dispositivos y procesos, así:

**Los caolines de la zona rural de Popayán son apropiados para la fabricación de la pieza cerámicas (en la composición cerámica porcentual de 44% de la tetilla, 36% de cajete y 20% arcilla plástica, específicamente) correspondiente al horno, alcanzando temperaturas de hasta 1000°C.**

**Las resistencias hechas en alambre de Kanthal A1 son adecuadas para la aplicación, puesto que se alcanzó una temperatura 1000°C, aplicando 80VAC, lo que indica que las resistencias nunca fueron saturadas.**

**Los procesos de caracterización del horno y sintonización de los parámetros del controlador por estrada escalón, permitieron desarrollar en primera instancia un controlador PID. No obstante, el error registrado no era adecuado para la finalidad. Esto llevó a un replanteamiento pero basado en este controlador.**

**Con lo anterior, se implementó un controlador PI, con un error promedio para la rampa de 3°C/min fue de 4°C, para la rampa de 5°C/min fue de 7°C y para la rampa de 7°C/min fue de 8°C. Pertinentes para desarrollar los termogramas correspondientes al ATD-YECOQ1.**

**Se debe resaltar que el controlador permite desarrollar temperaturas desde los 25°C hasta 1000°C.**

**El sistema de adquisición de datos, utilizando los protocolos de comunicación USART tanto del microcontrolador PIC18F452 y del computador, fueron adecuados, pero se podrían hacer unas mejoras para obtener una mayor resolución en las respuesta utilizando un conversor análogo digital de mas bits.**

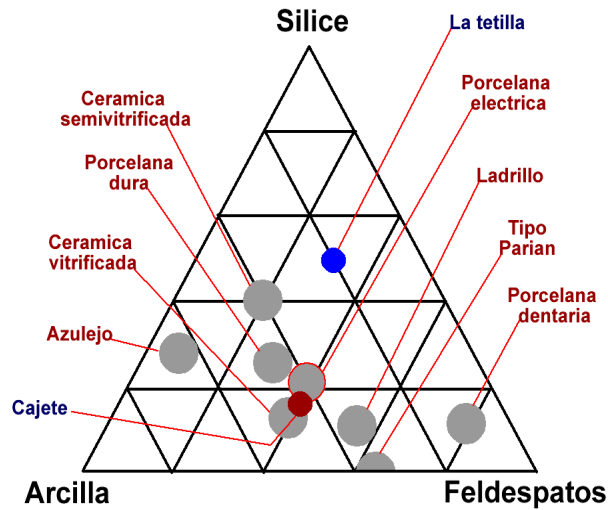
**Del actuador que controla la carga que llega a la resistencia de calefacción del horno se concluye que es primordial la utilización de un circuito detector de cruces por cero sincronizado con la señal PWM generada desde el microcontrolador.**

**Los termogramas obtenidos para diferentes muestras verificaron la funcionalidad del instrumento. Del proceso de calibración se verificó el efecto del error instrumental anunciado en el error de la acción de control ejercida por el controlador PI.**

## ANEXO A

### Composición cerámica de las arcillas

La figura A.1 muestra un triángulo de composición de cerámica (Sílice, arcilla y feldespatos). Que posibilita la ubicación de algunas cerámicas ya estandarizadas en la industria como lo son ladrillo, porcelana eléctrica, azulejo ver figura A.1, el estudio realizado por J. Cobo y colaboradores determinó la composición de las arcillas, de las minas de cajete y la tetilla.



**Figura A.1** Triángulo de composición cerámica

Partiendo de la composición cerámica de los caolines extraídos de la zona rural de Popayán, es posible realizar una mezcla entre ellos, valiéndonos de sus características para desplazarnos en el triángulo de composición cerámica y posibilitándose de esta manera la fabricación de cerámicas adecuadas para diferentes aplicaciones, como se ve en la tabla A.1.

**Tabla A.1.** Aplicaciones cerámicas de acuerdo a la composición de las arcillas.

Arcilla	Composición porcentual para las diferentes aplicaciones.			
	Porcelana eléctrica	Porcelana de mesa	Porcelana sanitaria	refractarios
Tetilla	20%	75%	0%	44%
Cajete	80%	25%	89.24%	36%
Comercial	0%	0%	10.76%	20%

En el presente trabajo se requería de una cerámica refractaria, por lo que se utilizo la composición de 44% Tetilla, 36% cajete y 20% comercial.

