

Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Física



**Automatización de un Sistema de Control de
Temperatura para un Horno de Microondas**

Autora: Br. Berekyakaleb N. Errico L.

Tutores: Prof. Delfín Moronta

Prof. Cesar Leal

Caracas, Mayo 2011

Trabajo Especial de Grado presentado
ante la ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al título de:
Licenciada en Física
Mención Instrumentación

A mi familia.

Por su gran apoyo incondicional
he logrado alcanzar las metas que me he propuesto hasta hoy
y estoy segura que ahí estarán
para ayudarme en las que me faltan por conseguir.

Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Física, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentado por la Br. Berekyakaleb Nereida Errico Lebrun, titulado “**Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para un Horno de Microondas**”, para optar al título de Licenciada en Física, mención instrumentación. Certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos APROBADO.

Jurado Principal
Prof. Emery Dunia

Jurado Principal
Prof. Joszaira Lárez

Tutor
Prof. Delfín Moronta

Co-tutor
Prof. Cesar Leal

Caracas, Mayo del 2011
Sala de Seminarios Guillermo Ruggeri
Facultad de Ciencias - Universidad Central de Venezuela

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por darme salud y fuerza, para luchar cada día e iluminarme los caminos a recorrer hacia mis metas, a mis familiares más cercanos como son mis padres, abuelos, tíos y primos, que en todo momento me apoyan y de una u otra manera me ayudan día a día. Unos han sido ejemplo y otros me han motivado a seguir mis estudios. Especialmente mis hermanos y primos que son menores, ellos son mi fuerza y me impulsan a ser mejor, ya que soy ejemplo a seguir para ellos.

A mis tutores el Prof. Delfin Moronta y el Lic. Cesar Leal, que me ayudaron en la realización de este trabajo especial de grado así como el Lic. David Leal. A mi profesor Levi García, guía de las materias de especialización. A la Escuela de Física, por hacer posible mis estudios. Al Taller Mecánico de la Facultad, por ayudarme en la construcción de algunas piezas. Al CDCH, por sufragar la compra de los implementos necesarios en la realización del Sistema de Control, bajo el proyecto 03-00-6300-2006.

Agradezco también a las siguientes personas, a las cuales considero parte de mi familia, ya que han estado a mi lado a lo largo de la carrera: Maria Yépez, Joyce Sayago, Héctor Mendoza, David Rondón, Richard Caraballo, Jhonny Salas, David Dacosta, Nathaly Lajo, Jesús Cabriles, Ralph Panitz, Ricardo Blanco, Orlyce Torres, Dayana Pacheco, Iskyá García y Kelvin Ríos. Con ellos compartí noches de estudios, momentos divertidos y bonitos así como tiempos tristes, soportaron mis necesidades y mal humor en ocasiones ¡Gracias Amigos!

Resumen

Se diseñó un sistema electrónico-computacional, para el control del calentamiento de muestras dentro de un horno de microondas doméstico. El sistema consta de un circuito electrónico que cumple la función de un control de acción ON-OFF en lazo cerrado. Al aplicarle el programa diseñado para su automatización, se le agregó un control de acción proporcional derivativo, mejorando así el control sobre la temperatura. Se creó una interfaz gráfica que permite la interacción entre el usuario y el sistema electrónico, facilitando el registro de la temperatura en el tiempo, así como el trabajo al operador del equipo. Este programa también es capaz de crear una curva teórica de calentamiento y visualizar gráficamente las temperaturas medidas durante el transcurso de un experimento.

El sistema de control automatizado, fue sometido a diferentes pruebas en dos tipos de sistema físico diferentes, en las cuales se muestra que efectivamente el sistema desarrollado cumple la función de controlar la temperatura. Observando, gráficamente el comportamiento de la temperatura en el tiempo hallamos que, tanto la inercia térmica de las muestras como la del sistema físico, son factores que deben tomarse en cuenta para poder diseñar una curva teórica que pueda ser seguida por el control del sistema físico, lo cual ayuda a obtener los resultados que se espera, en cada experimento.

Índice General

Índice de Figuras.....	i
Índice de Tablas.....	v
Introducción.....	1
 Capítulo 1. Planteamiento del problema.....	2
1.1 Descripción del Problema.....	2
1.2 Justificación del Proyecto.....	5
1.3 Objetivo.....	6
1.3.1 Objetivos Generales.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
 Capítulo 2. Basamentos Teóricos.....	7
2.1 Descripción de Otros Controles Existentes.....	7
2.2 Automatización.....	8
2.3 Sistema de Control en Lazo Cerrado.....	9
2.3.1 Clasificación de los Controladores Según su Acción de Control.....	10
2.3.1.1 Controlador de Acción ON-OFF.....	10
2.3.1.2 Controlador de Acción Proporcional (P).....	11
2.3.1.3 Controlador de Acción Integral (I).....	12
2.3.1.4 Controlador de Acción Proporcional e Integral (PI).....	13
2.3.1.5 Controlador de Acción Proporcional y Derivativo (PD).....	15
2.3.1.6 Controlador de Acción Proporcional, Integral y Derivativo (PDI).....	17
2.3.2 Sistema de Control de Temperatura de Acción ON-OFF en Lazo Cerrado.....	19
2.4 El Microcontrolador.....	20

2.4.1	Tipo de Arquitectura de los Microcontroladores.....	21
2.4.1.1	Arquitectura Von Neumann.....	21
2.4.1.2	Arquitectura Harvard.....	22
2.4.2	Estructuras y Elementos Principales de los Microcontroladores.....	22
2.4.2.1	El Procesador.....	22
2.4.2.2	La Memoria.....	23
2.4.2.3	Los Pines de Entrada y Salida (I/O).....	24
2.4.2.4	Reloj Principal.....	24
2.4.2.5	Recursos Especiales.....	24
2.5	La Termocupla.....	26
2.6	El Horno Microondas.....	26
2.6.1	Proceso de Calentamiento de un Horno de Microondas.....	28
2.6.2	Dispositivos de Seguridad.....	28
2.6.2.1	Interruptores de Seguridad.....	28
2.6.2.2	Prevención de Fugas.....	29
2.7	El Magnetron.....	30
2.7.1	Estructura Básica de un Magnetron.....	31
2.7.1.1	El Bloque de Ánodo.....	31
2.7.1.2	El Filamento.....	33
2.7.1.3	Los Imanes.....	33
2.7.1.4	La Antena.....	34
2.7.2	Generación de Microondas Mediante un Magnetron.....	34
2.8	Las Microondas.....	36
2.8.1	Mecanismos de Calentamiento en Fluidos Mediante Radiaciones de Microondas.....	37
2.8.2.1	Mecanismo de Rotación Dipolar.....	38
2.8.1.2	Mecanismo de Desplazamiento Iónico.....	38
2.8.2	Influencia de la Constante Dieléctrica en el Calentamiento.....	39

2.8.3	Comportamiento de Distintos Materiales Frente a las Microondas.....	40
2.8.3.1	Materiales Metálicos.....	40
2.8.3.2	Materiales Eléctricamente Neutros.....	40
2.8.3.3	Materiales con Configuración Dipolar.....	41
Capítulo 3.	Automatización del Sistema de Control.....	42
3.1	Sistemas de Control Automatizado.....	42
3.2	Funcionamiento del Sistema de Control de Temperatura.....	43
3.2.1	Etapa de Adquisición y Codificación de la Temperatura.....	46
3.2.1.1	Medición de la Temperatura.....	46
3.2.1.2	Amplificación de una Señal Analógica.....	46
3.2.1.3	Conversión de una Señal Analógica.....	47
3.2.2	Etapa de Corrección de la Temperatura.....	48
3.2.2.1	Comparación Entre la Temperatura de la Muestra y la Temperatura de Ajuste (Setpoint).....	48
3.2.2.2	Variación del Tiempo de Calentamiento.....	59
3.2.3	Visualización de la Temperatura de la Muestra.....	59
3.2.3.1	Display.....	59
3.2.3.2	Computador (PC).....	50
3.3	Proceso de Automatización del Sistema de Control.....	51
3.3.1	Ensamblaje del sistema Electrónico.....	51
3.3.2	Diseño del Programa de Control de Temperatura.....	54
3.3.2.1	Adquisición y Graficación de la Temperatura.....	54
3.3.2.2	Envío de la Temperatura de Ajuste.....	58
3.3.2.3	Control del Tiempo de Calentamiento.....	59
Capítulo 4.	Experimentos y Discusión de Resultados.....	61
4.1	Aislamiento de la Termocupla.....	61

4.2	Verificación del Funcionamiento del Sistema de Control Automatizado.....	64
4.2.1	Sistema Manual.....	64
4.2.2	Sistema Automatizado.....	66
4.3	Pruebas Realizadas con Dos Tipos de Sistemas Físicos.....	69
4.3.1	Sensibilidad del Equipo y Apreciación de las Medidas.....	69
4.3.2	Estudio de la Eficiencia del Sistema de Control y de las Velocidades de Calentamiento y Enfriamiento del Sistema Físico...	72
4.3.2.1	Medida de la temperatura de la lámina metálica (Menor Inercia Térmica).....	72
4.3.2.2	Medida de la temperatura del agua (Mayor Inercia Térmica).....	76
	Conclusiones.....	78
	Recomendaciones.....	79
	Apéndices.....	80
	Bibliografía.....	85

Índice de Figuras

Capítulo 1. Planteamiento del problema

Fig. 1	Diagrama en bloques del sistema de control ON-OFF.....	2
Fig. 2	Trenes de pulsos cuadrados.....	3

Capítulo 2. Basamentos Teóricos

Fig. 3	Proceso de automatización.....	8
Fig. 4	Diagrama en bloque de un sistema de control en lazo cerrado en un sistema físico.....	9
Fig. 5	Diagrama en bloques de un sistema de control en lazo cerrado.....	9
Fig. 6	Respuesta temporal de un control ON-OFF.....	10
Fig. 7	Respuesta temporal de un control proporcional.....	11
Fig. 8	Señal real de un control proporcional.....	12
Fig. 9	Respuesta temporal de un control integral.....	12
Fig. 10	Respuesta temporal de un control integral ante una señal de tipo escalón.....	13
Fig. 11	Respuesta temporal de un control proporcional e integral.....	14
Fig. 12	Respuesta temporal de un control proporcional e integral ante una señal de tipo escalón.....	15
Fig. 13	Respuesta temporal de un control proporcional y derivativo.....	16
Fig. 14	Respuesta temporal de un controlador proporcional y derivativo ante una señal tipo rampa unitaria.....	17
Fig. 15	Respuesta temporal de un control proporcional, integral y derivativo...	18
Fig. 16	Respuesta temporal de un controlador proporcional, integral y derivativo ante una señal tipo rampa unitaria.....	18
Fig. 17	Diagrama de bloques de un sistema de control de temperatura tipo ON-OFF en un sistema físico.....	19

Fig. 18	Respuesta temporal de la temperatura en un sistema de control tipo ON-OFF.....	20
Fig. 19	Microcontroladores.....	21
Fig. 20	Arquitectura Von Neumann.....	21
Fig. 21	Arquitectura Harvard.....	22
Fig. 22	Elementos principales de un horno de microondas.....	27
Fig. 23	Interruptores de seguridad.....	29
Fig. 24	Malla metálica.....	30
Fig. 25	Estructura básica de un magnetrón.....	31
Fig. 26	Bloque de ánodo.....	32
Fig. 27	Tipos de cavidades.....	32
Fig. 28	El Filamento.....	33
Fig. 29	Los Imanes permanentes.....	33
Fig. 30	Trayectoria de los electrones en ausencia de campo magnético.....	34
Fig. 31	Trayectoria de los electrones debido un campo magnético.....	35
Fig. 32	Visualización del los segmentos del ánodo como circuitos resonantes.....	35
Fig. 33	Nube de electrones.....	36
Fig. 34	Onda electromagnética.....	37
Fig. 35	Ubicación de las microondas en el espectro electromagnético.....	37
Fig. 36	Rotación dipolar.....	38
Fig. 37	Desplazamiento iónico.....	39
 Capítulo 3. Automatización del Sistema de Control		
Fig. 38	Diagrama de flujo de la interacción PC-usuario.....	42
Fig. 39	Diagrama de bloques del sistema control automatizado.....	43
Fig. 40	Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de control ON-OFF.....	44

Fig. 41	Señal cuadrada de 60 Hz.....	45
Fig. 42	Transformación de la señal sinusoidal.....	45
Fig. 43	Configuración de la fases de amplificación.....	47
Fig. 44	Señal digitalizada.....	48
Fig. 45	Visualizador BCD de cuatro dígitos multiplexados.....	50
Fig. 46	Conexión del MAX232	51
Fig. 47	Protocolo de comunicación.....	51
Fig. 48	Diagrama del circuito principal.....	52
Fig. 49	Circuito principal en protoboard.....	53
Fig. 50	Circuito principal en baquelita.....	53
Fig. 51	Display.....	54
Fig. 52	Fuente fija 5V,12V y -12V.....	54
Fig. 53	Curva de calentamiento.....	55
Fig. 54	Formato de un archivo .txt.: a) modo medición, b) modo control.....	56
Fig. 55	Vista inicial del ambiente gráfico.....	58
Fig. 56	Calculo de la pendiente entre una recta y un punto	59

Capítulo 4. Experimentos y Discusión de Resultados

Fig. 57	La termocupla.....	61
Fig. 58	Detalle de la Punta de la Termocupla mostrando las distintas cubiertas.....	62
Fig. 59	Termocupla cubierta con la malla metálica.....	62
Fig. 60	Daño en el circuito impreso.....	68
Fig. 61	Sistema físico formado por: (a) un reflector de 100W, (b) una resistencia.....	69
Fig. 62	Estudio de la apreciación del equipo y dispersión de la temperatura.....	71
Fig. 63	Estudio de la apreciación del equipo y dispersión de la temperatura luego de ajustar el amplificador.....	71

Fig. 64	Prueba 1 para el caso de baja inercia térmica.....	73
Fig. 65	Prueba 2 para el caso de baja inercia térmica.....	74
Fig. 66	Prueba 3 para el caso de baja inercia térmica, simulación de producción de zeolita tipo X.....	75
Fig. 67	Prueba 1 para el caso de mayor inercia térmica que en la lámina.....	76
Fig. 68	Prueba 2 para el caso de mayor inercia térmica que en la lámina.....	77
Apéndice		
Fig. 69	Panel de puertos.....	81
Fig. 70	Panel de archivo.....	81

Índice de Tablas

Capítulo 2. Basamentos Teóricos

Tabla 1	Algunos materiales y sus constantes dieléctricas.....	40
----------------	---	----

Capítulo 4. Experimentos y Discusión de Resultados

Tabla 2	Observaciones de la prueba 1 del aislamiento de la termocupla.....	63
----------------	--	----

Tabla 3	Observaciones de la prueba 2 del aislamiento de la termocupla.....	64
----------------	--	----

Tabla 4	Primera tabulación de tiempos de calentamiento en las zonas de rampas.....	70
----------------	--	----

Tabla 5	Primera tabulación de tiempos de calentamientos en las zonas de platós.....	70
----------------	---	----

Tabla 6	Segunda tabulación de tiempos de calentamientos en las zonas de rampas.....	75
----------------	---	----

Apéndice

Tabla 7	Tipos de termocuplas.....	80
----------------	---------------------------	----

Debido a las ventajas que ofrece el método de calentamiento por exposición a radiaciones de microondas, frente a los métodos convencionales: aire caliente, vapor, hornos convencionales o muflas entre otros; la aplicación de este procedimiento se ha extendido en muchas áreas tales como: industrial, doméstica, científica, etc.

Específicamente en el área científica, existen antecedentes de la aplicación de ésta técnica de calentamiento en procesos de síntesis. Esto motivó que en la actualidad se use para sintetizar Zeolitas y Nanopartículas, en el Laboratorio de Paramagnetismo y Mecanismos de Transporte, de la Facultad de Ciencias de la U.C.V. Las síntesis se realizan en un horno de microondas doméstico y el control de la temperatura de dichas muestras se logra mediante un prototipo de sistema de control de acción On-Off en lazo cerrado.

Se planteó la automatización del prototipo antes mencionado, con el fin de facilitar su uso y tener un mejor control sobre la temperatura, para así obtener resultados más eficientes en las síntesis. Se incluyó la idea de aislar la termocupla con un recubrimiento dieléctrico y luego con una malla metálica conectada a tierra, de esta manera evitar inducciones que generen corrientes eléctricas y potenciales que creen chispas, ya que estas condiciones alteran las mediciones de la temperatura.

Para fines de este trabajo, se desarrolló un programa con la herramienta computacional Visual Basic 6.0; estableciendo una comunicación vía puerto serial entre el computador y un microcontrolador, el programa es capaz de graficar la temperatura de las muestras en función del tiempo siguiendo una curva de calentamiento creada por el usuario al inicio del experimento. La curva se diseña con parámetros de tiempo en minutos y temperatura en grados centígrados. El programa realiza cambios en el patrón del tiempo de calentamiento, así como en las temperaturas de ajuste en el momento que se requiera, para ajustar la temperatura de las muestras a la curva.

1.1 Descripción del Problema

Los hornos de microondas convencionales (caseros), han sido según demuestra la literatura, la primera etapa para iniciar el calentamiento de algunas sustancias u objetos directamente de forma no convencional. Desde hace unos 10 años, se comenzó a ver en diferentes artículos científicos el intento de usarlos en los laboratorios. Un horno de este tipo, de buen estándar técnico, incluye ajustes manuales que permiten el calentamiento según un tiempo predeterminado por el usuario.

Como es necesario controlar la temperatura de las muestras al momento de trabajar con ellas, basado en el funcionamiento del horno de microondas, se creó un sistema de control de temperatura tipo ON-OFF en lazo cerrado (ver Fig.1) que actúa directamente sobre el magnetrón. Este sistema se conecta directamente al transformador de alto voltaje y al relé encargado de la activación y desactivación del magnetrón, que se encuentran en el horno, de manera de poder controlar el paso de corriente hacia el.

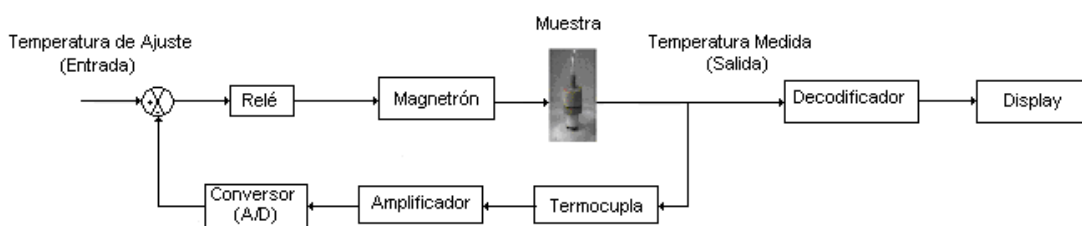


Fig. 1 Diagrama en bloques del sistema de control ON-OFF.

El componente principal encargado del control, es un microcontrolador programado para que el sistema tenga dos estados: uno, donde actúa como un termómetro y sólo puede medir la temperatura de las muestras y el otro, que hace la función de control. En este último modo, además de medir la temperatura, visualiza

en un display los números que se asocian a las temperaturas mediante una calibración previa (ver apéndice D); además permite que se realicen cambios en el valor predeterminado de temperatura por el usuario, compara la temperatura fijada con la medida y según el resultado, genera trenes de pulsos cuadrados a los cuales el usuario puede variarles el ancho (ver Fig. 2). Cuando el pulso tiene una amplitud de 5 V (ON) se enciende el magnetrón y permanece encendido hasta que el pulso baje a 0 V (OFF), en este momento el magnetrón se apaga, este proceso de encendido y apagado se repite por cada pulso generado.

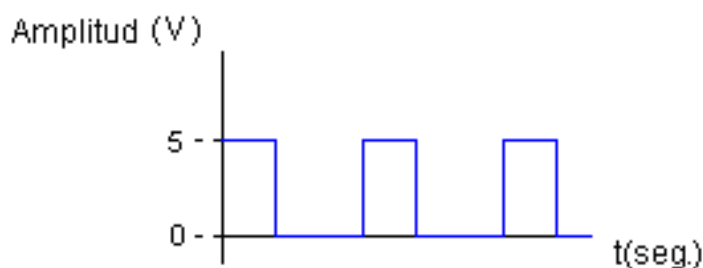


Fig. 2 Tren de pulsos cuadrados.

En este prototipo, tanto los cambios de la temperatura de ajuste, como el del tiempo de calentamiento, deben ser realizados por el usuario, quién debe estar pendiente de cuando hacer dichos cambios. Como no se lleva un registro de la temperatura durante el experimento, se le hace difícil al usuario variar el patrón de los trenes de pulso, provocando que la muestra se caliente o se enfríe más de lo debido.

El sensor de temperatura usado, es una termocupla recubierta con teflón, para evitar el contacto con el metal de la estructura del horno y la inducción de corriente en la termocupla, para impedir que las medidas sean afectadas. Cuando el prototipo de control se usa, sólo mide la temperatura en el momento en el que el magnetrón esta apagado.

Al usarse el equipo en investigaciones anteriores, quienes trabajaron con el, hicieron saber que a pesar del recubrimiento de la termocupla, en ocasiones notaron el calentamiento de ésta y la generación de chispas donde la misma hacia contacto con la estructura del horno, ver capítulo 4, sección 4.2.1.

1.2 Justificación del Proyecto

El auge del uso del método de calentamiento por exposición a radiaciones de microondas y la necesidad de tener un control de la temperatura, ha hecho que compañías comerciales tales como Ladd Research, crearan hornos de microondas con un sistema de control de temperatura incorporado, los cuales están cotizados entre 8.500 y 11.000 dólares [1], esto representa un alto costo en nuestro medio, lo que hace que su compra no sea viable. Esta situación nos llevó a plantearnos la automatización del prototipo existente en el laboratorio, para contar posteriormente con un equipo con alta eficiencia a bajo costo y con las características de un control de temperatura que se ajuste mejor a las necesidades del usuario.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Generales

- Automatizar y mejorar el prototipo de sistema de control de temperatura para un horno microondas, que se encuentra en el Laboratorio de Paramagnetismo en la Facultad de Ciencias de la U.C.V. El nuevo sistema se basa en:
 - a) Un horno de microondas.
 - b) Un circuito controlador.
 - c) Una interfaz gráfica en un computador.
- Mejorar el subsistema de medición de temperatura usado actualmente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Ensamblar un circuito electrónico basado en el prototipo ya existente para realizarles los ajustes necesarios.
- Establecer una comunicación vía puerto serial, entre el usuario y el controlador, para poder enviar y recibir información.
- Diseñar un programa con una interfaz gráfica amigable al usuario, que sea capaz de recibir datos enviados por el sistema de control y graficarlos, así como enviar información a dicho sistema.
- Estudiar la posibilidad de cambiar también su potencia de salida.
- Aislar la termocupla de manera que las radiaciones de microondas no interactúe con ella.

2.1 Descripción de Otros Controles Existentes

La revisión bibliográfica realizada de la literatura existente, cuyo fin es la búsqueda de las relaciones del problema con otras áreas del conocimiento en cuanto a las teorías del orden tecnológico y científico, cabe destacar que estas investigaciones a que haré referencia, se basan en el uso de un horno de microondas como calefactor controlado y es por ello que las mismas sirvieron como marco de referencia y soporte para la realización del presente Trabajo Especial de Grado.

"Control de un Horno Microondas Usando Labview". En este caso, los autores usan este método de calentamiento para el proceso de destilación de agua; el control de temperatura lo hacen a través de un programa realizado en Labview y los datos de temperatura recibidos de la termocupla son registrados en una tarjeta de adquisición de la National Instrument. Para evitar alteraciones en la medición de la temperatura, esta es leída luego de 15 seg. de apagarse el magnetrón y también desarrollaron un sistema de control de temperatura con una interfaz gráfica amigable para el usuario. Las ventajas que encontraron fueron: mediciones de temperatura confiables y ahorro de energía en el proceso de destilación, aislamiento de los efectos perjudiciales de las ondas electromagnéticas en la termocupla que puedan afectar la tarjeta de adquisición [2].

"Termopares para Medir Temperaturas en Muestras Expuestas a Microondas", donde partiendo del hecho de que la termocupla es uno de los sensores de temperatura de respuesta rápida y capaz de soportar temperaturas hasta 1000°C, lo cual no es posible en otros tipos de sondas como la de fibra óptica. Realizaron pruebas encapsulando la termocupla en un ambiente de polvo de grafito, el cual es conductor y aun cuando se calienta, no encontraron perturbaciones importantes en las mediciones [3].

2.2 Automatización

Se denomina automatización, a la creación de sistemas o a la aplicación de elementos computarizados para controlar equipos mecánicos (actuadores o sensores) que componen un sistema físico. Este método es aplicado también en procesos industriales, con el fin de simplificar el trabajo e incrementar la productividad y competitividad [4]. El sistema físico recibe y transmite señales acondicionadas por un controlador y el usuario le proporciona al mismo los datos para el funcionamiento del sistema, mediante el método de automatización que se haya aplicado (ver Fig. 3).

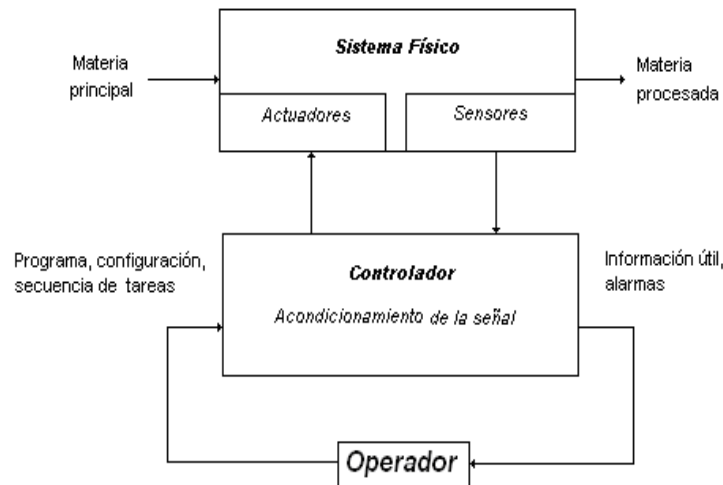


Fig. 3 Proceso de automatización.

Al automatizar se disminuye el error producido por la participación humana directa y se obtiene mayor eficiencia, tanto en el funcionamiento de los equipos, como en los procesos, obteniendo resultados satisfactorios de calidad.

2.3 Sistema de Control en Lazo Cerrado

Consiste en comparar un valor deseado fijado por el usuario (entrada de referencia o setpoint) con valores reales (salida) provenientes del sistema físico (planta), determinando la desviación entre ambos valores denominada señal de error $e(t)$. Dependiendo de esa desviación se produce una señal de control al dispositivo actuador que contiene el sistema físico, para reducir así la desviación a cero o a un valor pequeño (Fig. 4).

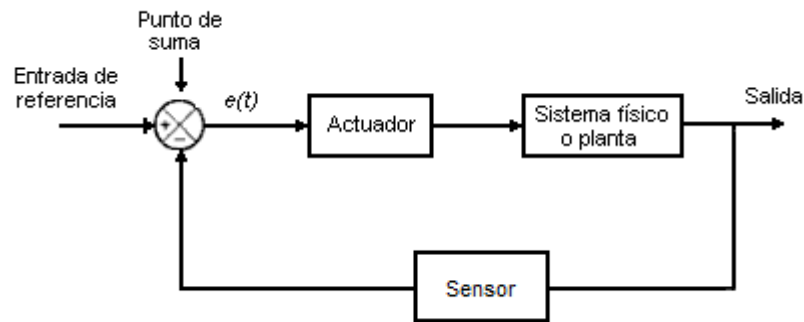


Fig. 4 Diagrama en bloque de un sistema de control en lazo cerrado aplicado a un sistema físico.

Este tipo de control se denomina “Sistema de Control Realimentado o en Lazo Cerrado”, como se observa en la Fig. 5, la entrada $R(S)$ es comparada en el punto de suma con la señal de realimentación $Y(S)$ [5].

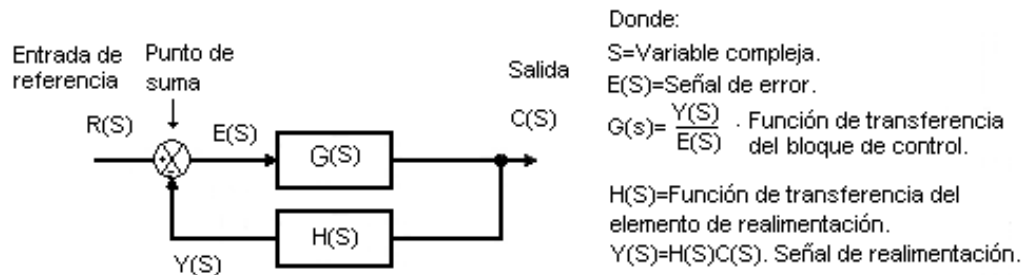


Fig. 5 Diagrama en bloques de un sistema de control en lazo cerrado.

2.3.1 Clasificación de los Controladores Según su Acción de Control

El desarrollo de la explicación en esta sección, está fundamentado en las explicaciones dadas en el libro escrito por Ogata K. en el 2006, titulado “**Ingeniería de Control Moderna**” [5] y ampliada según la referencia [6]

2.3.1.1 Controlador de Acción ON-OFF

Este tipo de control es relativamente sencillo y económico, donde el actuador solo tiene dos posiciones, en muchos casos son el encendido y el apagado. La señal de salida del controlador $y(t)$ permanece en un valor máximo o mínimo, este puede ser 0 o igual al valor máximo pero negativo, según el valor que tome la señal de error $e(t)$. De modo que:

$$y(t) = \text{valor máximo} ; e(t) > 0$$

$$y(t) = \text{valor mínimo} ; e(t) \leq 0$$

Al estudiar esta acción con una señal de error $e(t)$, de valor máximo e_0 obtendremos en el controlador una salida $y(t)$ positiva con un máximo igual a la señal de error (ver Fig. 6).

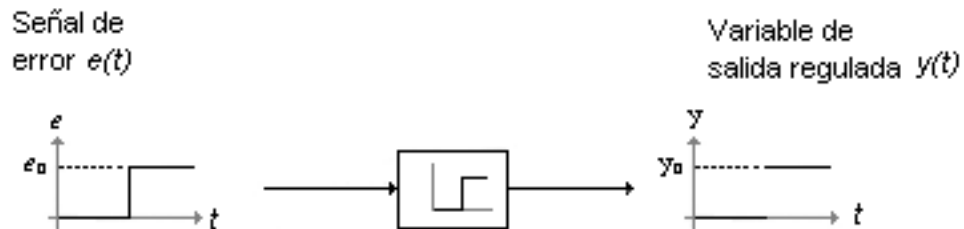


Fig. 6. Respuesta temporal de un control ON-OFF.

2.3.1.2 Controlador de Acción Proporcional (P)

Consiste simplemente en amplificar la señal de error $e(t)$ antes de aplicarla al sistema físico. En este control la señal de salida del controlador $y(t)$ es proporcional a la señal de error del sistema (ver Fig. 7).

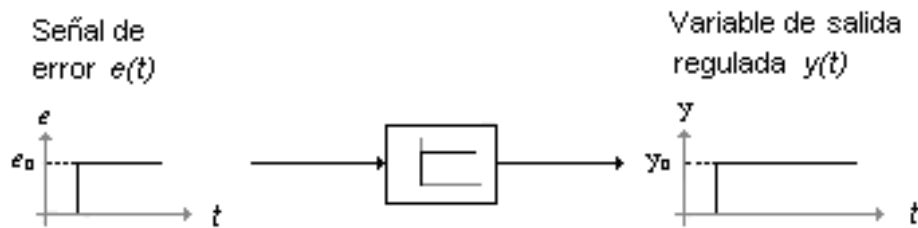


Fig. 7 Respuesta temporal de un control proporcional.

En la salida del controlador tendremos:

$$y(t) = K_p e(t) \quad \text{Ec.1}$$

Al ser manipulada matemáticamente la Ec.1, se obtiene una función de transferencia del bloque del controlador igual a una variable real K_p , denominada ganancia proporcional. Esta determina el nivel de amplificación del elemento de control y dicha ganancia es proporcional a los cambios en el elemento actuador provocados por el controlador.

Teóricamente en este tipo de controlador, si la señal de error es cero, la salida del controlador también lo será; la repuesta es instantánea, por lo cual el tiempo no interviene en el control. Sin embargo, en la práctica, si la variación de la señal de entrada es muy rápida, el controlador no puede seguir dicha variación y seguirá una trayectoria exponencial hasta alcanzar la salida deseada (ver Fig. 8).

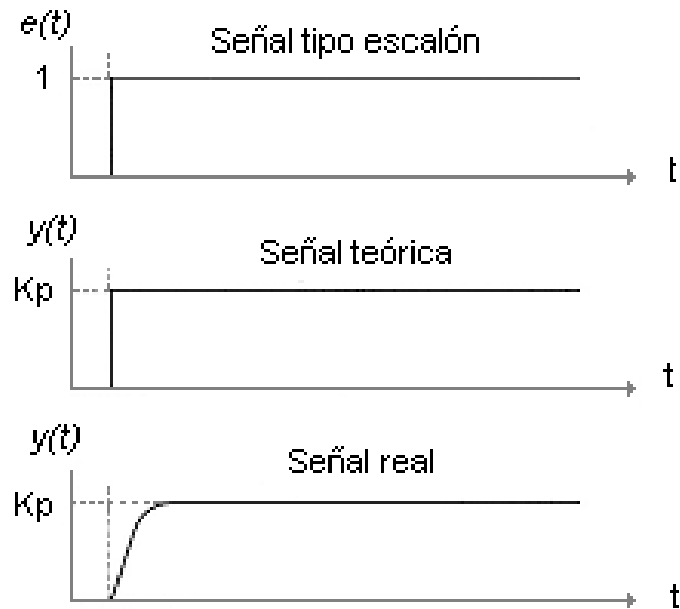


Fig. 8 Señal real de un control proporcional.

2.3.1.3 Controlador de Acción Integral (I)

En un controlador integral, la acción varía según la desviación y el tiempo durante el que se mantenga la salida $y(t)$ (ver Fig. 9).

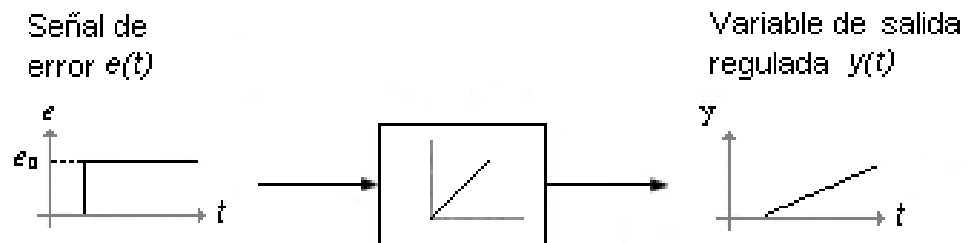


Fig. 9 Respuesta temporal de un control integral.

La ecuación que rige la salida del controlador es:

$$y(t) = K_i \int_0^t e(t) dt; \quad K_i \text{ Pendiente de la rampa de acción integral} \quad \text{Ec. 2}$$

Al aplicar la transformada de Laplace a la Ec. 2, se obtiene la función de transferencia $G(S) = K_i/S$.

La velocidad de respuesta del sistema de control, dependerá del valor que tome la variable K_i . La respuesta inicial es muy lenta en este tipo de controladores, sin embargo, elimina el error remanente que tenía el controlador proporcional. Al ser estudiada esta acción con una señal de error tipo escalón, tenemos una respuesta temporal como se muestra en la Fig. 10.

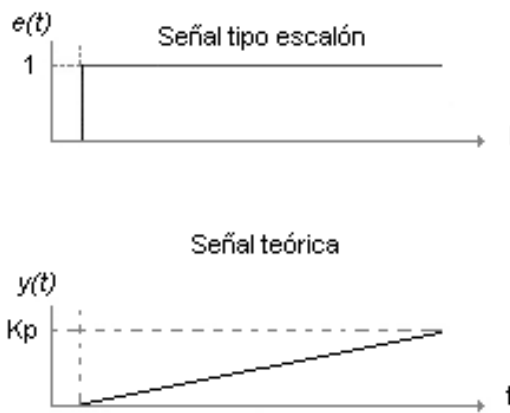


Fig. 10 Respuesta temporal de un control integral ante una señal de tipo escalón.

2.3.1.4 Controlador de Acción Proporcional e Integral (PI)

En la práctica, no existen controladores que tengan sólo acción integral sino que llevan combinada una acción proporcional, debido a que estas dos acciones se

complementan. La primera en actuar es la acción proporcional, mientras que la integral actúa durante un intervalo de tiempo. Así, y por medio de la acción integral se elimina la desviación remanente, ver Fig. 11.

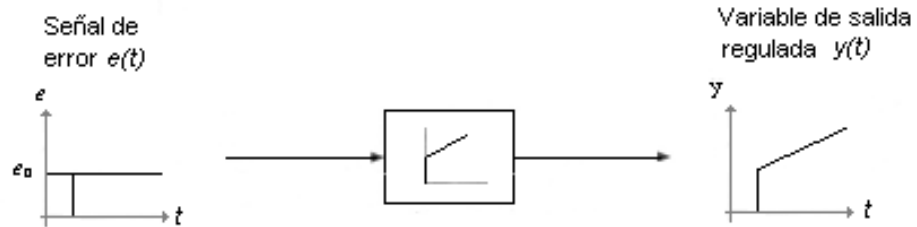


Fig. 11 Respuesta temporal de un control proporcional e integral.

La salida del controlador en este caso responde a la ecuación:

$$y(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ec. 3}$$

Al aplicarle la transformada de Laplace a la Ec. 3, se tiene una función de transferencia $G(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right)$

Donde K_p y T_i son parámetros ajustables del sistema. T_i se denomina tiempo integral o de duplicación, ya que es el tiempo que tarda la acción integral en igualar a la acción proporcional ante un error de tipo escalón; además controla la acción integral del sistema, mientras que K_p controla ambas. El tiempo integral es proporcional al efecto de la acción integral.

Como se observa en la Fig. 12, la respuesta del controlador PI es la suma de las respuestas de un controlador proporcional y un controlador integral, lo que aporta

una respuesta instantánea al producirse la acción proporcional correspondiente a la señal de error provocada por el controlador y un posterior control integral que se encargará de eliminar totalmente la señal de error.

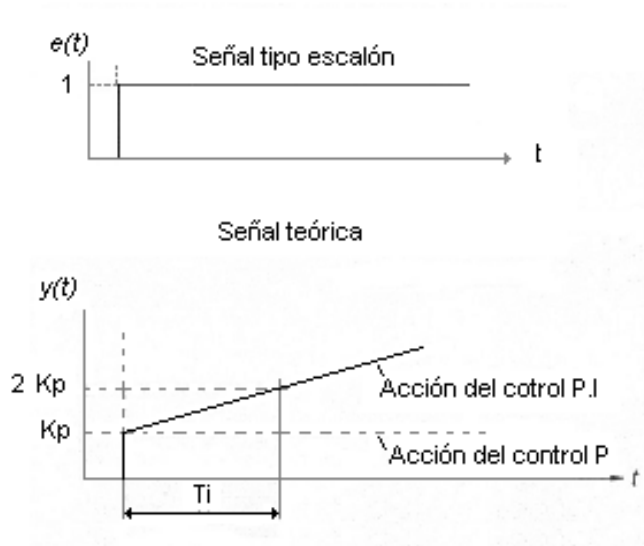


Fig. 12 Respuesta temporal de un control proporcional e integral ante una señal de tipo escalón.

2.3.1.5 Controlador de Acción Proporcional y Derivativo (PD)

Esta acción, al igual que la integral no se emplea sola, sino que va unida a la acción proporcional y se utiliza en sistemas que deben actuar muy rápidamente, puesto que la salida está en continuo cambio. Al incorporar a un controlador proporcional las características de un controlador derivativo, se mejora sustancialmente la velocidad de respuesta del sistema, aún cuando es menor la precisión en la salida durante el intervalo de tiempo en que el control derivativo esté funcionando, ver Fig. 13.