### **Medida de densidad de suelos utilizando un picnómetro**

La densidad de la mezcla de caolines se determino empleando la siguiente la ecuación A-1.

$$D_s = \frac{(M_{pss} - M_{pv})D_w}{(M_{pw} - M_{pv}) - (M_{pssw} - M_{pss})} \quad (A-1)$$

Donde:

$M_{pss}$ : Masa del picnómetro + suelo

$M_{pv}$ : Masa del picnómetro vacío y seco

$M_{pw}$ : Masa del picnómetro + agua

$M_{pssw}$ : Masa del picnómetro + agua + suelo seco

$D_w$ : Densidad del agua

Este procedimiento se conoce como densidad real o al vacío, ya que se debe pesar el picnómetro vacío para posteriormente adicionar 2 g de la mezcla de caolines y nuevamente pesar y registrar este dato, el procedimiento sigue con la adición de agua hasta completar 1/3 del volumen del picnómetro con el fin de llevar a aplicación de vacío durante 2 horas, este procedimiento se repitió con las 2/3 partes de agua y el volumen completo, permitiendo así retirar todo el aire insertado en las partículas de la mezcla de caolines, obteniendo una buena medida de los datos para hacer el cálculo de la densidad de la mezcla.

## ANEXO B

### Controlador por Modelo Interno (IMC)

Este método exige que la función de transferencia de la planta  $G(s)$  se exprese como el producto de dos funciones de transferencia.

$$G(s) = p_a(s)p_m(s) \quad (\text{B-1})$$

Donde  $p_m(s)$  contiene los componentes de  $G(s)$  (polos y ceros) que serán cancelados con el controlador, ya que este método se emplea en sistemas estables, tanto  $G(s)$  como  $p_m(s)$  no tendrán polos en el semiplano derecho, y  $p_a(s)$  contiene los elementos de  $G(s)$  que no serán cancelados por el controlador, es preciso que  $p_a(s)$  tenga la forma de un filtro pasa todo como el que se presenta a continuación.

$$p_a(s) = \prod_{i,j} \left( \frac{-\tau_i s + 1}{\tau_i s + 1} \right) \left( \frac{\tau_j^2 s^2 - 2\tau_j \zeta_j s + 1}{\tau_j^2 s^2 + 2\tau_j \zeta_j s + 1} \right) e^{-s\tau} \quad (\text{B-2})$$

Con  $\tau_i, \tau_i > 0$  y  $0 < \zeta_j < 1$ .

Así como con  $G(s)$ , también se supondrá una función de transferencia de lazo cerrado deseada de la forma.

$$G_{cl}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{p_a(s)}{(\lambda s + 1)^r} \quad (\text{B-3})$$

Donde  $C(s)$  es la señal de salida,  $R(s)$  es la señal de entrada y  $r$  es el orden del sistema.

El controlador  $G_c(s)$  debe relacionarse con (B-3) del modo siguiente.

$$G_{cl}(s) = \frac{p_a(s)}{(\lambda s + 1)^r} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (\text{B-4})$$

De esta ecuación se obtiene el valor de  $G_c(s)$ .

$$G_c(s) = \frac{G_{cl}(s)}{G(s) - G_{cl}(s)G(s)} = \frac{p_m^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r - p_a(s)} \quad (\text{B-5})$$

El controlador de la ecuación (B-5) es el controlador por modelo interno  $G_{IMC}(s)$ .

### Aproximación a un PID

Ya que el error en estado estable ante la entrada escalón es cero ( $p_a(0) = 1$ ,  $G_{cl}(s) = 1$ ), la función de lazo abierto debe tener por lo menos un integrador, y como la planta se supuso estable en lazo abierto, debe existir un polo en el origen, y este polo debe estar en el controlador.