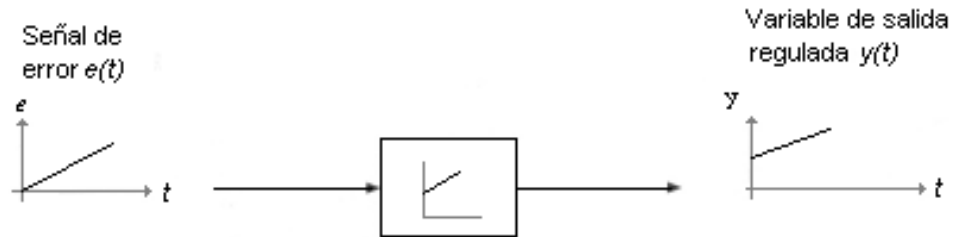


Fig. 13 Respuesta temporal de un control proporcional y derivativo.

En este tipo de controladores, debemos tener en cuenta que la derivada de una constante es cero, por tanto, el control derivativo no ejerce ningún efecto si $e(t)$ no varía en el tiempo, siendo útil sólo en aquellos casos en los que la señal de error varía en el tiempo de forma continua. Por tanto, el análisis de este controlador ante una señal de error de tipo escalón no tiene sentido, por ello, se ha representado la salida del controlador en función de una señal de entrada en forma de rampa unitaria.

En el control proporcional y derivativo, la salida del bloque de control es representada por la ecuación:

$$y(t) = K_p e(t) + K_p T_d \left(\frac{de(t)}{dt} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

Al manipular matemáticamente la Ec.4, obtenemos que la función de transferencia $G(S) = K_p(1 + T_d S)$.

La variable T_d se le denomina tiempo derivativo o de adelanto, ésta controla la acción derivativa del sistema; y es una medida de la rapidez con que compensa un controlador PD un cambio en la variable regulada, comparado con un controlador P puro. También T_d es llamada tiempo de duplicación, ya que es el tiempo que tarda la

acción proporcional en igualar el efecto de la acción derivativa, ante una señal de error de tipo rampa.

Como se observa en la Fig. 14 la respuesta del controlador se anticipa a la propia señal de error.

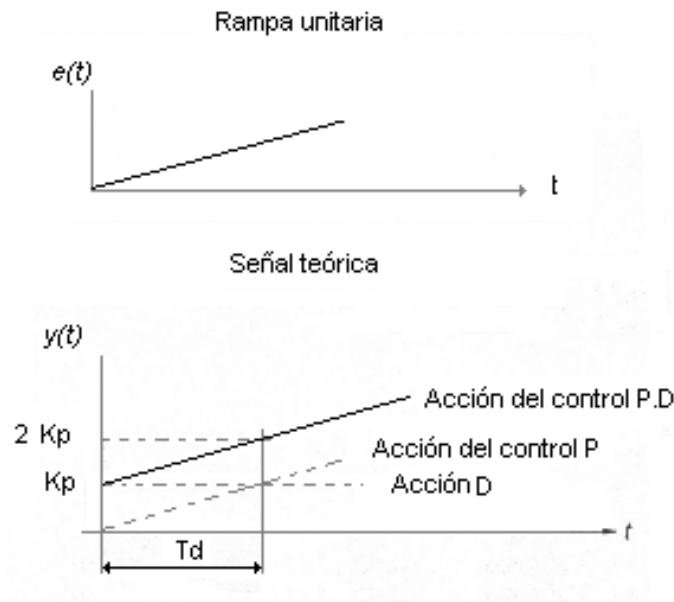


Fig. 14 Respuesta temporal de un controlador proporcional y derivativo ante una señal tipo rampa unitaria.

2.3.1.6 Controlador de Acción Proporcional, Integral y Derivativo (PDI)

Este aprovecha las características de los tres reguladores anteriores (ver Fig. 15). La ventaja de este control es que se tiene una respuesta más rápida y una inmediata compensación de la señal de error, en los casos de cambios o perturbaciones.

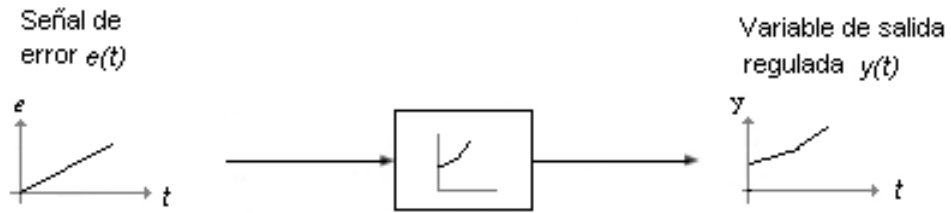


Fig. 15 Respuesta temporal de un control proporcional, integral y derivativo.

La función de transferencia es $G(S) = K_p \left(1 + T_d S + \frac{1}{T_i S} \right)$ y se obtiene al aplicarle la transformada de Laplace a la ecuación de salida del controlador $y(t)$:

$$y(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \left(\frac{de(t)}{dt} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

Se observa en la Fig. 16 que predomina la acción proporcional e integral y si la señal de error varía rápidamente, la acción derivativa será la predominante.

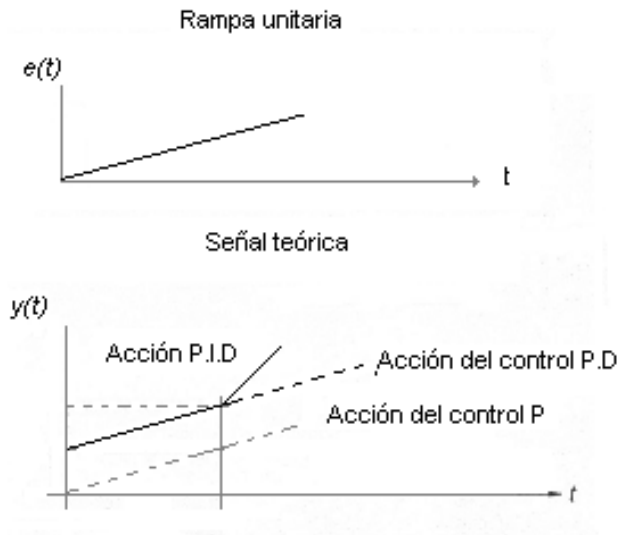


Fig. 16 Respuesta temporal de un controlador proporcional, integral y derivativo ante una señal tipo rampa unitaria.

2.3.2 Sistema de Control de Temperatura de Acción ON-OFF en Lazo Cerrado

La salida del sistema es la temperatura medida, esta viene dada por la comparación hecha por el controlador entre: la entrada de referencia (temperatura deseada o setpoint) y la salida (temperatura medida); el encargado de la realimentación es el sensor (ver Fig. 17). Si el controlador encuentra una discrepancia entre las temperaturas comparadas, envía una señal de control al dispositivo encargado de calentar (actuador), para que este se encienda o se apague según lo requiera [5].

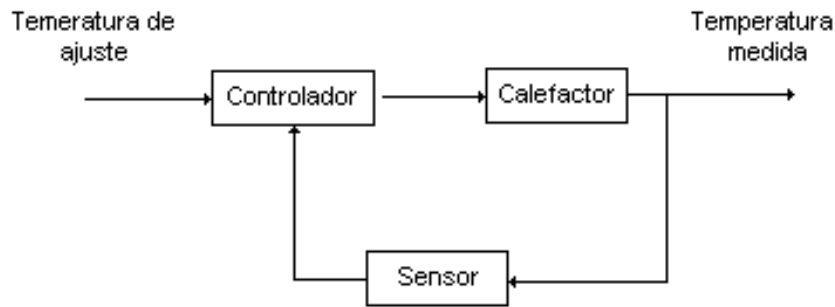


Fig. 17 Diagrama de bloques de un sistema de control de temperatura tipo ON-OFF en un sistema físico.

Si el controlador al comparar, la temperatura medida con la entrada de referencia encuentra que la primera es menor, éste le enviará una señal al actuador para que se active y así elevar la temperatura medida e intentar igualarla a la deseada. Si por el contrario, la temperatura medida es mayor que la entrada, la señal que envíe el controlador será para que el actuador se desactive y la temperatura medida baje hasta un valor parecido a la deseada, ver Fig. 18.

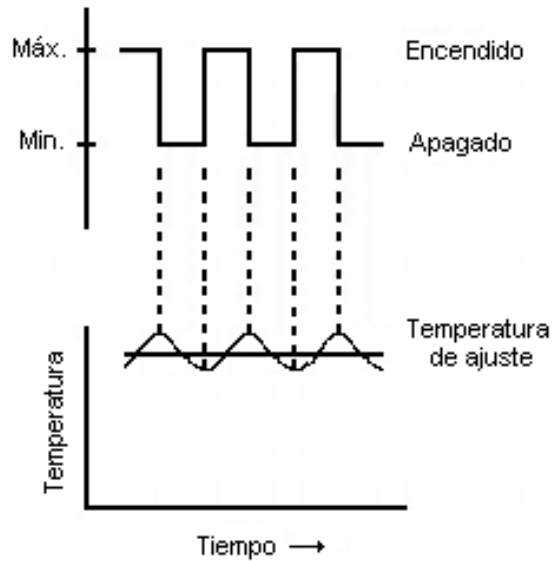


Fig. 18 Respuesta temporal de la temperatura en un sistema de control tipo ON-OFF.

2.4 El Microcontrolador

Para el estudio de este tema, nos basamos en el texto de Paul Aguayo S. del 2004 titulado “Introducción al Microcontrolador” [7].

El microcontrolador es un dispositivo electrónico, es decir, un solo circuito integrado capaz de llevar a cabo procesos lógicos. Estos procesos o acciones, se programan en lenguaje ensamblador por el usuario y son introducidos en el microcontrolador mediante un dispositivo programador. Como se puede observar en la Fig. 19, existe una gran variedad de microprocesadores con diferente cantidad de pines, estos pueden trabajar con instrucciones que van desde los 8 hasta los 64 bits.



Fig. 19 Microcontroladores

2.4.1 Tipos de Arquitecturas de los Microcontroladores

2.4.1.1 Arquitectura Von Neumann

En este tipo de estructura, la unidad central de proceso (CPU), está conectada a una memoria única donde se guardan las instrucciones del programa y los datos (ver Fig. 20). El tamaño de la unidad de datos o instrucciones lo fija por el ancho del bus que comunica la memoria con el CPU.

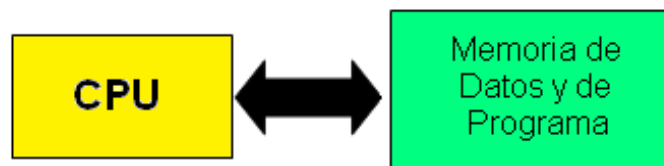
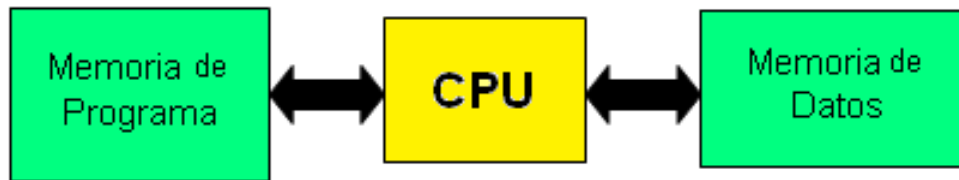


Fig. 20 Arquitectura Von Neumann.

2.4.1.2 Arquitectura Harvard.

La arquitectura Harvard, por medio de dos buses diferentes conecta la unidad central de proceso (CPU) a dos memorias como se puede ver en la Fig. 21. Una de las memorias contiene solamente las instrucciones del programa (Memoria de Programa) y la otra, sólo almacena datos (Memoria de Datos). Ambos buses son totalmente independientes y pueden ser de distintos anchos. Además, al ser estos independientes, el CPU puede acceder a los datos para completar la ejecución de una instrucción y al mismo tiempo leer la siguiente acción que deberá ejecutarse.



2.4.2 Estructuras y Elementos Principales de los Microcontroladores

2.4.2.1 El Procesador

Se encarga de direccionar la memoria de instrucciones, recibir el código de operación (OP) de la instrucción en curso, codificarlos y ejecutar la operación que indica la instrucción, así como la búsqueda de los operandos y el almacenamiento del resultado. Existen tres clases en cuanto a la arquitectura y funcionalidad de los procesadores actuales:

- a) **CISC** (Complex Instructions Set Computer), disponen de más de 80 instrucciones en su repertorio, algunas de las cuales son muy sofisticadas y potentes, requiriendo muchos ciclos de máquinas para su ejecución.
- b) **RISC** (Reduced Instructions Set Computer), el repertorio de instrucciones es muy reducido y las instrucciones son simples, generalmente, se ejecutan en un ciclo.
- c) **SISC** (Specific Instruction Set Computer), el juego de instrucciones es reducido y específico, o sea, las instrucciones se adaptan a las necesidades de la aplicación prevista.

2.4.2.2 La Memoria

En los microcontroladores la memoria de instrucciones y datos está integrada en el propio chip. Existen dos tipos de memoria:

- a) **ROM** (Read-Only Memory), esta es no volátil, tiene una capacidad de trabajo comprendida entre 512 bytes y 8 kbytes y se destina a contener un único programa de trabajo, el cual gobierna la aplicación. Existen cinco versiones de memoria no volátil que se pueden encontrar en los microcontroladores del mercado: ROM con máscara, OTP (One Time Programmable), EPROM, EEPROM (Erasable Programmable Read Only Memory), E²PROM o E²PROM (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory) y FLASH.
- b) **RAM** (Random Access Memory), este tipo de memoria es volátil, con una capacidad de trabajo comprendida entre 20 y 512 bytes y sólo debe

guardar las variables y los cambios de información que se produzcan en el transcurso del programa.

2.4.2.3 Los Pines de Entrada y Salida (I/O)

Todos los microcontroladores, tienen un número variable de pines que cumplen funciones de alimentación, comunicación y control. Por lo general, los pines se agrupan de ocho en ocho formando puertos. Algunos de ellos son destinados a soportar líneas de entradas y salidas digitales, cargando un “1” ó un “0” en el bit correspondiente de un registro destinado a la configuración del puerto.

2.4.2.4 El Reloj Principal

Todos los microcontroladores disponen internamente de un circuito oscilador denominado Reloj Principal, el cual genera una onda cuadrada de alta frecuencia, para definir el tiempo usado en la sincronización de todas las operaciones del sistema. Ese reloj es el motor del sistema y el que hace que el programa y los contadores avancen.

Para que el circuito genere las oscilaciones necesitan unos pocos componentes exteriores para seleccionar y estabilizar la frecuencia de trabajo. Dichos componentes suelen ser un cristal de cuarzo junto a elementos pasivos, resonador cerámico o una red R-C.

2.4.2.5 Recursos Especiales

Los microcontroladores comúnmente tienen incorporados los recursos que a continuación de detallan:

2.4.2.5 1 El Temporizadores (Timers)

Este recurso se puede emplear como reloj para obtener períodos de tiempo o como contadores para llevar la cuenta de eventos que suceden en el exterior del microcontrolador. Para que el temporizador cumpla su función se carga un registro con un valor adecuado (valor numérico en una posición fija en la memoria) y a continuación dicho valor se va a incrementar o decrementar hasta desbordarse el temporizador.

2.4.2.5.2 Conversor Análogo-Digital (CAD ó A/D)

Este se encarga de procesar las señales analógicas que entren en el microcontrolador, transformándolas en datos digitales. Los microcontroladores con este recurso suelen disponer de un multiplexor, el cual permite aplicar a la entrada del CAD diversas señales analógicas desde los pines del circuito integrado.

2.4.2.5.3 Puertas de Comunicación

Algunos modelos disponen de recursos que permiten la comunicación con otros dispositivos externos, se destacan:

- a) **UART:** adaptador de comunicación serial síncrona.
- b) **USART:** adaptador de comunicación serial síncrona y asíncrona.
- c) **PSP (Puerto Paralelo Esclavo):** comunicación paralela controlada externamente.

- d) **Bus I²C**: tiene dos líneas para transmitir la información: una para los datos y otra para la señal del reloj. La versión 1.0 data del año 1992 y la versión 2.1 del año 2000, su diseñador es Philips.

2.5 La Termocupla

Este dispositivo es usado para medir temperatura, consiste en un arreglo de dos alambres de diferentes materiales, soldados por un extremo. Se pueden encontrar una gran cantidad de materiales que pueden combinarse para obtener distintos tipos de termocuplas (ver apéndice A). La base del funcionamiento de este sensor es el efecto Seebeck, descubierto en 1821 por Thomas Jhoann Seebeck. Este efecto consiste en la producción de una diferencia potencial dependiente de la temperatura entre los alambres, al calentarse la unión [8].

La fabricación de una termocupla, incluye la construcción de una tabla de valores donde se relaciona el voltaje y la temperatura o una ecuación que represente el comportamiento del valor del voltaje en función de la temperatura. Las ecuaciones que rigen el comportamiento de una termocupla tienen validez solo en un rango limitado de temperatura. Uno escoge según el rango de temperatura en el que se encuentra el sistema; el tipo de termocupla con la que se va a trabajar [8].

2.6 El Horno de Microondas

Es un espacio hueco cerrado con paredes metálicas, que conforma una cavidad electromagnética multimodo. En esta cavidad se reciben las microondas emitidas por un magnetrón y reflejadas por las paredes de ella. Frecuentemente se construye en acero inoxidable o aluminio y tiene una puerta con una lámina perforada que permite ver a su interior, sin dejar salir las microondas al exterior del horno [9].

Los hornos de microondas domésticos operan a la frecuencia de 2,45 GHz, generando microondas de 12,24 cm, con potencia constante. Según el modelo del horno, normalmente esta potencia esta comprendida en un rango entre 500 a 1100 vatios [10], [11]. Como se puede observar en la Fig. 22, los elementos esenciales de los hornos de microondas son:

- El magnetrón.
- La guía de ondas.
- Un ventilador de aspas “Stirrer Blade” ó un plato giratorio.
- Transformador de alto voltaje.
- Capacitor de alto voltaje.
- Dispositivo de seguridad.
- Sistema temporizador, controlador del tiempo de calentamiento.
-

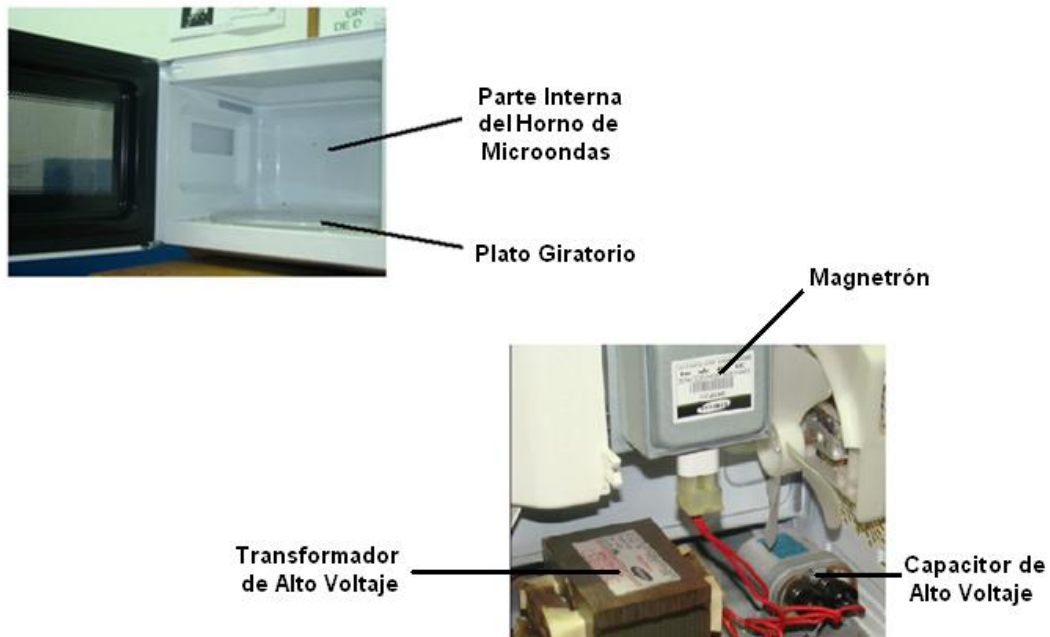


Fig. 22 Elementos principales de un horno de microondas.

2.6.1 Proceso de Calentamiento de un Horno de Microondas

Una vez que el horno es encendido, el magnetrón genera las microondas que son conducidas por la guía de ondas hasta la parte interna del horno. Al entrar en el horno se propagan en varias direcciones al chocar con las paredes o en su defecto con el ventilador de aspas “Stirrer Blade”. En el primer caso, el horno tiene un plato giratorio, que al moverse permite un calentamiento uniforme de lo expuesto a las microondas. En el segundo caso ya en desuso no hay necesidad de un plato giratorio, pero el calentamiento no es suficientemente uniforme [9].

Para evitar que el operario reciba directamente las microondas emitidas por el horno, las cuales pueden ser perjudiciales para su salud, hay varios dispositivos de seguridad [9].

2.6.2 Dispositivos de Seguridad

2.6.2.1 Interruptores de Seguridad

Para garantizar la seguridad del usuario se desactiva el magnetrón de varias maneras:

- a) En la puerta se encuentran ubicado tres interruptores (ver Fig. 23). Dos de tipo contacto que cortan la corriente que va al magnetrón, manteniéndolo desactivado mientras la puerta este abierta. El otro denominado interruptor monitor, el cual quema el fusible de la línea para cortar la energíá en caso de que los otros dos interruptores no se hallan activado [9].

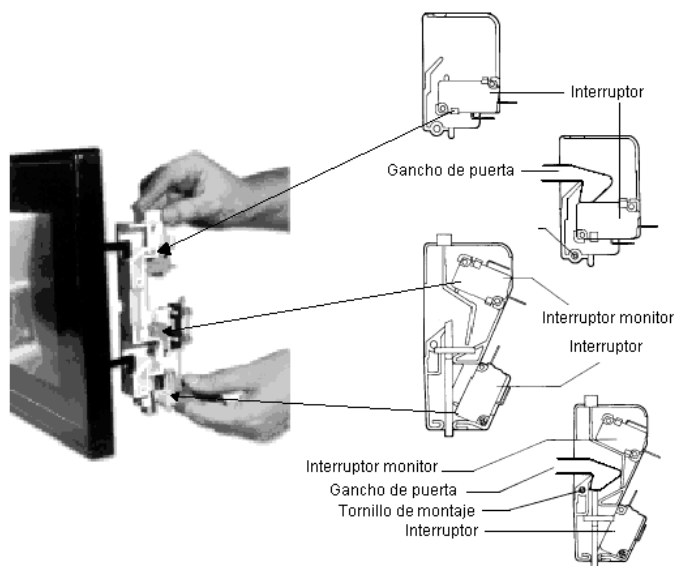


Fig. 23 Interruptores de seguridad.

- b) Cerca de la estructura metálica del horno se encuentra ubicado un sensor térmico, este se activa al calentarse más de 120°C la misma. Esto ocurre cuando por error o por desperfecto del magnetrón, se envían indefinidamente ondas al interior del horno.

2.6.2.2 Prevención de Fugas

La puerta, tiene un ventana compuesta por un vidrio refractario y una malla metálica (ver Fig. 24), que impide la fuga de emisión de microondas y facilita la vista a la parte interna del horno de las microondas.

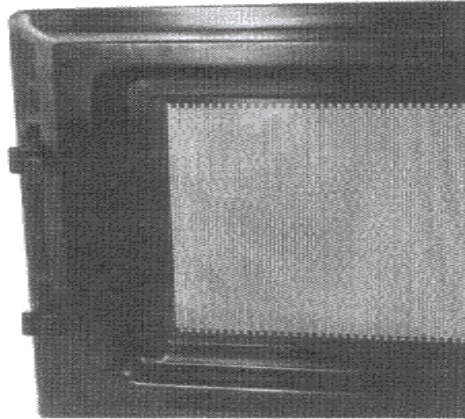


Fig. 24 Malla metálica.

2.7 El Magnetron

Es un tubo electrónico tipo diodo, que se emplea para producir ondas electromagnéticas de frecuencias de 2,45 GHz. Las configuraciones exteriores de los magnetrones, varían según la marca y el modelo, pero la estructura básica interna (Ver Fig. 25) siempre es la misma y la compone: el bloque del ánodo, un filamento, una antena, dos imanes permanentes y el soporte de la estructura [12].

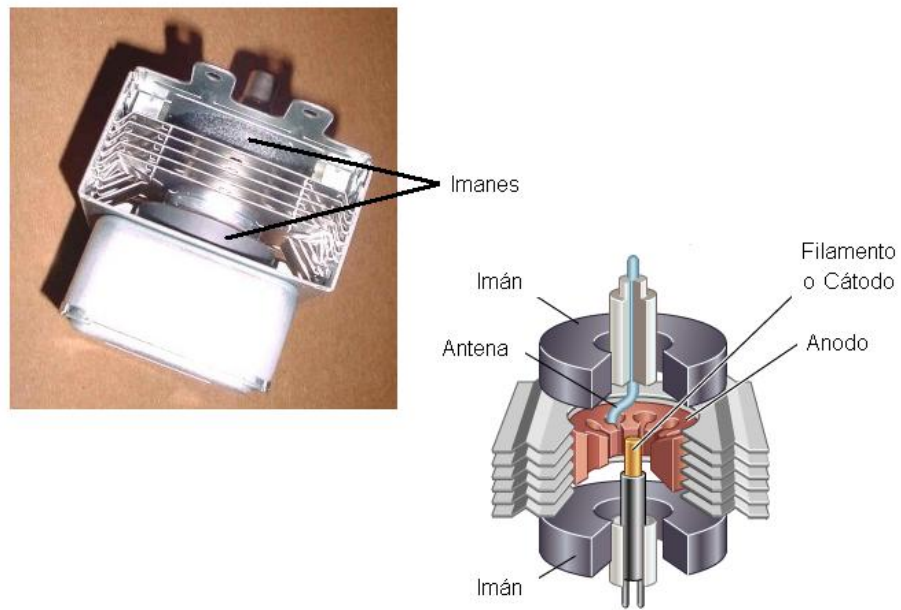


Fig. 25 Estructura básica de un magnetrón

2.7.1 Estructura Básica de un Magnetrón

2.7.1.1 El Bloque de Ánodo

Es un bloque cilíndrico, con un número par de segmentos que se extienden hacia adentro, formando entre ellos las cavidades de resonancia (ver Fig. 26). El mismo es fabricado de cobre sólido

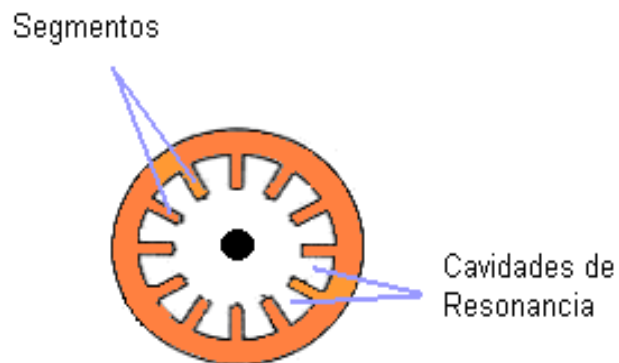


Fig. 26 Bloque de ánodo

El número de cavidades varían desde 8 hasta 20 y pueden ser de diferentes formas (ver Fig. 27). Estas determinan la frecuencia de salida del magnetrón y están conectadas en paralelo con respecto a la salida.

Clase de Cavidades:

- a) Ranura.
- b) Paleta.
- c) Levantamiento de sol.
- d) Agujero y ranura.

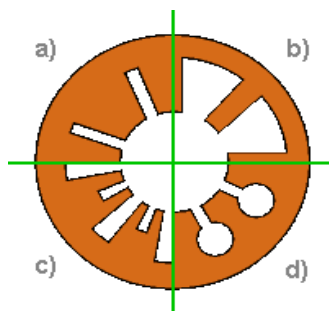


Fig. 27 Tipos de cavidades.

2.7.1.2 El Filamento

Esta ubicado en el centro del bloque de ánodo, conectado al polo negativo de la fuente de alimentación y sirve como cátodo; tiene una camisa metálica para uniformizar su calentamiento y emisión de electrones (ver Fig. 28).

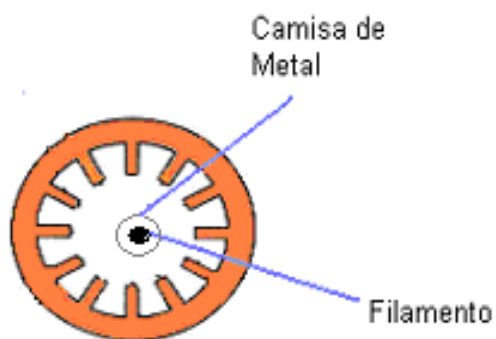


Fig. 28 El filamento.

2.7.1.3 Los Imanes

Estos son permanentes, están ubicados por encima y por debajo del magnetrón para que se genere un campo magnético paralelo al filamento (ver Fig. 29).

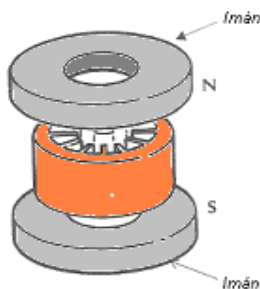


Fig. 29 Los imanes permanentes

2.7.1.4 La antena

Es una sonda o espira, conectada a una de las estructuras resonantes del bloque de ánodo. Esta se encuentra acoplada a una guía de ondas por donde se transmiten las microondas (ver Fig. 25).

2.7.2 Generación de Microondas Mediante un Magnetron

Un circuito calienta el filamento y la camisa, al punto de emitir electrones (efecto termoiónico) (Fig. 30). Debido a una diferencia de potencial de unos 4KV entre el elemento de calefacción (cátodo) y el ánodo, se aceleran los electrones entre ellos [9], [12].

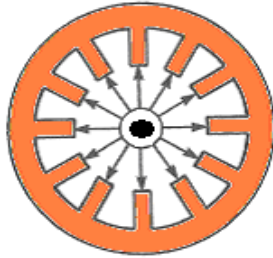


Fig. 30 Trayectoria de los electrones en ausencia de campo magnético.

El campo magnético producido por los imanes, alcanza aproximadamente 1000 G, hace que los electrones sigan una trayectoria en forma de espiral, esta desviación de los electrones depende de la intensidad del campo magnético, como se puede observar en la Fig. 31. Los electrones, viajan con una trayectoria curva, volviendo a su punto de partida sin tocar el ánodo, ya que el campo es suficientemente intenso [9], [13].

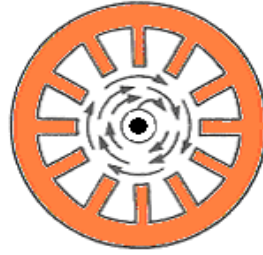


Fig. 31 Trayectoria de los electrones debido un campo magnético.

Cuando un electrón se aproxima a uno de los segmentos entre las cavidades, se induce una carga positiva en ese segmento, pero conforme pasa y se va alejando esa carga positiva se reduce. Sin embargo; el electrón al continuar su trayectoria hará lo mismo en el siguiente segmento, quedando ahora el anterior polarizado negativamente. Por lo tanto, se induce una corriente alterna en las cavidades. Cuando se produce éste efecto, las cavidades ahora serán cavidades resonantes. Este efecto lo podemos visualizar como circuitos resonantes, constantemente excitados (Ver Fig. 32). Como se ve en la misma figura, los circuitos están conectados entre si [9], [13].

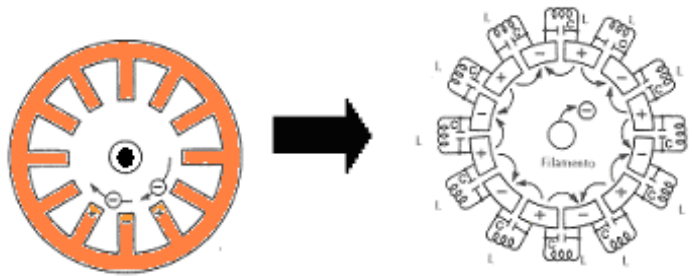


Fig. 32 Visualización del los segmentos del ánodo como circuitos resonantes.

En la operación normal del magnetrón, los electrones se concentran, girando influenciados por la fuerza del alto voltaje y el campo magnético, formando un patrón semejante a una rueda dentada que gira alrededor del cátodo como se puede ver en la Fig.33 [9], [12].

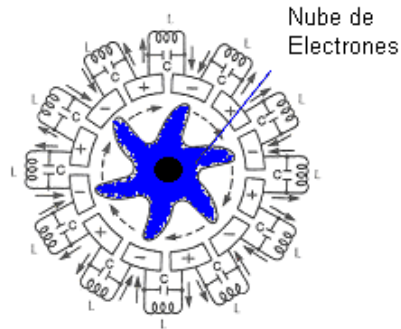


Fig. 33 Nube de electrones.

Esta nube de electrones, actúa como una fuente de alimentación de las cavidades, las cuales generan de esta manera una oscilación continua y uniforme; a su vez, la energía generada en este proceso se libera por la antena. Esto ocurre cuando los electrones de la antena viajan hacia arriba y hacia abajo a la frecuencia de las cavidades resonantes, originándose alrededor de ella una onda electromagnética a la frecuencia 2,45 GHz (microondas) que se transporta mediante una guía de onda al interior del horno [9], [12].

2.8 Las Microondas

Las microondas, son ondas electromagnéticas producidas por dispositivos electrónicos como el magnetrón, el Klystron y los diodos Gunn y se representan como un campo eléctrico y otro magnético con oscilaciones sinusoidales que están en fase. Como se puede observar en la Fig. 34, los campos están perpendiculares entre sí y también con respecto a la dirección de propagación.

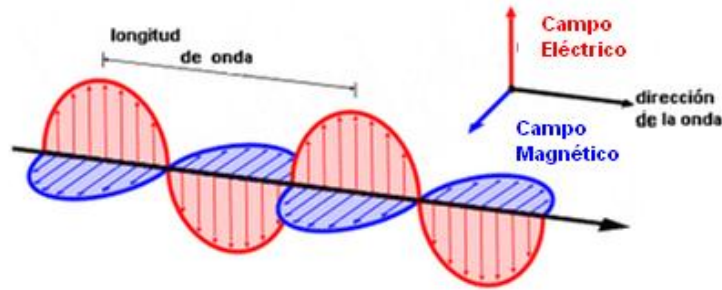


Fig. 34 Onda electromagnética

Este tipo de ondas electromagnéticas son de alta frecuencia, situadas entre los 300 MHz (3×10^8 Hz) y los 300 GHz (3×10^{11} Hz). Tienen una longitud de onda muy corta, que van aproximadamente desde 1mm (10^{-3} m) hasta 1 m. Las podemos ubicar en el espectro electromagnético entre las ondas de radios y el infrarrojo (ver Fig. 35) [14].

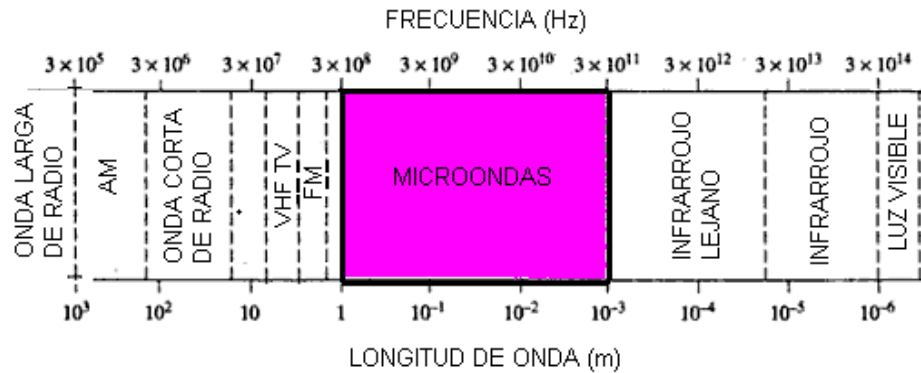


Fig. 35 Ubicación de las microondas en el espectro electromagnético.

2.8.1 Mecanismos de Calentamiento en Fluidos Mediante Radiaciones de Microondas

El calentamiento en la materia se efectúa mediante dos mecanismos, estos son causado por el campo eléctrico de las radiaciones microondas,:

2.8.1.1 Mecanismo de Rotación Dipolar

Dependiendo de la condición de polaridad de las moléculas, cuando el campo eléctrico de la radiación, interactúa con ellas y hace girar sus dipolos tanto en sentido horario como antihorario (ver Fig. 36), de manera que los momentos dipolares eléctricos se alinean con el campo eléctrico de las microondas; originando así la rotación de la molécula a la misma frecuencia de la radiación. Por la acción las colisiones entre las moléculas y las interacciones entre campos eléctricos y magnéticos locales, aumenta la energía cinética de las moléculas generándose el calentamiento instantáneo y uniforme de los materiales [15], [16], [17].



Fig. 36 Rotación dipolar.

2.8.1.2 Mecanismo de Desplazamiento Iónico

Si una sustancia o material contiene iones libres o especies iónicas, el campo eléctrico de la radiación los hará oscilar a gran velocidad, transformando la energía cinética en calor.

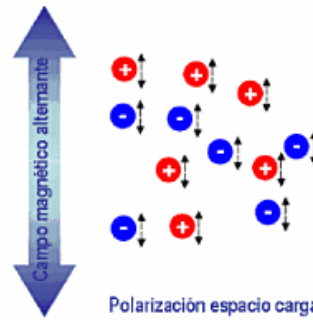


Fig. 37 Desplazamiento iónico.

2.8.2 Influencia de la Constante Dieléctrica en el Calentamiento (ϵ')

El mecanismo de transferencia de energía que se produce por las radiaciones, se explica mediante las pérdidas dieléctricas, lo cual hace que la constante dieléctrica de los materiales influya en su calentamiento. El factor de disipación ($\tan \delta$), es una medida de la capacidad que tiene un materia para transformar la energía electromagnética en calor, expresado como la relación entre el factor de pérdida dieléctrica (ϵ'') y la constante dieléctrica (ϵ'), ver Ec. 6. Por lo tanto los materiales con constante dieléctrica alta tienden a calentarse más rápido que los materiales con constante dieléctrica baja en presencia de las microondas.

$$Tg(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad \text{Ec. 6}$$

El factor de disipación y la constante dieléctrica son característica de cada material y dependen de la temperatura. En la tabla 1 se pueden observar los valores de algunos materiales. Dichos valores fueron tomados a 25 °C y a radiación electromagnética con frecuencia de 3GHz [18].

Material	ϵ'	ϵ''	$\tan \delta \cdot 10^4$
Agua	76,7	12,0419	1570
Etanol	6,5	1,625	2500
n-propanol	3,7	2,479	6700
Etilenglicol	12,0	12,0	10000
Tetracloruro de carbono	2,2	0,00088	4
Heptano	1,9	0,00019	1

Tabla 1 Algunos materiales y sus constantes dieléctricas.

2.8.3 Comportamiento de Distintos Materiales Frente a las Microondas.

Este contenido fue extraído de la siguiente texto titulado “Ejemplos de Diseños de Guías de Ondas” [10].

2.8.3.1 Materiales Metálicos

Al incidir las microondas perpendicularmente sobre la superficie de un metal, el campo eléctrico moverá rápidamente los electrones produciendo un calentamiento instantáneo. Desde otro punto de vista el campo magnético producirá una inducción de corriente de Foucault (corriente eléctricas circulares inducidas) que producirán calentamiento ohmico.

2.8.3.2 Materiales Eléctricamente Neutros

En este tipo de materiales, no hay dipolos eléctricos presentes y las microondas pasan sin causar ningún efecto, es decir, son transparentes a las microondas y por lo tanto no se calientan, algunos de ellos son: el vidrio, la cerámica, el teflón y el papel, entre otros.

2.8.3.3 Materiales con Configuración Dipolar.

Los dipolos eléctricos de estos materiales absorben las microondas y en consecuencia se calientan. Ejemplos de ellos el agua, las grasas, las albúminas y los hidratos de carbono.