El denominador del controlador  $G_{IMC}(s)$  es:

$$\begin{aligned} (\lambda s + 1)^r - p_a(s)|_{s=0} &= 1^r - p_a(0) \\ &= 1 - 1 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{B-6})$$

La ecuación (B-6) demuestra que el controlador  $G_{IMC}(s)$  tiene características integrales, entonces el controlador puede expresarse como.

$$G_{IMC}(s) = \frac{f(s)}{s} \quad (\text{B-7})$$

Al expandir la ecuación (B-7) por series de Maclaurin se tiene.

$$G_{IMC}(s) = \frac{1}{s} \left[ f(0) + f'(0)s + \frac{f''(0)}{2}s^2 + \frac{f'''(0)}{6}s^3 + \dots \right] \quad (\text{B-8})$$

Cuando se desprecian los términos de orden superior, la ecuación (B-8) queda de la siguiente forma.

$$\begin{aligned} G_{IMC}(s) &\approx \frac{1}{s} \left[ f(0) + f'(0)s + \frac{f''(0)}{2}s^2 \right] \\ &\approx \frac{f(0)}{s} + f'(0) + \frac{f''(0)}{2}s \\ &\approx f'(0) \left[ 1 + \frac{f(0)}{f'(0)s} + \frac{f''(0)}{2f'(0)}s \right] \\ &\approx K \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \end{aligned} \quad (\text{B-9})$$

Donde:

$$\begin{aligned}K &= f'(0) \\T_i &= \frac{f'(0)}{f(0)} \\T_d &= \frac{f''(0)}{2f'(0)}\end{aligned}\tag{B-10}$$

La ecuación (B-9) muestra que los primeros tres términos de la serie (B-8) constituyen un controlador PID.

Para encontrar los valores de las derivadas de  $f(s)$ , y por tanto los parámetros del controlador se recurre al siguiente procedimiento.

Relacionando las ecuaciones (B-5) y (B-7) se obtiene la siguiente relación.

$$\frac{f(s)}{s} = \frac{1}{s} \left[ \frac{p_m^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r - p_a(s)} \right] = \frac{1}{s} \left[ \frac{p_m^{-1}(s)}{D(s)} \right]\tag{B-11}$$

Donde

$$D(s) = \frac{(\lambda s + 1)^r - p_a(s)}{s}\tag{B-12}$$

De modo que  $f(s)$  puede expresarse como.

$$f(s) = \frac{p_m^{-1}(s)}{D(s)}\tag{B-13}$$

Ahora con (B-13) se calculan las derivadas de  $f(s)$  con respecto a  $s$ . Pero antes es necesario saber la primera y la segunda derivada de  $D(s)$ , esto se obtiene de (B-12). Luego de eso, se nota que también es necesario el cálculo de las derivadas de  $p_a(s)$  y  $p_m(s)$ , cuyas formas no dependen más que del modelo de la planta.



Con el fin de calcular los parámetros del controlador se considera un sistema de primer orden con tiempo muerto, como el que se presenta en la ecuación (B-14).

$$G(s) = p_a(s)p_m(s) = \frac{K_H e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (\text{B-14})$$

Esta ecuación muestra que  $p_a(s) = e^{-Ls}$  y  $p_m(s) = \frac{K_H}{\tau s + 1}$ , así, la dinámica de lazo cerrado deseada es.

$$G_{cl} = \frac{p_a(s)}{(\lambda s + 1)^r} = \frac{e^{-Ls}}{(\lambda s + 1)} \quad (\text{B-15})$$

Con la ecuación (B-5) se determina el controlador requerido.

$$G_{IMC}(s) = \frac{p_m^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r - p_a(s)} = \frac{K_H^{-1}(\tau s + 1)}{(\lambda s + 1) - e^{-Ls}} \quad (\text{B-16})$$

Ahora se calcula  $f(0)$ ,  $f'(0)$  y  $f''(0)$ . Este cálculo como ya se dijo depende del cálculo de las derivadas de  $D(s)$ ,  $p_a(s)$  y  $p_m(s)$ , lo que finalmente conduce a.