3.1 Sistema de Control Automatizado.

El sistema de control consta de un microcontrolador **PIC16F877A** de la compañía **Microchip Technology Inc.** que trabaja con una serie de instrucciones codificadas, este es el componente principal del sistema ya que es el encargado del realizar el control. El usuario puede interactuar con el sistema a través de una comunicación vía puerto serial, creada a través de un programa diseñado con el software Visual Basic 6.0. A continuación se presenta un diagrama de flujo que muestra la interacción entre el usuario y el sistema ver Fig. 38

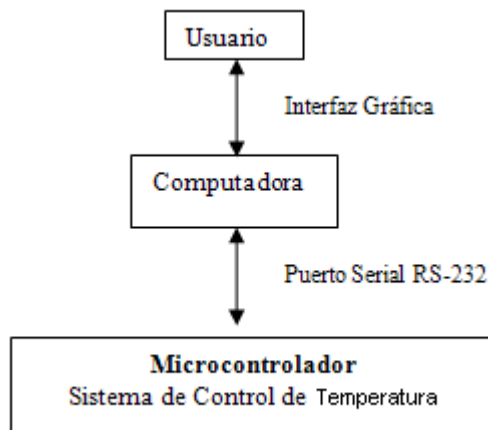


Fig. 38 Diagrama de flujo de la interacción PC-usuario

Para los fines de este proyecto se elaboró un sistema de control de tipo ON-OFF en lazo cerrado, (Ver Fig. 39) y se diseñó un programa para la graficación del comportamiento de la temperatura a lo largo del proceso. Al aplicar dicho programa se incluye al sistema de control una acción proporcional derivativa ya que se tomó en cuenta, que el sistema físico es bastante rápido al calentar y la temperatura experimenta constantes cambios y se busca regular la velocidad de calentamiento.

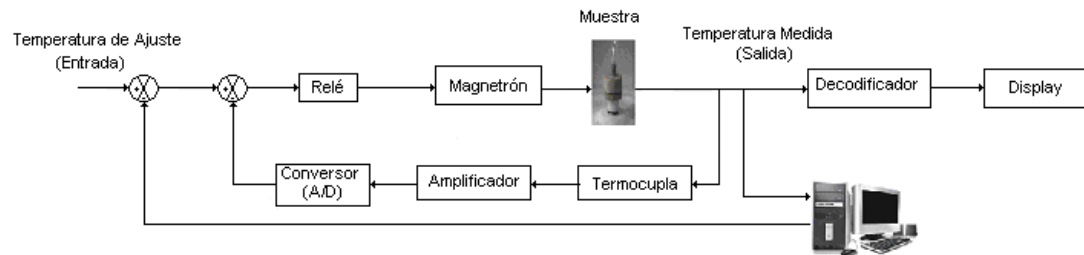


Fig. 39 Diagrama de bloques del sistema de control automatizado

Como se explico en el capitulo 2, sección 2.3, la temperatura de ajuste (entrada) se compara con la temperatura medida para calcular la diferencia entre ellas. Luego, se envía una señal de control al relé para que este active al magnetrón. La temperatura medida por la termocupla se amplifica y convierte en una señal digital, antes de ser comparada con la entrada.

La temperatura medida se visualiza tanto en un computador como en un display. En este último caso los datos de la temperatura son previamente convertidos en números decimales por el controlador.

3.2 Funcionamiento del Sistema de Control de Temperatura

Se presenta de forma esquemática en la Fig. 40 el diagrama de flujo del funcionamiento de control del ON-OFF en lazo cerrado.

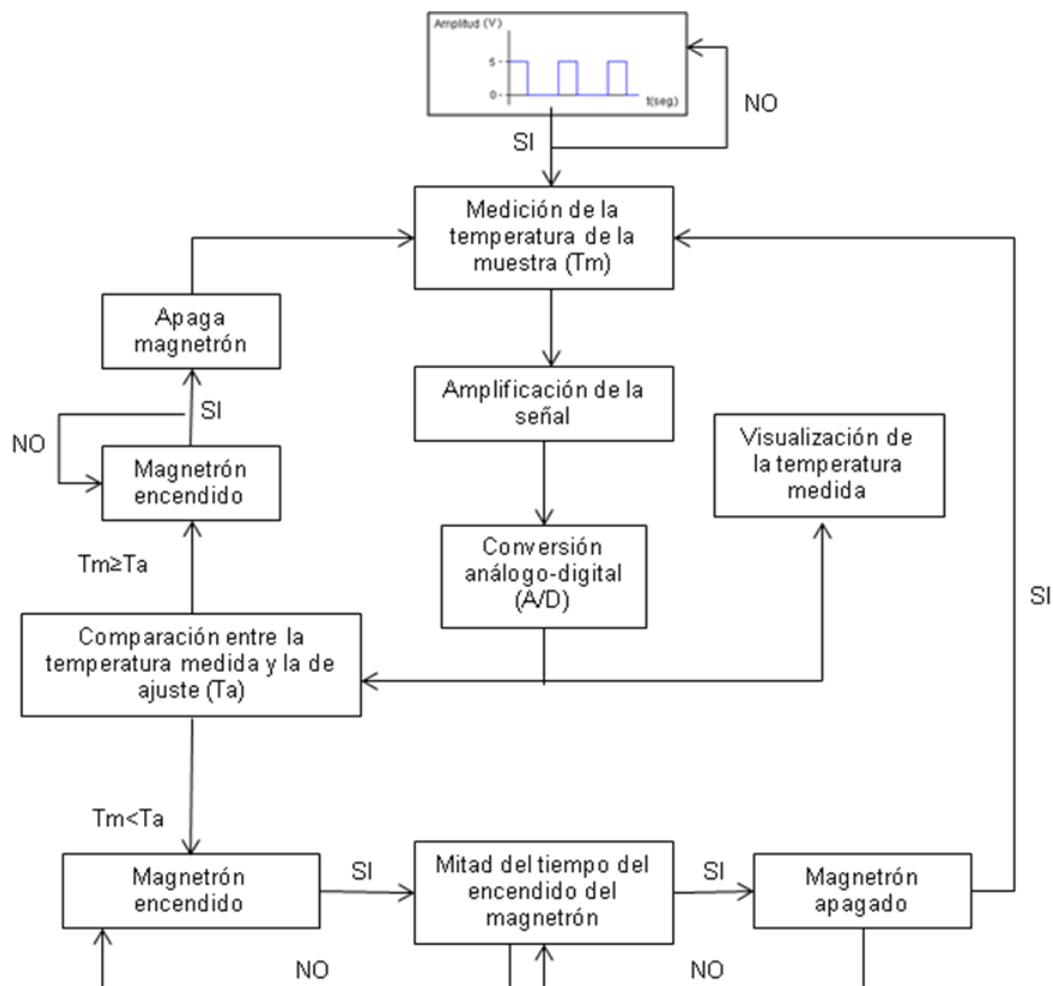


Fig. 40 Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de control. Durante el calentamiento, el microcontrolador revisa continuamente, por seguridad, si se ha cumplido el tiempo completo fijado para calentar, dicha revisión la hace en tres etapas.

Para iniciar el control, el operador del sistema debe colocar en el horno el tiempo que durara el experimento y activarlo. En ese momento el sistema recibe una señal cuadrada de 5 V de amplitud y 60 Hz de frecuencia de (ver Fig. 41), esto con el fin de tener un reloj más lento comparado con el reloj del microcontrolador, ya que este trabaja a una frecuencia de 4 Mhz. La señal cuadrada se obtiene al pasar los 60

Hz de la línea doméstica, por un optoacoplador. Este es un circuito integrado que consta de un fotodiodo y un fototransistor, el usado en esta ocasión es el 4N35.

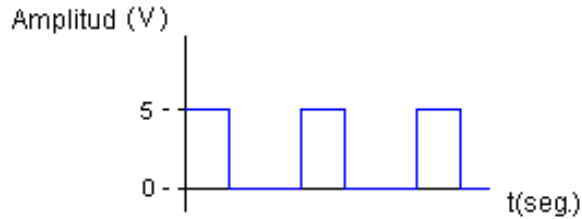


Fig. 41 Señal cuadrada de 60Hz.

Podemos observar en Fig.42 que la señal de la línea doméstica pasa por un diodo y una resistencia de $22\text{ K}\Omega$; de 1watio de potencia, con esto se limita la corriente a la necesaria para que el fotodiodo emita luz para saturar el fototransistor. Al tener en el colector del fototransistor una resistencia de $10\text{ K}\Omega$ y conectada a 5V obtenemos una señal cuadrada positiva de 5V.

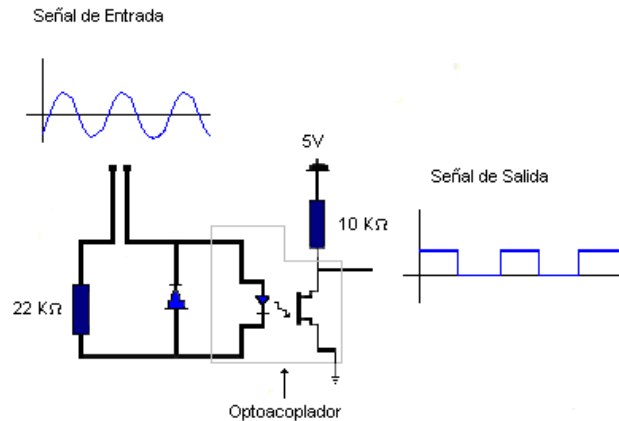


Fig. 42 Transformación de la señal sinusoidal

Se puede dividir el funcionamiento del sistema de control en dos etapas: una de adquisición y codificación; la otra de corrección de temperatura de la muestra.

Esta corrección depende de dos factores, la comparación entre la temperatura medida y la deseada (setpoint), así como la variación del tiempo de calentamiento.

3.2.1 Etapa de Adquisición y Codificación de la Temperatura.

En esta etapa se mide la temperatura de la muestra, al medir la temperatura trabajamos con una señal analógica de amplitud muy pequeña (mV). Por lo tanto, debe ser amplificada y luego convertida por el microcontrolador en una señal digital.

3.2.1.1 Medición de la Temperatura

Para la medición de la temperatura se usa una termocupla tipo K ya que se desea, en lo inmediato, sintetizar zeolita y esto se logra a un rango de temperatura entre 25 °C y 250 °C, además esta elección se hizo por su fácil adquisición. La termocupla es introducida en el horno de microondas por un agujero abierto en el centro del mismo, hasta llegar a la muestra localizada en el interior de reactor fabricado de teflón, material transparente a las microondas. El agujero es lo suficientemente pequeño ($3 \pm$ mm.) como para evitar fugas de ondas en cantidades nocivas.

3.2.1.2 Amplificación de una Señal Analógica.

La señal analógica proporcionada por la termocupla, es una señal en el orden de milivoltios que varia según la temperatura de la muestra, esta es amplificada por un dispositivo LF351N. A dicho amplificador, se le hizo un arreglo de modo que cumpliera con la función de multiplicador de ganancia constante no inversor (ver Fig.42), la ganancia es calculada al sustituir los valores de R1, R2 y R3 en la ecuación que se encuentra a la derecha de la Fig.43, dando un valor igual a 273.

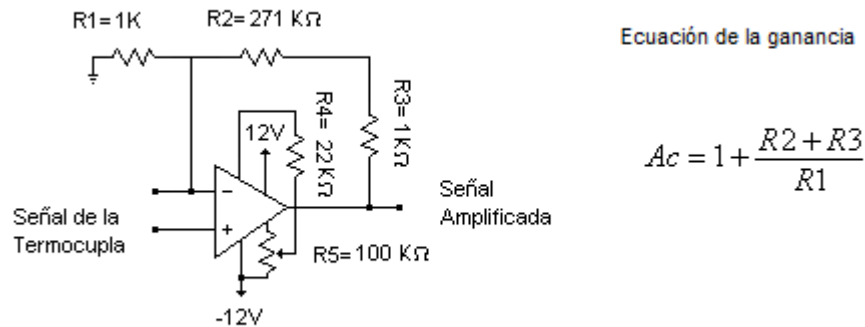


Fig. 43 Configuración de la fase de amplificación

3.2.1.3 Conversión de la Señal Analógica

La termocupla nos proporciona una señal analógica y es necesario transformarla en digital, para esto el microcontrolador tiene un conversor analógico-digital internamente. El PIC16F877 trabaja con un contador de 10 bits, controlado por las señales de un reloj que proporciona un cristal de cuarzo de 4 MHz y un comparador.

En la entrada del conversor A/D tendremos un potencial V_i del orden de mV proveniente de la señal analógica y a la salida un potencial en escalera V_o (ver Fig.44); cada salto de ésta señal corresponde a un incremento dado de voltaje. El potencial V_i es comparado con un potencial fijo proveniente de un regulador LM723, cuando $V_i = V_o$ el comparador varía del estado lógico 0 al 1 deteniendo al contador para la próxima lectura de la señal analógica.

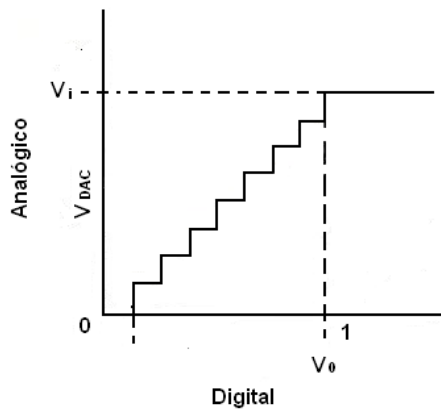


Fig. 44 Señal digitalizada

3.2.2 Etapa de Corrección de la Temperatura

3.2.2.1 Comparación Entre la Temperatura de la Muestra y la Temperatura de Ajuste (Setpoint)

En esta etapa se compara la temperatura de la muestra que se obtuvo en la etapa de adquisición y codificación, con la temperatura a la cual se desea que se mantenga la muestra colocado por el usuario. Dependiendo del resultado de la comparación entre las temperaturas, el magnetrón se enciende o se apaga.

Si el setpoint está por encima de la temperatura medida, el magnetrón se enciende y calienta la muestra hasta que la temperatura de ella aumenta y se iguale a la deseada y si el setpoint se encuentra por debajo de la temperatura medida, el magnetrón se apaga hasta que la muestra, pierda calor y su temperatura baje igualándose a la deseada. Se espera con el diseño el error de medición sea menor a medio grado centígrado.

3.2.2.2 Variación del Tiempo de Calentamiento

La variación en el ancho ON y OFF de los trenes de pulsos cuadrados generados por el microprocesador, juega un papel importante porque al cambiarlos varía tanto el tiempo de encendido y apagado del magnetrón; y en consecuencia el tiempo de calentamiento. En nuestro caso sólo se puede variar el tiempo de encendido (ON) del magnetrón no el de apagado (OFF), este último se mantiene en 6 segundos. El programa diseñado se encarga de la variación del tiempo de calentamiento, este puede ser desde 1 a 6 segundos, dependiendo de la temperatura medida y el tiempo estipulado para llegar al setpoint y así tener una mejor corrección de la temperatura.

3.2.3 Visualización de la Temperatura Muestra

La temperatura de la muestra es mostrada en dos lugares diferentes, uno directamente en un display conectado al sistema de control y el otro es en el monitor de la computadora mediante una interna grafica.

3.2.3.1 Display

Este consiste en un circuito visualizador BCD (número binario decimal codificado) de 4 dígitos multiplexados, el cual se muestra en la Fig.45. El microcontrolador trabaja con números binarios, por tal razón, los mismos deben convertirse en dígitos comprensibles para el usuario. Para lograr este fin, se emplean cuatro dispositivos llamados “siete segmentos”, un decodificador 74LS47 que se encarga de la conversión de los números binarios y cuatro transistores 2N2907 de tipo PNP. Se habilitan ocho pines del microcontrolador como salidas, cuatro de ellos se conectan al decodificador y los otros a los transistores encargados de activar a los “siete segmentos”.

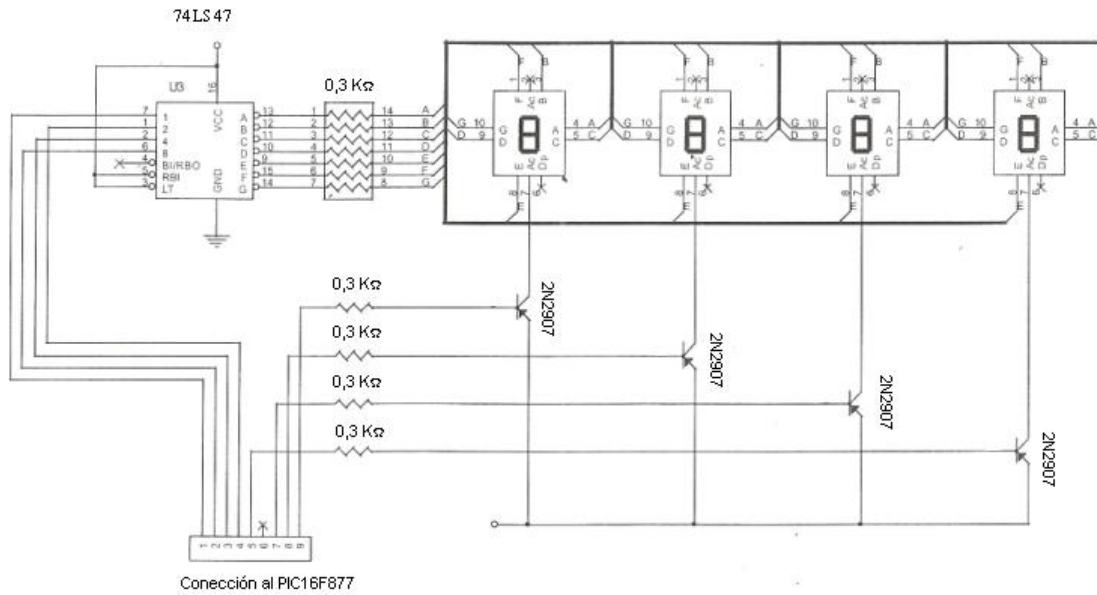


Fig. 45 Visualizador BCD de 4 dígitos multiplexados.

3.2.3.2 Computador (PC)

Para mostrar en la computadora las temperaturas medidas de una muestra (T_m), el tiempo de calentamiento y la temperatura de ajuste (T_a), se diseñó un programa en Visual Basic 6.0 y se estableció una conexión entre el microcontrolador y la computadora con un dispositivo llamado MAX232, este es conectado al puerto serial y al microcontrolador como se muestra en la Fig.46. Es importante para esta etapa, que el microcontrolador previamente se configure habilitando la transmisión, recepción y la velocidad con que los datos serán difundidos [19].

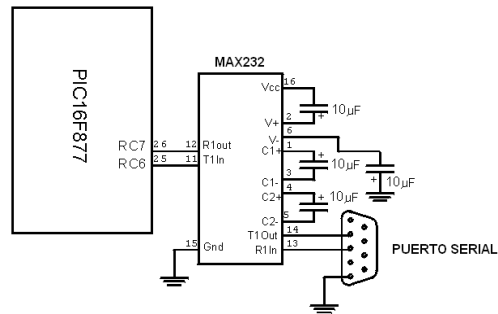


Fig. 46 Conexión del MAX232.

Se estableció un protocolo de comunicación, tanto en el programa de la interfaz gráfica como en el del microcontrolador (ver. 47). El primer bit indica quién va a enviar la información, luego el tipo de dato y por último el valor del mismo dividido en: dato alto y dato bajo.

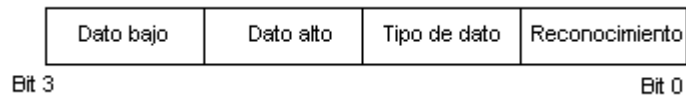


Fig. 47 Protocolo de comunicación.

3.3 Proceso de Automatización del Sistema de Control

3.3.1 Ensamblaje del Sistema Electrónico

Basando en el prototipo existente en el laboratorio, se realizó el diagrama (Ver Fig. 48) para su elaboración en protoboard (Ver Fig. 49) y finalmente ensamblarlo en baquelita (ver Fig. 50 y apéndice C). También se fabricaron los circuitos impresos del display y la de la fuente fija de 12V,-12V y 5 V (ver Fig. 51 y 52)

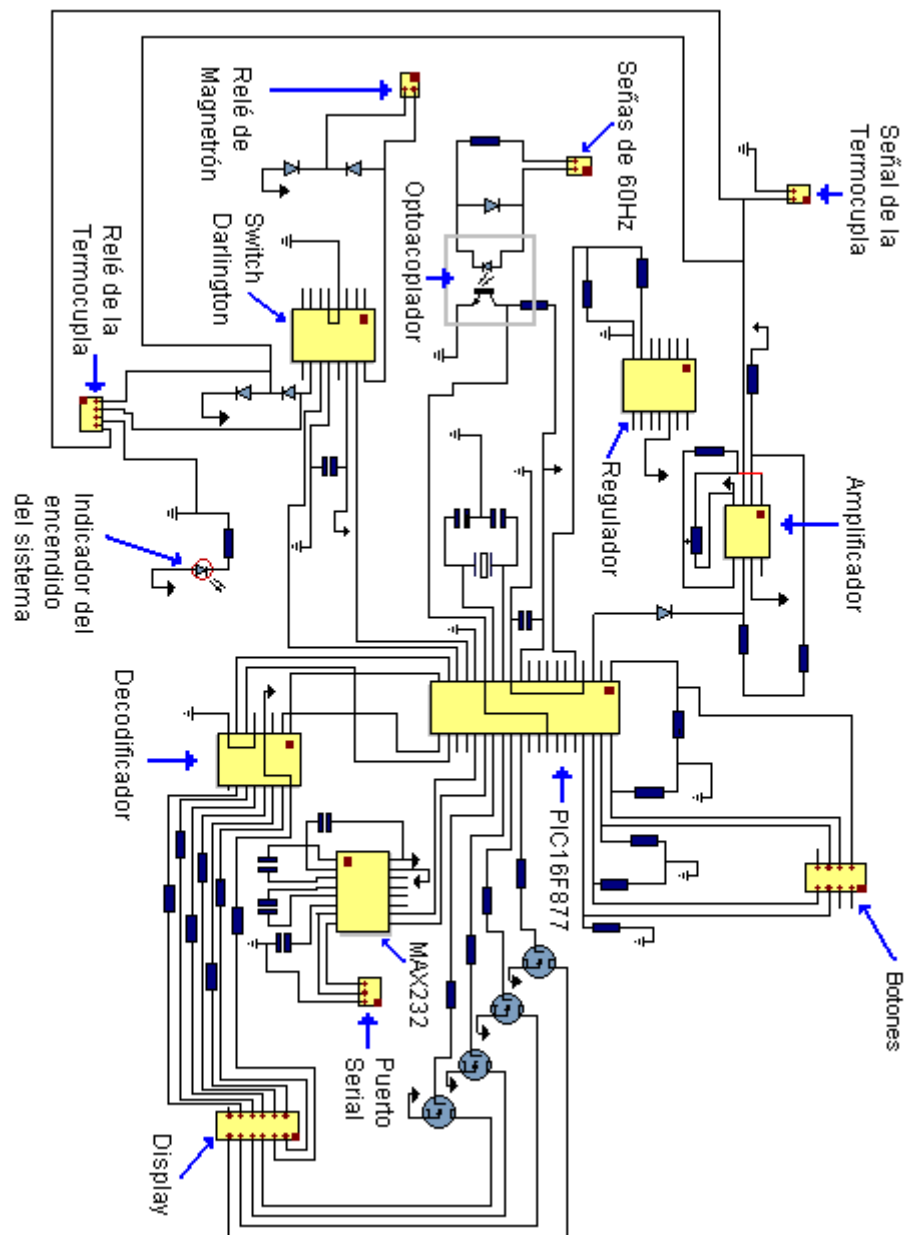


Fig. 48 Diagrama del circuito principal.

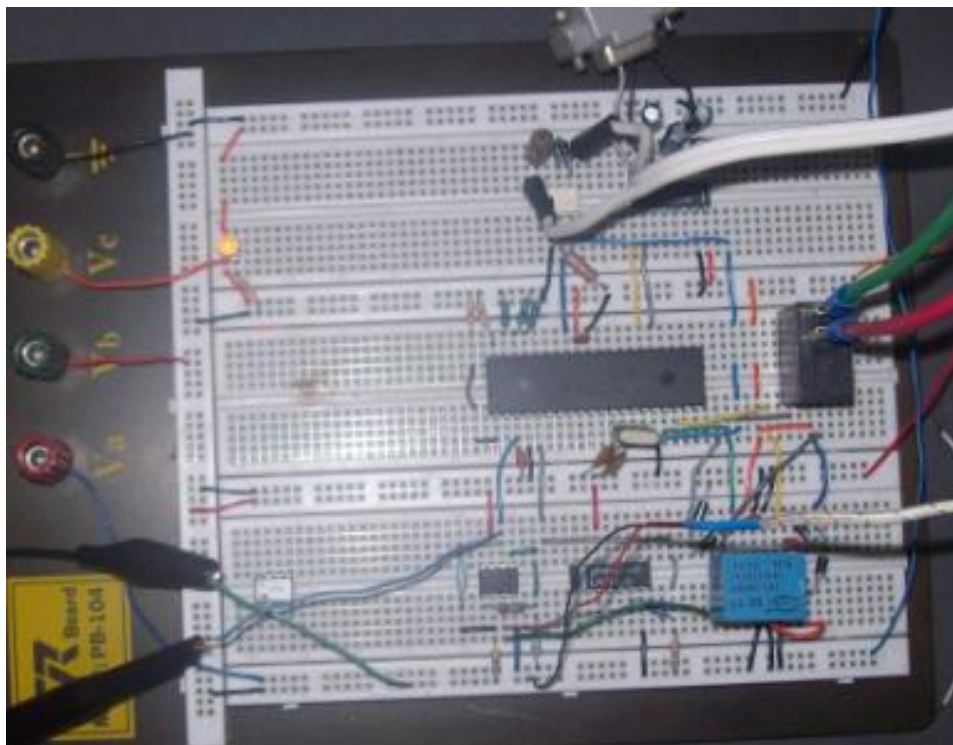


Fig. 49 Circuito principal en protoboard.

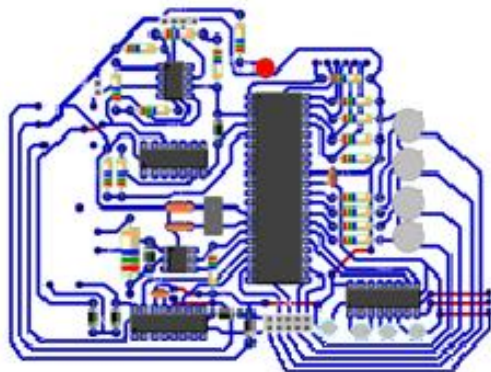


Fig. 50 Circuito principal en baquelita.

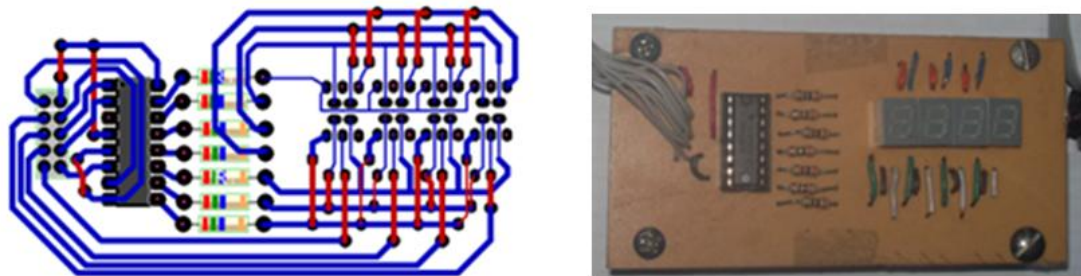


Fig. 51 Display.

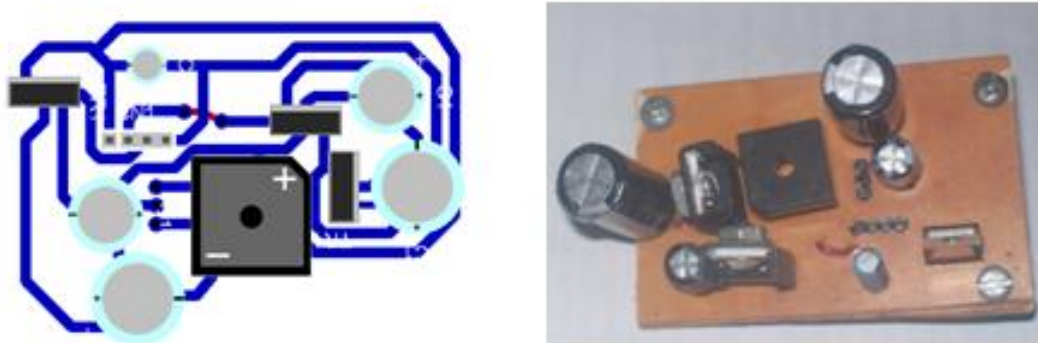


Fig. 52 Fuente Fija de 5V, 12V y -12V.

3.3.2 Diseño del Programa de Control de Temperatura

3.3.2.1 Adquisición y Graficación de la Temperatura

Se diseño un ambiente gráfico capaz de crear una curva teórica introduciendo máximo seis puntos $P_n [t(\text{minutos}), T(^{\circ}\text{C})]$, $n=0,\dots,5$ y de recibir la información de la temperatura de la muestra. Esta información es utilizada para calcular el tiempo de calentamiento que se le debe proporcionar a la muestra y es graficada para obtener la curva experimental. Los puntos $P_n(t,T)$ mencionados, definen cada secciones de la curva teórica.

En la Fig.53 se puede ver un ejemplo de la gráfica que se debe obtener al final de los experimentos, a la derecha de ella se encuentran una tabla con los valores de los puntos introducidos para crear la curva teoría. Este programa también es capaz de enviar automáticamente las temperaturas de ajustes con las cuales se van a trabajar.

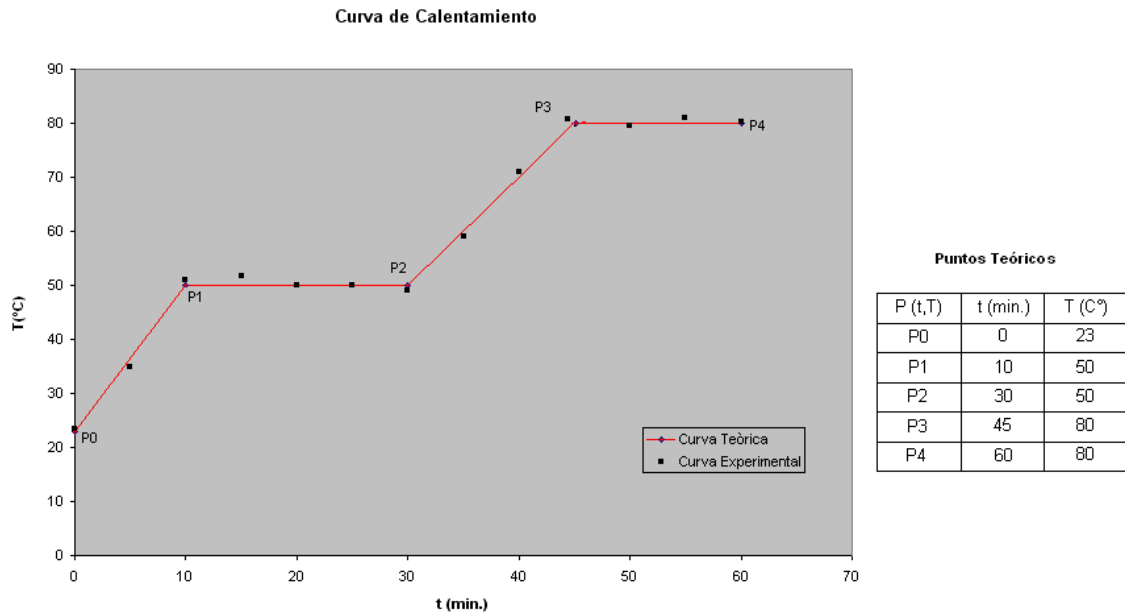
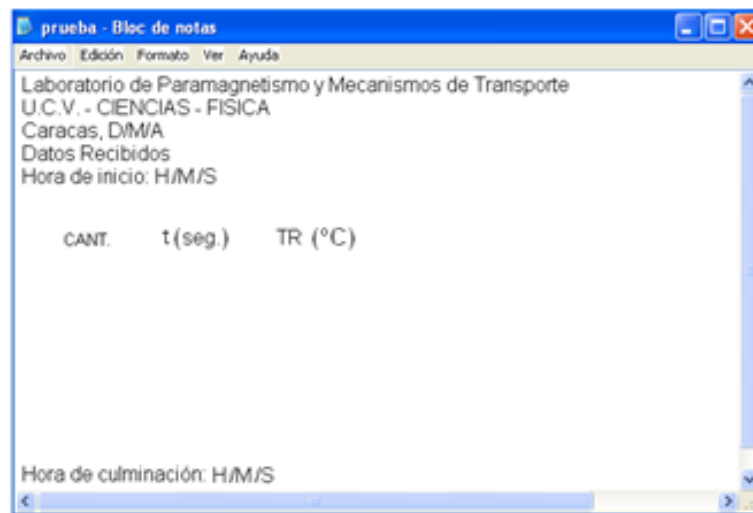


Fig. 53 Curva de Calentamiento

Los datos recibidos según en el modo en el que este trabajando el sistema de de control, serán guardados en un archivo .txt, que el usuario debe crear antes de iniciar el proceso de calentamiento (ver Fig. 54).



(a)



(b)

Fig. 54 Formato de un archivo .txt.: a) modo medición, b) modo control

El ambiente gráfico consta, como se observa en la Fig. 55, de:

- a) Una ventana grande donde se grafica la curva teórica y la experimental.

- b) Cuatros botones que cumplen con las siguientes funciones:
 - Activación y desactivación del puerto serial.
 - Graficar.
 - Borrar.
 - Salir del programa.
- c) Un espacio rotulado “datos teóricos” donde se introducen los datos correspondientes a la temperatura y al tiempo de cada etapa del calentamiento para crear la curva teórica.
- d) Un espacio titulado “datos experimentales” donde se visualiza la temperatura de la muestra, el tiempo de calentamiento y la temperatura de ajuste.
- e) En la parte superior izquierda se encuentra un panel para el acceso a la creación y apertura de archivos, así como la elección del puerto que se deberá trabajar.

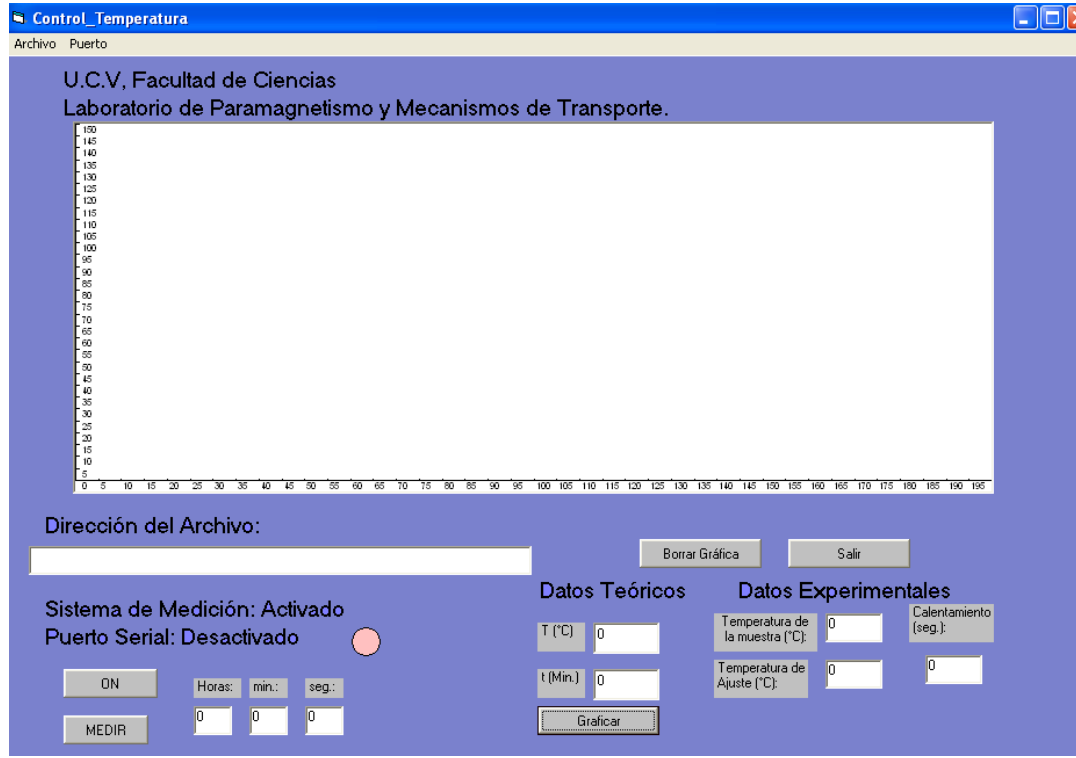


Fig. 55 Vista inicial del ambiente gráfico.

3.3.2.2 Envío de la Temperatura de Ajuste

El programa consta de cuatro relojes para realizar los envíos de las temperaturas de ajuste. Al ser cargados los puntos $P_n(t,T)$ con $n=0,\dots,5$ e iniciar el control, es enviada la primera temperatura de ajuste (temperatura asociada al punto $P_1(t,T)$ que define junto con $P_0(t,T)$ la primera sección de la curva) y es activado el primer reloj, al concluir este primer período se activa el siguiente reloj y si el siguiente punto que define la otra sección de la curva teórica, implica un cambio de temperatura esta es enviada, sino, se mantendrá constante por el tiempo que el reloj esté activo, el proceso concluye cuanto es desactivado el ultimo reloj. Cada reloj al realizar el envío es desactivo.

3.3.2.3 Control del Tiempo de Calentamiento

La curva teórica de calentamiento se divide en varias secciones, una en rampas de calentamiento y otra en plateaus de temperatura constante. Se creó una rutina para cada uno de estos dos tipos de secciones.

En las rampas de calentamiento el programa con cada punto experimental $P_j(t_j, T_j)$ recibido, actúa de la siguiente forma, ver Fig. 56:

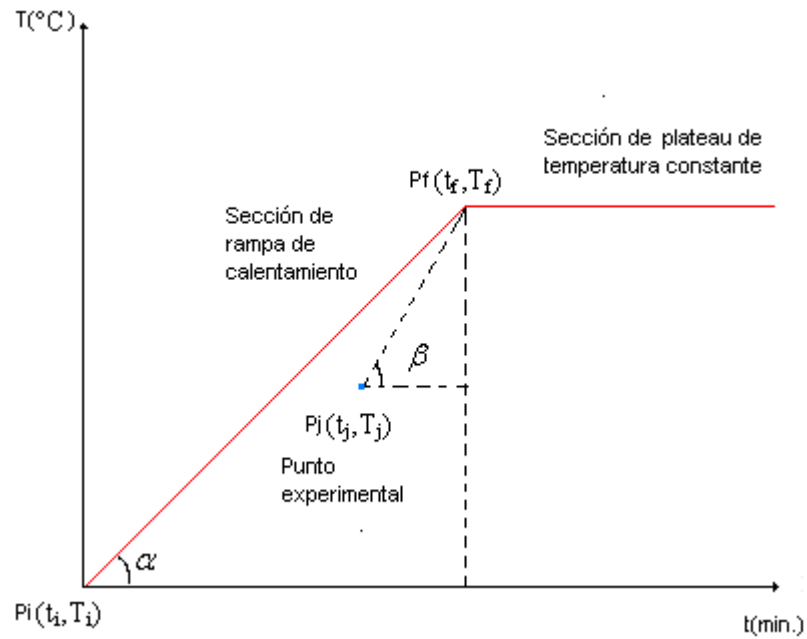


Fig. 56 Calculo de la pendiente entre una recta y un punto.

Se calcula la pendiente $P_{teórica}$ entre el punto inicial $P_i(t_i, T_i)$ y el punto final $P_f(t_f, T_f)$ de la rampa (ver Ec. 7).

$$P_{teórica} = Tg(\alpha) = \frac{t_f - t_i}{T_f - T_i} \quad \text{Ec. 7}$$

Cada punto experimental $P_j(t_j, T_j)$ recibido, tendrá una pendiente P_e con respecto a el punto teórico $P_f(t_f, T_f)$ (ver Ec. 8).

$$P_e = Tg(\beta) = \frac{t_f - t_j}{T_f - T_j} \quad \text{Ec. 8}$$

Estas pendientes son divididas y según el valor de la razón se fija un tiempo de calentamiento, el cual es enviado al sistema de control.