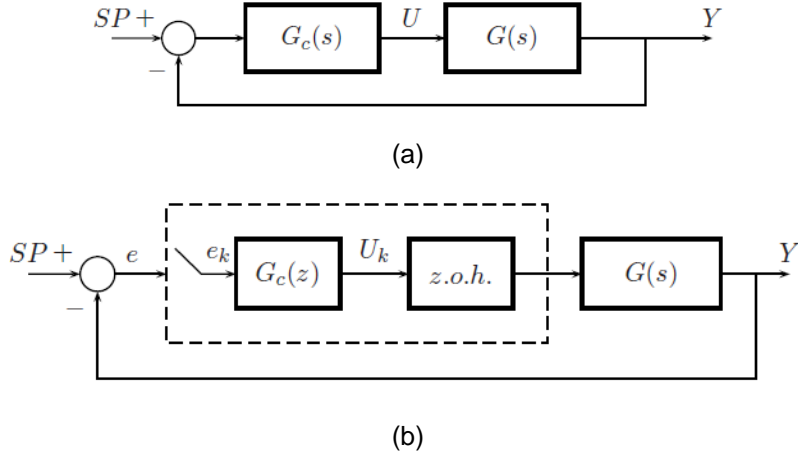
$$\begin{aligned} f(0) &= \frac{1}{K_H(\lambda + L)} \\ f'(0) &= \frac{1}{K_H(\lambda + L)} \left[ \tau + \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \right] \\ f''(0) &= \frac{L^2}{K_H(\lambda + L)^2} \left[ \tau + \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \right] \left[ 1 - \frac{L}{3T_i} \right] \end{aligned} \quad (\text{B-17})$$

Con base en este resultado y la ecuación (B-10) los valores de  $K$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , serán entonces.

$$\begin{aligned} K &= \frac{T_i}{K_H(\lambda + L)} \\ T_i &= \tau + \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \\ T_d &= \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \left[ 1 - \frac{L}{3T_i} \right] \end{aligned} \quad (\text{B-18})$$

## ANEXO C

### Discretización del controlador PID

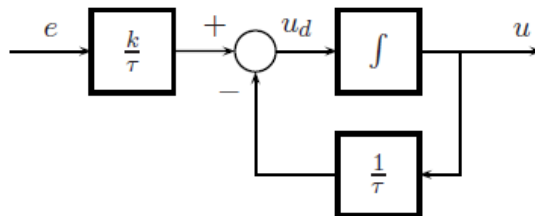


**Figura C.1** Lazo de control de tiempo continuo (a) y su equivalente de tiempo discreto (b)

Lo que se pretende hacer aquí es obtener un nuevo lazo de control (figura C.1 (b)) con un comportamiento similar al lazo de tiempo continuo (figura C.1 (a)).

Para conocer más sobre los por menores que están envueltos en este proceso, se analiza el diagrama de la figura C.2, que corresponde a la siguiente función de transferencia:

$$G_c(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (C-1)$$



**Figura C.2** Diagrama de bloques para la ecuación (d-1)

El problema se presenta en el bloque de integración, pero esto se soluciona definiendo un nuevo mecanismo de integración de tiempo discreto, la integral que hay que modificar es.

$$u(t) = \int_0^t u_d(\lambda) d\lambda \quad (C-2)$$

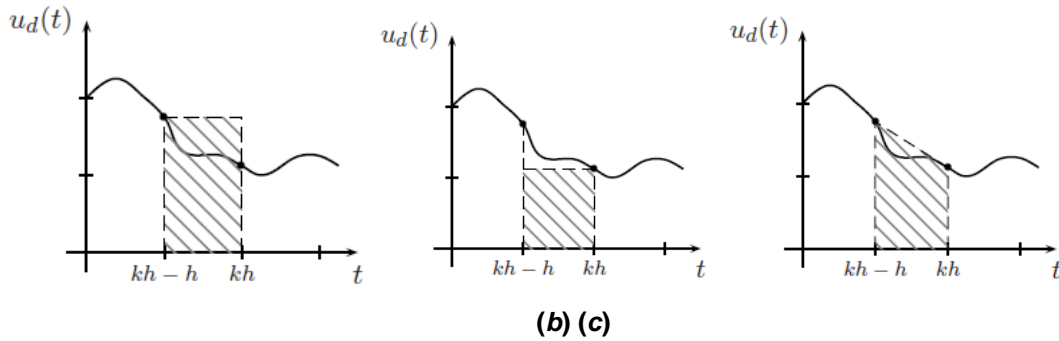
De modo que la ecuación (C-2) se pueda aproximar por:

$$u(kh) = \int_0^{kh} u_d(\lambda) d\lambda = u(kh - h) + \int_{kh-h}^{kh} u_d(\lambda) d\lambda \quad (C-3)$$

La integral del extremo derecho de la ecuación (C-3) corresponde a una operación de tiempo continuo. Ahora se trabajara con esa integral para hallar una solución aproximada teniendo en cuenta que solo se conoce  $u_d(kh)$ .

### Integrador de Tustin

Para hallar el valor más aproximado de la integral que nos interesa, nos podemos ayudar de la figura C.3.



**Figura C.3** Valor más aproximado de la integral (a) por “arriba”, (b) por “abajo” y (c) trapezoidal

Las tres figuras nos dan tres valores distintos para el área bajo la curva, la figura C.3a, muestra una aproximación por “arriba”, la figura C.3b, una aproximación por “abajo”, pero la que más cerca esta del valor real es la figura C.3c. El valor del área bajo la curva es entonces

$$\int_{kh-h}^{kh} u_d(\lambda) d\lambda \approx \frac{h}{2} [u_d(kh) + u_d(kh - h)] \quad (C-4)$$

Con la aproximación de la ecuación (C-4), el valor de  $u(kh)$  se expresa como

$$u(kh) = u(kh - h) + \frac{h}{2} [u_d(kh) + u_d(kh - h)] \quad (C-5)$$

Ahora, utilizando el operador  $q^1$ , se puede obtener una nueva forma de expresar  $u(kh)$ , como sigue

$$u(kh) = \frac{h}{2} \frac{q+1}{q-1} u_d(kh) \quad (C-6)$$

La ecuación (C-6) es conocida como **Integrador de Tustin**, y es la forma en tiempo discreto para la integral que se usara en la discretización del controlador PID.

La figura C.4 representa la ecuación (C-1) y es también la variación de la figura C.1 esta vez con un integrador de Tustin.

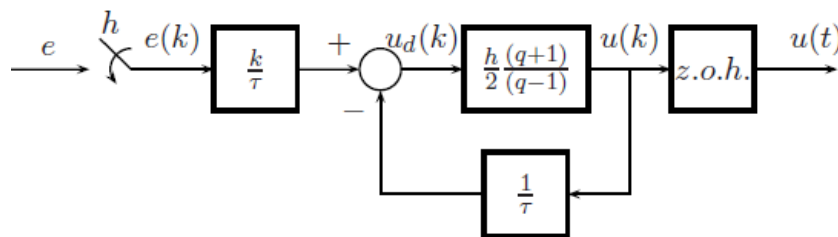


Figura C.4 Diagrama de bloques de un controlador con un integrador de Tustin.

### Discretización de la Acción Proporcional

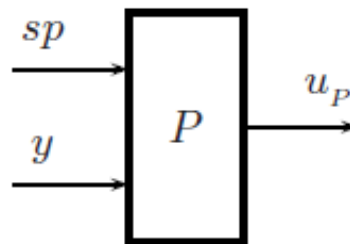
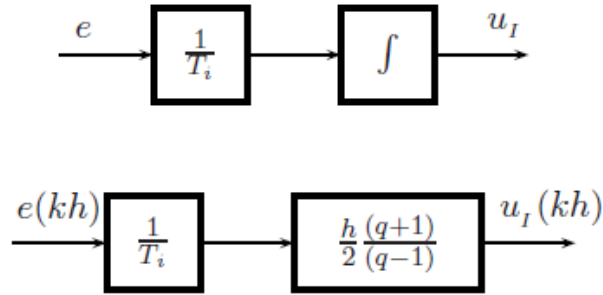


Figura C.5 Ley de control proporcional.

Esta es la más simple de todas y se puede representar por la figura C.5, cuya ecuación se expresa como

$$u_p(kh) = b(sp(kh)) - y(kh) \quad (C-7)$$

## Discretización de la Acción Integral



**Figura C.6** Ley de control integral.

En la figura C.6, se reemplaza el integrador de tiempo continuo por el integrador de Tustin. Con lo que se obtiene que la acción integral es.

$$u_i(kh) = \left( \frac{h}{2T_i} \frac{q+1}{q-1} \right) e(kh) = \frac{h}{2T_i} \left( 1 + \frac{2}{q-1} \right) e(kh) \quad (\text{C-8})$$

La ecuación (C-8) puede expresarse como.