Para las zonas de temperatura constante, el programa resta la temperatura de ajuste con cada temperatura de la muestra que se reciba y al igual que en el caso anterior se fijan un valores de tiempo. Como $P_i = P_f$ entonces se restan $T_i - T_j$

En ambos casos, mientras menor sea el valor de la temperatura de la muestra con respecto al punto teórico correspondiente a la sección, mayor es el tiempo de calentamiento que se le proporciona a la muestra. Los valores menores de 0 no son tomados en cuenta, ya que en esa situación, el sistema mantiene apagado el magnetrón.

4.1 Aislamiento de la Termocupla

Para las pruebas realizadas, se trabajó con: un horno de microondas doméstico, dos termocuplas tipo K que traen los medidores electrónicos comerciales (tester) ver Fig. 57, dos tester, una malla metálica de blindaje que trae algunos cables, un tubo de teflón y un beaker de 250 ml.

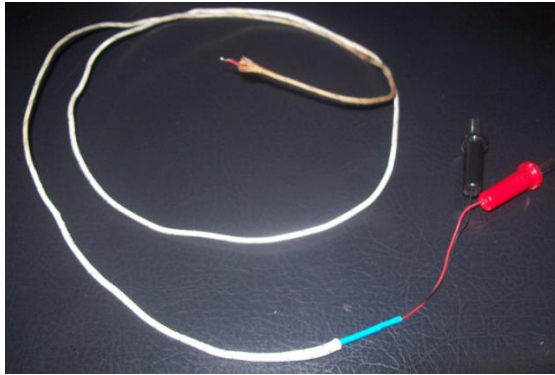


Fig. 57 La termocupla.

Prueba 1

Como se puede observar en la Fig. 57, la termocupla trae una cubierta de tela que le fue retirada, dejando libres los dos cables metálicos. Uno de los ellos fue introducido en un tubo de teflón, de manera de aislarlo (ver Fig. 58) y el otro se dejó sin cubierta. Se forraron ambos cables con adhesivo de teflón, para luego poder introducirlos en la malla metálica hasta que estos quedaran totalmente cubiertos (ver Fig. 59), la termocupla fue conectada a la tierra del horno de microondas.



Fig. 58 Detalle de la punta de la termocupla mostrando las distintas cubiertas.



Fig. 59 Termocupla cubierta con la malla metálica

Se colocó un beaker con 250 ml. de agua dentro del horno de microondas y se procedió a introducir la termocupla cubierta con la malla metálica, ésta se conectó a la tierra del horno y se introdujo por un orificio en la parte superior del mismo, de manera que la punta de la termocupla tocara el agua. Luego se procedió a calentar por

10, 20 y 30 seg. y al apagarse el horno, se leyó con los tester la temperatura medida por la termocupla cubierta con la malla metálica y por la termocupla que no se modificó ni se mantuvo dentro del horno durante el calentamiento.

Tiempo de calentamiento (seg.)	Observación
10 y 20	• No hubo aumento de la temperatura ni chispas en la malla metálica durante el proceso de calentamiento. • Ambas termocuplas leyeron la misma temperatura.
30	• El agua comenzó a hervir. • No hubo chispas en la malla metálica durante el proceso de calentamiento y se observó un leve calentamiento en la malla. • La temperatura leída con la termocupla cubierta con la malla metálica fue tres grados mayor a la leída con la otra termocupla.

Tabla 2 Observaciones de la prueba 1 del aislamiento de la termocupla.

Prueba 2

En este caso, se le retiró la malla de tela y cada cable de la termocupla fue introducido en un tubo de teflón y por último se introdujo en la malla metálica, esta fue conectada a la tierra del microondas al igual que en la prueba 1. Se colocó un beaker con agua dentro del horno de microondas y se procedió a introducir la termocupla cubierta con la malla metálica por un hueco en la parte superior del

mismo, de manera que la punta de la termocupla tocara el agua. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento que en la prueba anterior, donde se calentó 10, 20 y 30 seg., como no se observó calentamiento ni chispas en la malla metálica durante el proceso de calentamiento y ambas termocuplas leyeron la misma temperatura se decidió cambiar el agua cada vez que hervía y hacer una prueba con mayor tiempo de exposición de la termocupla cubierta a las microondas. Cada vez que se cambiaba el agua se tocaba la malla metálica para saber si se calentaba.

Tiempo de calentamiento (seg.)	Observación
180	• No hubo calentamiento ni chispas en la malla metálica durante el proceso de calentamiento. • Ambas termocuplas leyeron la misma temperatura.
240	• No hubo chispas en la malla metálica durante el proceso de calentamiento y tuvo un leve aumento de su temperatura. • La lectura de la temperatura con ambas termocuplas tuvieron una diferencia de seis grados.

Tabla 3 Observaciones de la prueba 2 del aislamiento de la termocupla.

4.2 Verificación del Funcionamiento del Sistema de Control Automatizado

4.2.1 Sistema Manual: Como se describe en el capítulo 1, sección 1.1, tanto los cambios de la temperatura de ajuste, como los anchos en los trenes de pulso encargados del tiempo de encendido y apagado de magnetrón, tienen que ser

realizados por el usuario, debiendo estar pendiente de cuando deben hacerse dichos cambios.

Una vez establecido un patrón de tiempo de encendido y apagado, el operario puede variar dicho patrón en el transcurso del experimento. Como es grabado un registro de la temperatura en función de tiempo, se le hace difícil al usuario variar el patrón de los trenes de pulsos, pudiendo proporcionar a las muestras un tiempo de calentamiento menor ó superior al necesario.

Podemos observar que a pesar de las limitaciones del sistema de control, se han podido lograr resultados bastantes satisfactorios [16], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]. A continuación se detallan dos de los trabajos investigativos mencionados, donde el resultado obtenido no fue el esperado.

a) ***Síntesis y Caracterización de Zeolita “Y” Mediante Calentamiento por Microondas.***

En esta investigación se esperaba obtener zeolita tipo Y, y el resultado fue zeolitas tipo P. Al momento de realizar las pruebas hubo dificultades en la medición de la temperatura con la termocupla y después de localizarla en varias zonas del horno, se encontró un lugar donde las inducciones de corriente eléctrica en la misma, fueron mínimas. [16].

b) ***Diseño de un Reactor para las Síntesis de Zeolita Mediante Microondas***

Se diseñó un nuevo reactor de teflón, donde se colocan las muestras (reactantes) tomando en cuenta la presión a la cual puedan llegar las mismas al ser expuestas a las ondas microondas. En las pruebas del reactor se colocó la proporción de reactivos para obtener una Zeolita

ZSM5, sin embargo se obtuvo un aluminosilicato [26]. Estos resultados muestran que es muy importante que el calentamiento este dentro de un error no mayor a 1°C, para obtener la Zeolita esperada. Este problema se tuvo en cuenta al momento de diseñar el nuevo sistema de control.

4.2.2 Sistema Automatizado: Como se menciona en la introducción, en el nuevo sistema se puede visualizar la temperatura de las muestras al ser graficada en función del tiempo durante el experimento, esto se logró desarrollando un programa el cual una vez creada una curva de calentamiento, el mismo continuamente realiza los cambios del patrón de los anchos de los trenes de pulsos y el de la temperatura de ajuste, cuando estos sean necesarios para ajustarse a la curva (capítulo 3, sección 3.3.2). De esta manera se puede saber el tiempo de calentamiento que se le debe proporcionar a las muestras, teniendo un mejor control sobre la temperatura y mejorando así, la calidad de los resultados de las pruebas realizadas, también se facilita el trabajo del usuario y se reduce el grado de error al realizar las síntesis, siendo este el objeto del presente trabajo especial de grado. La verificación del funcionamiento del sistema se realizó en dos etapas:

a) Prueba del Circuito Impreso

Para el uso del equipo se hizo una correlación entre el número mostrado por el display y la temperatura mostrada en el termómetro al calentarse un beaker con agua (Apéndice D). Durante la prueba se observó, que el magnetrón se apagaba cuando la temperatura del agua superaba la fijada en el momento y se encendía al bajar la misma, comprobándose así su funcionamiento básico.

b) Prueba a la Interfaz Gráfica

Una vez verificado el funcionamiento del sistema electrónico, se procedió a establecer la comunicación puerto serial, entre el sistema electrónico conectado al horno de microondas y el puerto serial del CPU del computador, a través de un cable conectado entre el puerto y el max232 (capítulo 3, sección 3.2.3.2).

Bajo las mismas condiciones que en la prueba del circuito impreso, se inició el programa visualizándose en la pantalla del computador la interfaz diseñada (capítulo 3, sección 3.4.1, Fig. 55), se siguieron los pasos para el manejo de dicho programa (ver Apéndice B) y se creó la curva teórica de calentamiento.

Hubo un error en las conexiones de las tierras produciendo daños al sistema electrónico, al magnetrón y al puerto serial del CPU de la computadora, durante la prueba. Posteriormente se verificó el funcionamiento de los dispositivos de los tres circuitos impresos, observándose únicamente daños en el circuito principal (capítulo 3, sección 3.3.1, Fig. 50), el cual fue reparado soldando un cable para unir nuevamente la pista dañada (ver Fig. 60) y remplazado el microcontrolador y el max232, sin embargo, no se localizó la falla, produjo que se dañaran de nuevo los dispositivos antes mencionados, lo cual impidió ser usado nuevamente al realizar las pruebas necesarias para la culminación de este trabajo.



Fig. 60 Daño en el circuito impreso.

Como consecuencia de esta eventualidad, el circuito impreso y el horno no pudieron ser usados nuevamente y se optó por realizar las pruebas del programa con el sistema electrónico creado inicialmente en el protoboard (capítulo 3, sección 3.3.1 Fig. 49). Se simularon dos tipos de sistemas físicos:

- a) Entre soportes refractarios se fijó un reflector de 100W y aproximadamente a $2\pm 0,1$ cm por encima del mismo, se colocó una lámina metálica delgada de $10\pm 0,1$ cm de ancho y $16\pm 0,1$ cm de largo y así poder tener un sistema físico con una velocidad de calentamiento lenta y una alta capacidad de dispersión de calor (ver Fig.61-a).
- b) Se reemplazó el reflector por una resistencia de cocina, agregándole unos disipadores de calor hechos de papel de aluminio (ver Fig. 61-b), esto con la finalidad de tener un sistema con velocidades rápidas de calentamiento y enfriamiento.

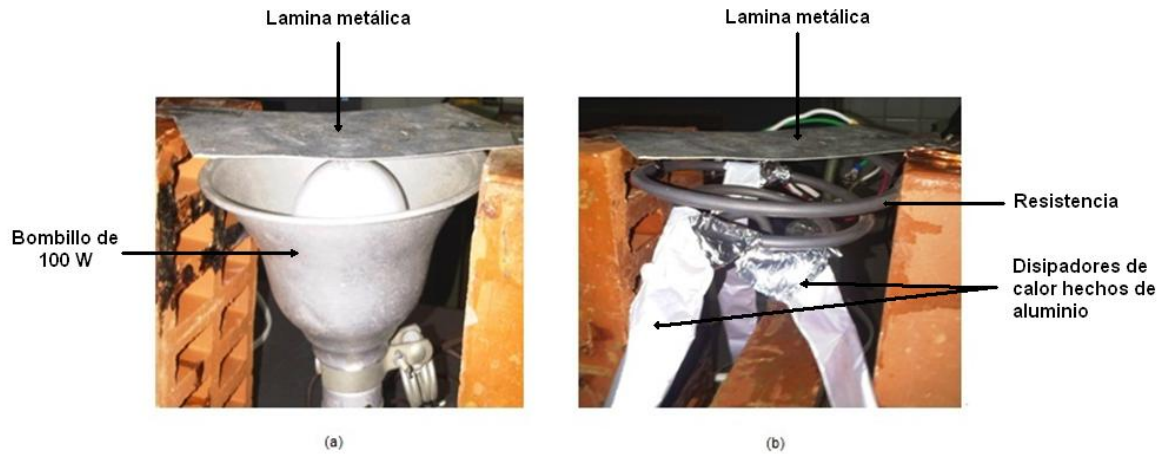


Fig. 61 Sistema físico formado por: (a) un reflector de 100W, (b) una resistencia.

Ambos sistemas se conectaron a una regleta con el fin de usar su botón de encendido y apagado, para simular el efecto que produce el horno al activarse y desactivarse (capítulo 3, sección 3.2).

4.3 Pruebas Realizadas con Dos Tipos de Sistemas Físicos.

4.3.1 Sensibilidad del Equipo y Apreciación de las Medidas.

En las tablas 4 y 5, se tabularon los valores de tiempo de encendido del magnetrón para las secciones de rampas y los platós de temperaturas, según lo establecido en el capítulo 3, sección 3.3.2.3 y se mantuvo el magnetrón apagado 6 seg.

Valor de la razón $P_{\text{teórica}}/P_e$	Tiempo (seg.)
≥ 0.8	1
$\geq 1,2$	2
$\geq 1,4$	4
$< 1,8$	6

Tabla 4 Primera tabulación de tiempos de calentamientos en las zonas de rampas.

Valor de la resta $T_a - T_m$ (°C)	Tiempo (seg.)
≥ 1	1
≥ 2	2
≥ 3	3

Tabla 5 Primera tabulación de tiempos de calentamientos en las zonas de platós.

Prueba 1

Se trabajó con el sistema físico **a** (ver Fig. 61-a), se colocó un beaker con 40 ml. de agua y se estableció una temperatura de ajuste de 23°C durante 20 min. Se observa, una apreciación del instrumento de 3°C y una dispersión en las medidas de 20°C (ver Fig. 62), lo cual no es aceptable.

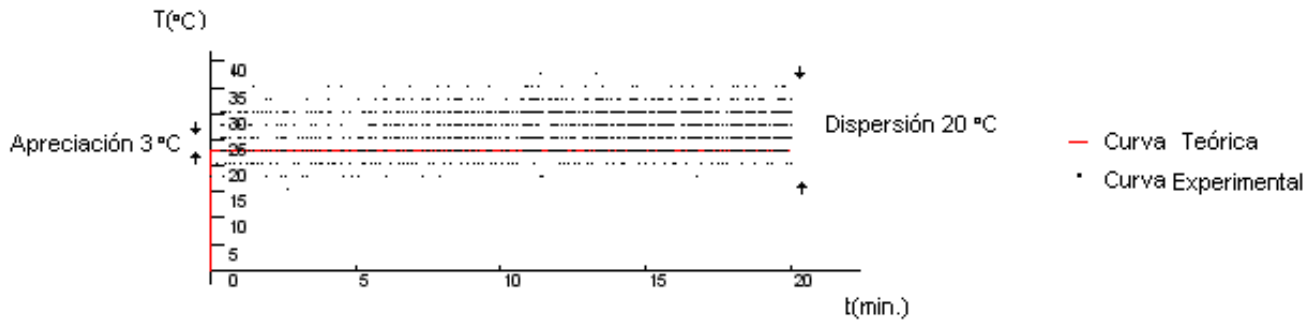


Fig. 62 Estudio de la apreciación del equipo y dispersión de la temperatura.

Prueba 2

El problema mostrado en la Fig. 62, se corrigió variando la ganancia y ajustando el voltaje offset del amplificador de la señal de la termocupla. Bajo las mismas condiciones que en el experimento anterior se repitió la prueba, aún cuando no es visible en la gráfica la apreciación del equipo, se logró reducir a $0,3^{\circ}\text{C}$ y la dispersión a 3°C (ver Fig.63).

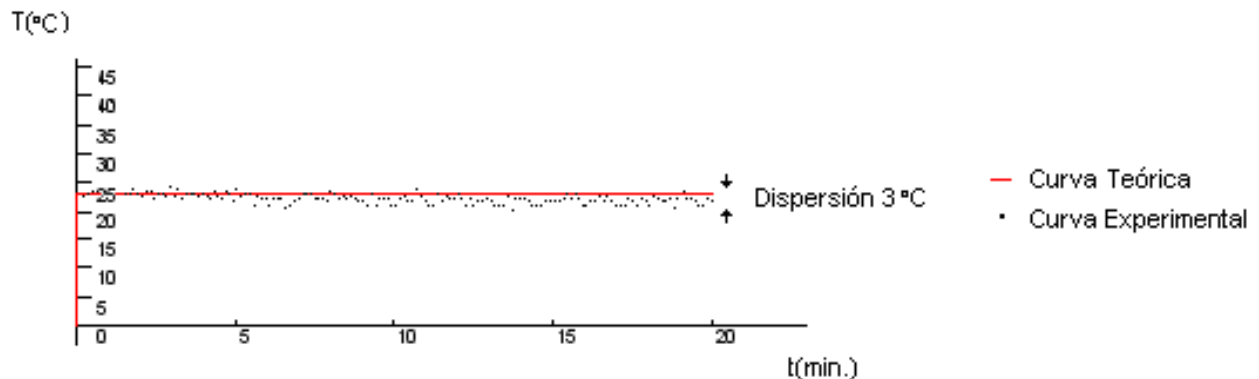


Fig. 63 Estudio de la apreciación del equipo y dispersión de la temperatura luego de ajustar el amplificador.

4.3.2 Estudio de la Eficiencia del Sistema de Control y de las Velocidades de Calentamiento y Enfriamiento del Sistema Físico.

4.3.2.1 Medida de la temperatura de la lámina metálica (Menor Inercia Térmica)

Prueba 1

En este caso se trabajó con el sistema físico **b** (ver Fig. 61-b), midiéndose la temperatura directamente en la lámina metálica. Se observa, tanto en la Fig. 64 como en la 65, un calentamiento de aproximadamente 5°C. El patrón de calentamiento seguido en ambas gráficas hasta llegar a la temperatura de ajuste fijada, es de 1 seg. de encendido y 6 de apagado del magnetrón.

En la Fig. 64 observamos una curva teórica, donde debe mantenerse estable la temperatura de la lámina en 100°C durante 30 min. Se inicio con una temperatura de 23°C, ésta al llegar a la temperatura de ajuste el sistema trata de mantenerla estable, notándose subidas y bajadas de la temperatura de forma cíclica alrededor de los 100°C debido a la inercia térmica de la lámina. Al transcurrir el tiempo, el sistema de control trata de estabilizar y mantener la temperatura de la lámina en 100°C. A partir de los 30 min., la curva teórica muestra un escalón pronunciado para dejar enfriar libremente el sistema, este es bastante rápido y con un decaimiento en forma exponencial.

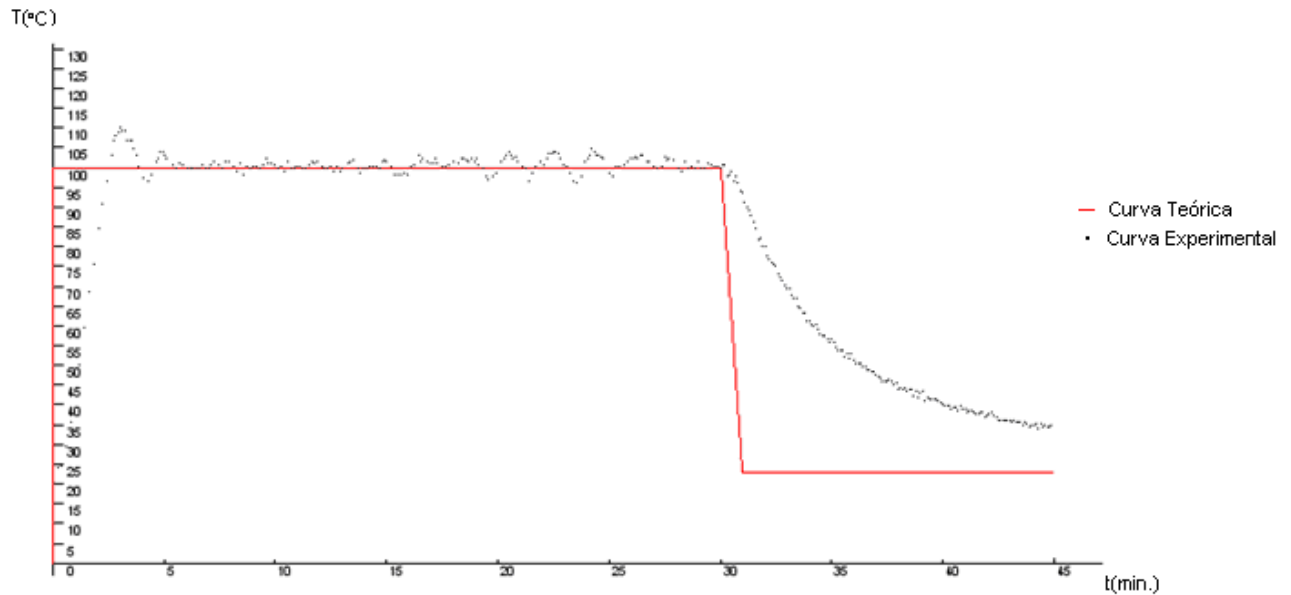


Fig. 64 Prueba 1 para el caso de baja inercia térmica.