$$u_i(kh) = \frac{h}{2T_i} [e(kh) + x(kh)] \quad (\text{C-9})$$

Donde  $x(kh) = \frac{2}{q-1} e(kh)$ , que expresada como ecuación de diferencias es

$$x(kh + h) = x(kh) + 2e(kh) \quad (\text{C-10})$$

Las ecuaciones (C-9) y (C-10), conforman el siguiente modelo en espacio de estados

$$x(kh + h) = x(kh) + 2e(kh)$$

$$u_i(kh) = \frac{h}{2T_i} x(kh) + \frac{h}{2T_i} e(kh) \quad (\text{C-11})$$

## Discretización de la Acción Derivativa

A diferencia de las anteriores discretizaciones, con esta se iniciará desde el modelo en tiempo continuo. El derivador que se usará es el ya mostrado anteriormente en la ecuación (3.9) (derivador con ganancia limitada)

$$U_D(s) = \frac{-T_d s}{\frac{T_d}{N}s + 1} Y(s) \quad (\text{C-12})$$

La diferencia con el anterior esta en el signo menos. Esta ecuación también puede ser escrita como sigue.

$$\begin{aligned} U_D(s) &= - \left[ N - \frac{N}{\frac{T_d}{N}s + 1} \right] Y(s) \\ &= \frac{N}{\frac{T_d}{N}s + 1} Y(s) - NY(s) \end{aligned} \quad (\text{C-13})$$

De esta ecuación se obtiene el término.

$$X(s) = \frac{N}{\frac{T_d}{N}s + 1} Y(s) \quad (\text{C-14})$$

Al cual se le aplica la transformada inversa de Laplace, de modo que,

$$\frac{T_d}{N} \frac{dx}{dt} = -x(t) + Ny(t) \quad (\text{C-15})$$

El modelo en espacio de estados del derivador de tiempo continuo se expresa del siguiente modo,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{-N}{T_d} x(t) + \frac{N^2}{T_d} y(t) \quad (\text{C-16})$$

$$U_D = x(t) - Ny(t)$$

La figura C.7 muestra el diagrama de bloques del derivador de tiempo continuo.

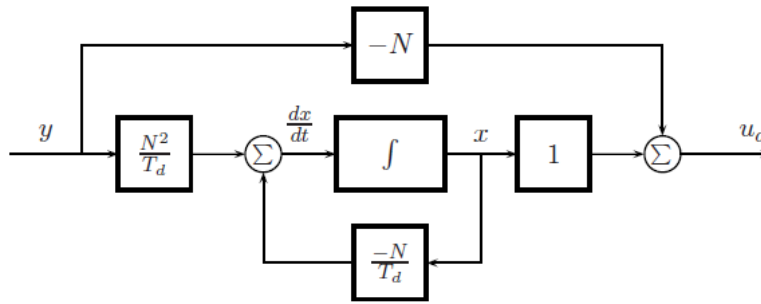


Figura C.7 Derivador de tiempo continuo.

De nuevo, el integrador de tiempo continuo se reemplaza por el de Tustin, como se muestra en la figura C.8

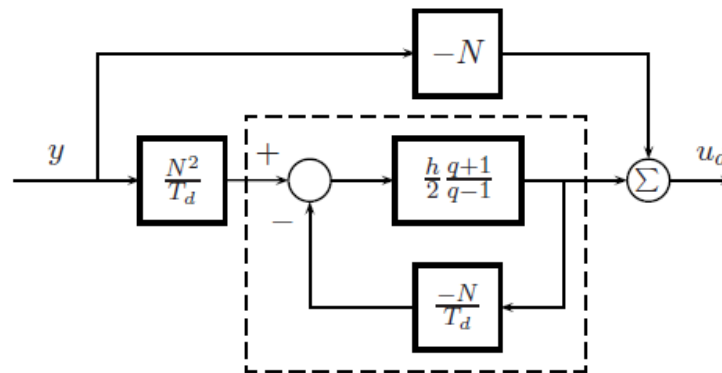


Figura C.8 Derivador de tiempo discreto.

La ecuación que representa el controlador de la figura 3.9 es,

$$u_D(kh) = \left[ -N + \frac{\frac{N^2 h q + 1}{T_d^{2q-1}}}{1 + \frac{N h q + 1}{T_d^{2q-1}}} \right] y(kh) = \left[ \frac{-N}{1 + \frac{N^2 h q + 1}{T_d^{2q-1}}} \right] y(kh) \quad (C-17)$$

Reorganizando esta ecuación e introduciendo nuevos términos, se puede escribir,

$$u_D(kh) = K_d \frac{q+1}{q+p} y(kh) \quad (C-18)$$

Donde,

$$K_d = \frac{-2T_d N}{2T_d + hN}$$

$$p = \frac{hN - 2T_d}{hN + 2T_d} \quad (\text{C-19})$$

Expresando (C-18) como una ecuación de diferencias se tiene,

$$u_D(kh) = \left[ K_d \frac{-(1-p)}{q+p} y(kh) + y(kh) \right] \quad (\text{C-20})$$

De aquí se obtiene la ecuación (C.21) para así obtener el modelo en espacio de estados de la acción derivativa (C.22)

$$x(kh) = -\frac{(1+p)}{q+p} y(kh) \quad (\text{C.21})$$

$$x(kh + h) = -px(kh) - (1 + p)y(kh)$$

$$u_D(kh) = K_d x(kh) + K_d y(kh) \quad (\text{C.22})$$



## REFERENCIAS

- [1] Cámara de comercio del cauca, *“Estudio de cadenas productivas en el departamento del cauca”*, Cámara de comercio del Cauca, 2003.
- [2] J. Cobo, J. E. Rodriguez, M. Corchuelo, *“Obtención de alúmina a partir de caolín como alternativa para la fabricación de cerámicos avanzados”*, Universidad del Cauca. Ingeniera física 2006.
- [3] J. Cobo, J. E. Rodriguez, M. Corchuelo, *“Conformado por colado a partir de arcillas del cauca "la tetilla, cajete”*, Universidad del Cauca. Ingeniera física 2006.
- [4] J. Cobo, J. E. Rodriguez, M. Corchuelo, *“Notas de laboratorio de densidad de suelos”*, Universidad del Cauca. Ingeniera física 2006.
- [5] J. Cobo, J. E. Rodriguez, M. Corchuelo, *“Notas de laboratorio de colado por la técnica de vaciado de barbotinas”*, Universidad del Cauca. Ingeniera física 2006.
- [7] Maxim, *MAX232Data Sheet*, USA, Maxim Integrated Products, 2005.
- [8] Semiconductor MOC3041, *Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output, (250/400 Volt Peak)*, *Data sheet*, Fairchild semiconductor, junio del 2005.
- [9] LitterfuseTriacs Q4015L5, *Littelfuse, Inc, 2004*.
- [10] C. Quinayas, *“Apuntes de clase, curso de programación de microcontroladores de gama alta utilizando lenguaje C++”*, Sena-Cauca, 2008.

# BIBLIOGRAFÍA

- Analog Devices, *Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation AD594/AD595*, USA, Analog Devices Inc, 1999.
- Astigarraga Urquiza, Julio. *HORNOS, Hornos Industriales de Resistencia*, Mc Graw – Hill Interamericana, S.A. 1999.
- Creus Solé, Antonio. *Instrumentación Industrial*, 6ed., Santa fe de Bogota, Alfaomega, 2000
- Katsuhiko Ogata, *Sistemas de control en tiempo discreto*, segunda edición, editorial Prentice Hall Hispanoamericana SA, 1996.
- Katsuhiko Ogata, *Ingeniería de control moderno*, segunda edición, editorial hispano América S.A, 1993.
- Microchip, *PIC18f452 Data Sheet*, Microchip Technology Inc, 2002.
- R.C. Mackenzie, *Diferencial Thermal Analysis*, Academic Press London and New York, 1970.
- Rashid. Muhammad H. *Electrónica de Potencia*, 2ed., México, Prentice Hall, 1995.
- Rengifo Rodas, Carlos Felipe. *Notas de clase, Control Digital*, Universidad del Cauca, Popayán 2004.
- Ronald Hurtado, *Diseño y construcción de un controlador de temperatura para un horno utilizado en el proceso de caracterización y calcinado de la cascarilla de arroz*.  
Universidad del cauca. Ingeniera física 2006