Prueba 2

Se creó una curva teórica, donde la temperatura de la lámina debería seguir durante 30 min. una recta con una pendiente de 45° , elevando su temperatura desde 23°C hasta 80°C y luego mantenerse durante otros 30 min. (ver Fig. 65). Debido al rápido calentamiento del sistema, este no es capaz de seguir dicha rampa de subida, por el contrario, sigue un calentamiento exponencial hasta 80°C durante 10 min., luego de lo cual se establece un equilibrio constante entre el calentamiento producido por el control y la disipación de calor de la lámina, donde se observa con mayor claridad la dispersión de 3°C .

A los 30 min., el sistema empieza a cambiar el patrón de calentamiento haciendo que los puntos no estén dispersos de manera aleatoria como en el proceso de equilibrio estable, la temperatura aumenta y disminuye cíclicamente alrededor de los

80°C debido a la inercia térmica de la lámina. Esto demuestra que el sistema de control esta ejerciendo la función esperada.

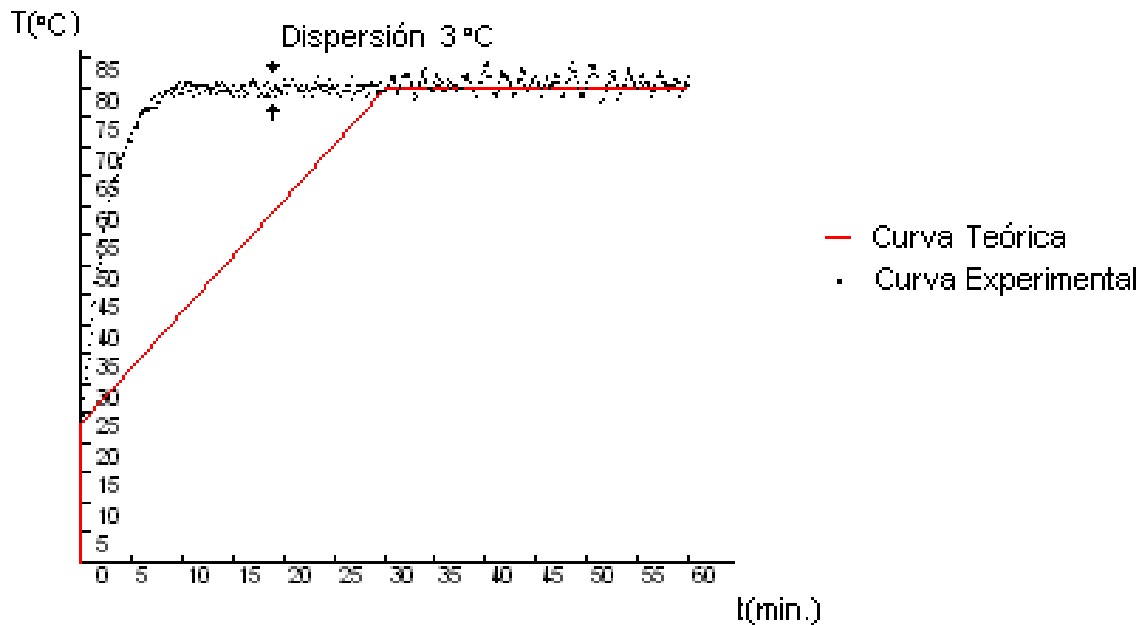


Fig. 65 Prueba 2 para el caso de baja inercia térmica.

Prueba 3

Antes de empezar esta prueba, fueron cambiados los valores de tiempo de calentamiento establecidos en el programa, tanto para las secciones de rampas (ver tabla 6) como para los platós, en este caso se colocó 1 seg. de calentamiento para cualquier valor de la resta de las temperaturas mayores a un 1°C, manteniendo en ambos casos 6 seg. de apagado del magnetrón.

Valor de la razón $P_{teórica}/P_e$	Tiempo (seg.)
≥ 0.8	1
$\geq 1,2$	2
$\geq 1,4$	4

Tabla 6 Segunda tabulación de tiempos de calentamientos en las zonas de rampas.

En este caso, se creó una curva de calentamiento de 60 min. (Ver Fig. 66), parecida al caso de la producción de zeolita tipo X, donde debe permanecer estable 20 min. en 80°C, calentar 10 min. hasta llegar a 90°C y mantenerse durante 10 min., por último calentar 10 min. hasta llegar a 100°C y mantenerse estable 10 min.

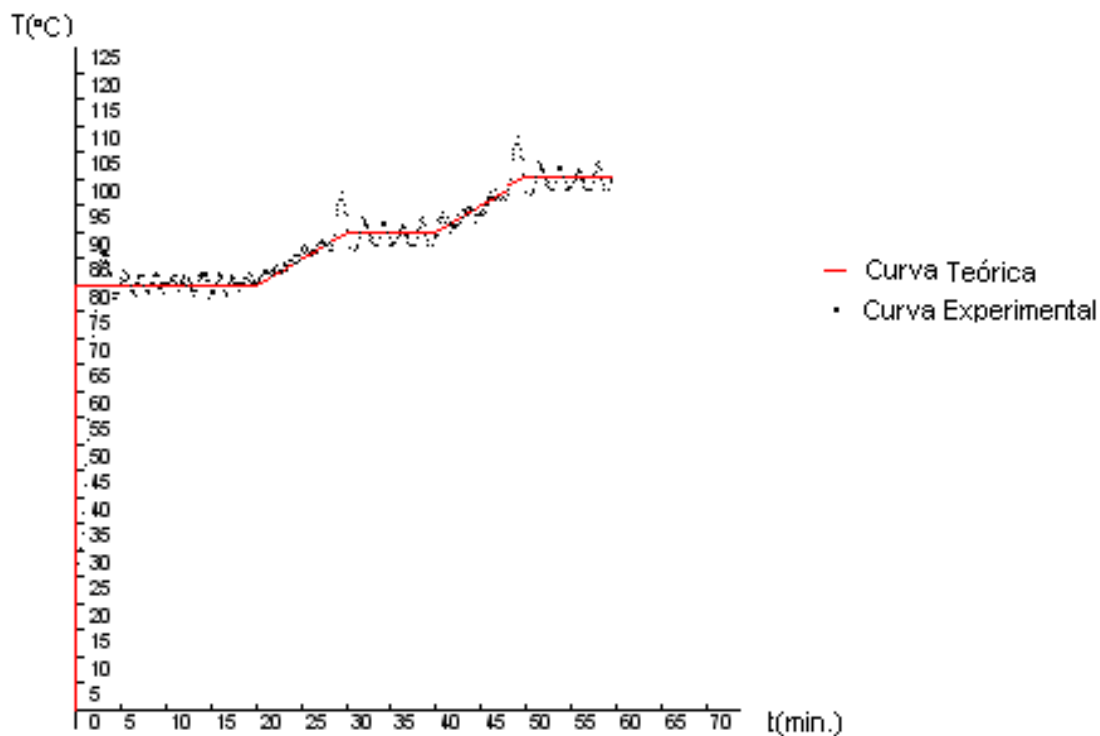


Fig. 66 Prueba 3 para el caso de baja inercia térmica, simulación de producción de zeolita tipo X.

4.3.2.2 Medida de la temperatura del agua (Mayor Inercia Térmica)

Los experimentos se hicieron con el patrón de calentamiento establecido en la prueba 3 de la sección anterior. La dispersión de las medidas como se puede notar en las Fig. 67 y 68 es mucho menor que con la lámina, ya que tiene una mayor inercia térmica al calentarse.

Prueba 1

Se calentó 60 ml de agua con un patrón de calentamiento durante 20 min. hasta llegar a 40°C, para luego mantenerse constante durante 20 min. La velocidad de calentamiento y enfriamiento en este caso no fue el adecuado para adaptarse totalmente a la curva (ver Fig. 67).

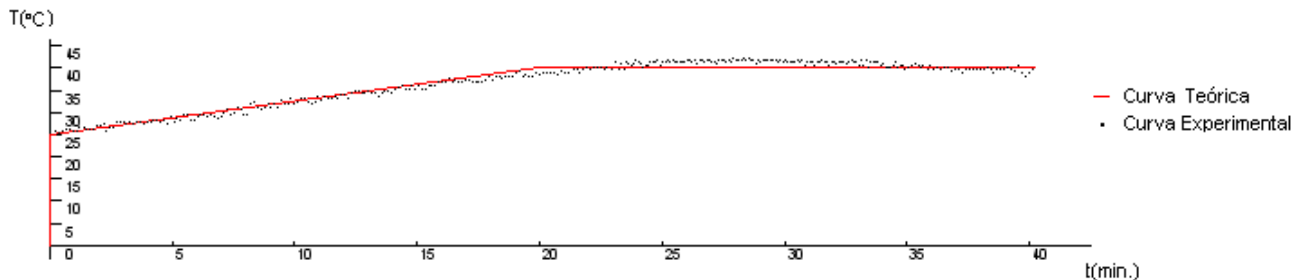


Fig. 67 Prueba 1 para el caso de mayor inercia térmica que la lámina.

Prueba 2

Para esta prueba se disminuyó a 18 ml el volumen de agua y se aumentó la temperatura desde 23°C hasta llegar a 40°C durante 15 min., para luego mantenerse estable durante 25 min. (Ver la Fig. 68).

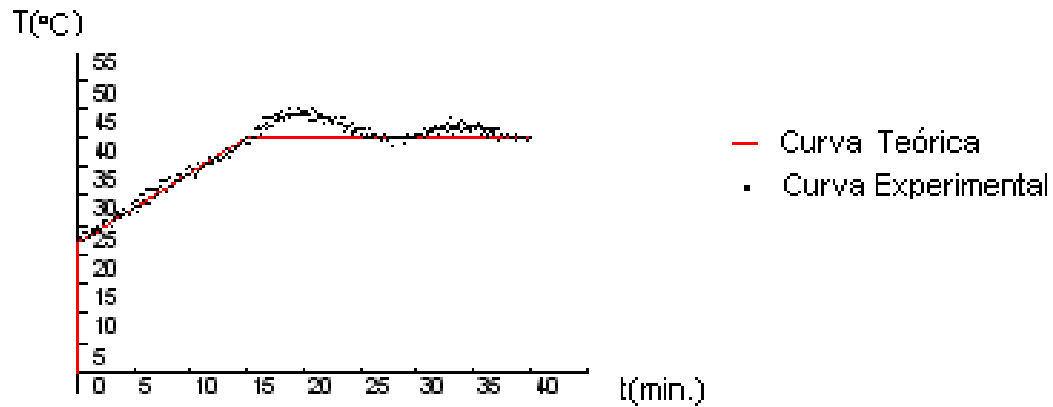


Fig. 68 Prueba 2 para el caso de mayor inercia térmica que la lámina.

Se percibe en las Fig. 67 y 68, que al diseñar una rampa de calentamiento con las condiciones adecuadas para que el sistema la pueda seguir y proporcionando el tiempo de calentamiento necesario al agua durante la prueba, su temperatura aumenta progresivamente de 23°C a 40°C adaptándose a la curva. Observando la curva experimental en la sección de temperatura constante, se nota que la longitud de onda del ciclo en ambas pruebas es mucho mayor que en los casos de la lámina metálica.

Conclusiones

- El sistema electrónico-computacional desarrollado, realiza el control en los sistemas físicos diseñados. Las pruebas se realizaron en un rango de 25°C a 100°C, con una disipación de calor directa al ambiente.
- El sistema de control puede ser usado en hornos convencionales debido a que estos trabajan con resistencia, ya que el funcionamiento del sistema al realizar las pruebas, tanto con el reflector como con la resistencia, así lo corroboran.
- La inercia térmica, es un factor sumamente importante para ser considerado al momento de realizar los experimentos. Los cambios de las temperaturas medidas no deben ser mayor a 1°C con respecto a las teóricas, para obtener los resultados esperados en las síntesis.
- Al momento de diseñar la curva teórica, tanto la inercia térmica del sistema físico, como el de la muestra, deben ser tales que el sistema sea capaz de seguir dicha curva.
- El conectar a tierra la malla metálica, no fue suficiente para aislar la termocupla de las radiaciones microondas, ya que se observó aumento de su temperatura durante las pruebas.

1. Sobre el Diseño Electrónico:

- Elaborar nuevamente el sistema electrónico en baquelita.
- Estudiar la posible conexión de una sonda de fibra óptica para la medición de la temperatura.

2. Sobre el Sistema Físico:

- Estudiar la posibilidad de adaptar un sistema de enfriamiento para la disminución de la inercia térmica.
- Realizar un estudio tanto de la velocidad de calentamiento, como la inercia térmica de las muestras, para lograr un diseño de la curva de calentamiento viable.
- Buscar un mejor método para aislar la termocupla.

3. Sobre el Programa:

- Realizarle pruebas preliminares al sistema de control automatizado con un horno de microondas y efectuar los cambios necesarios de los tiempos de calentamiento establecidos en el programa diseñado.
- Cambiar el uso de la comunicación vía puerto serial por puerto USB, ya que en la actualidad este tipo de puertos a sido eliminado en las nuevas generaciones de computadoras. Esto permitirá usar Laptop o Notebook.

Apéndice A. Tipos de Termocuplas

La entidad ISA (Instrument Society of America), con el propósito de caracterizar las termocuplas, se propuso la designación que se puede observar en la tabla 7 [16].

<i>Tipos de termocuplas</i>	<i>Metales</i>	<i>Cable de termocupla Color del aislante</i>	<i>Rango en °C</i>
E	Chromel (+) Constantan (-)	Morado Rojo	-100~1000
J	Hierro (+) Constantan (-)	Blanco Rojo	0~760
K	Chromel (+) Alumel (-)	Amarillo Rojo	0~1360
R	Platino-13% Radio (+) Platino (-)	Negro Rojo	0~1000
S	Platino-10% Radio (+) Platino (-)	Negro Rojo	0~1750
T	Cobre (+) Constantan (-)	Azul Rojo	-160~400

Tabla 7 Tipos de termocuplas.

Apéndice B. Manual de Uso del Programa

Al iniciar el software, el usuario verá en pantalla un ambiente gráfico, como el que se describe en el capítulo 3, sección 3.3.2 y debe inicialmente escoger el puerto con el cual va a trabajar la computadora (ver Fig. 69), elegir alguno de los dos modos de operación del sistema y luego crear el archivo donde se guardarán los datos (ver Fig.70).



Fig. 69 Panel de puertos

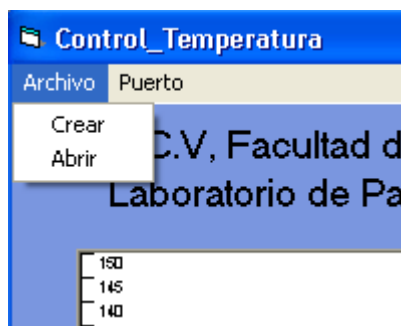


Fig. 70 Panel de Archivo

Modo Medir: Al activar el puerto serial recibirá información de la temperatura de la muestra cada 6 segundos, que será graficada y guardada en el archivo creado por el usuario.

Modo Control: Se debe introducir los datos de temperatura y tiempo en la zona “Datos Teóricos”, cada vez que se introduzca un dato (temperatura-tiempo) se debe presionar el botón graficar ,para así crear la curva teórica de calentamiento y luego activar el puerto. Al iniciar el sistema de control, se recibirá la información inicial de la temperatura de la muestra, la temperatura de ajuste y el tiempo de calentamiento. Sucesivamente cada 6 segundos se recibirá el valor de la temperatura de la muestra y se graficará.

Apéndice C. Ensamblaje en Baquelita

Se hace el diseño en el programa “Electronic Design Studio 3” de las pistas de los circuitos. Las mismas fueron impresas en papel glace (se recomienda una impresora laser o sacarle copia para que tengan bastante toner). Se lijó un poco el cobre de la baquelita y se planchó durante unos minutos (hasta que se halla fijado bien el papel con el toner en el cobre) con una plancha casera cada una de las pistas impresas. Con mucho cuidado se despega el papel colocando las piezas de baquelita en agua, de manera de que sólo queden las pistas dibujadas con el toner. Las baquelitas impresas se sumergieron en ácido de cloruro férrico, hasta percibir que el cobre que no estaba tapado por el toner había sido comido por ácido, seguidamente se retiró el ácido de las baquelitas con abundante agua y se lijó con mucho cuidado, para retirar el toner y dejar las pistas de cobre. Para finalizar se perforaron y se soldaron los dispositivos en la baquelita.

Apéndice D. Calibración del Sistema Electrónico

Se utilizó un beaker con 40 ml de agua, inicialmente ésta se encontraba a temperatura ambiente y luego se redujo a 5 C ° agregándole hielo. Se colocó el beaker en una plancha a la cual se le aumentó cada 5 min la temperatura, con la finalidad de calentar el agua hasta 96 C °. Cada 2 min se anotó la temperatura mostrada en un termómetro y el número visualizado en el display. Con los datos obtenidos se realizó una gráfica en Excel de los números visualizados en función de la temperatura del termómetro, y se calculó la línea de tendencia para obtener la ecuación de la recta que rige la gráfica, esta es usada en el programa diseñado para transformar los números enviados por el microprocesador a un valor de temperatura en grados centígrados.

- [1] **Ladd Research.**
<http://www.laddresearch.com/>
- [2] Tibađuiza D., Barrero J., Correa R. (2005), **Control de un Horno Microondas Usando Labview**, I Simposio Regional de Electrónica y Aplicaciones Industriales, Ibagué-Colombia. ISSN 1794-7936
- [3] Aguilar, J. (1998). **Termopares Para Medir Temperaturas En Muestras Expuestas A Microondas.** Ciencia UANL (Universidad Autónoma de Nueva León) Vol. I, No 4.
http://grafito.fime.uanl.mx/texto_completo/cienciauanl98_termopares.pdf
- [4] **Automatización Industrial: Áreas de Aplicación para Ingeniería.**
http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_10_MEC01.pdf
- [5] Ogata, K. (2006). **Ingeniería de Control Moderna**, 4^{ta} Edición, Madrid: Pearson Educación.
- [6] **Sistemas Automáticos de Control.**
http://www.juntadeandalucia.es/averroes/ies_sierra_magina/d_tecnologia/bajables/2%20bachillerato/SISTEMAS%20AUTOMATICOS%20DE%20CONTROL.pdf
- [7] Paul Aguayo S. (2004). **Introducción al Microcontrolador.**
<http://www.olimex.cl/tutorial/tutorial1.pdf>
- [8] **Medición de Temperatura.**
<http://www.sapiens.itgo.com/documents/doc63.htm>
- [9] Parra, L. (1995). **Reparacion de Hornos de Microondas.** Serie Teoria y Servicio Electronico , 10-16.
- [10] **Ejemplos de Diseños de Guías de Ondas.**
<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4040050/Descargas/capcuatro/ejemplos.pdf>
- [11] **Cocina de Microondas.**
<http://conociendodearomas.blogspot.com/2011/01/cocina-de-microondas.html>
- [12] El Magnetrón de Cavidad Resonante Usado en los Hornos de Microondas.
<http://www.sapiensman.com/ESDictionary/docs/d2.htm>

[13] **Radar Basic-Magnetron.**

<http://www.radartutorial.eu/08.transmitters/tx08.en.html>

[14] Pozar, D. (2007). **Microwave Engineerin** , 3Th Edition, New York: John Wiley & Sons,Inc.

[http://books.google.com/books?id=owZJJf6gPGIC&pg=PA170&dq=Pozar,+D.+\(2007\).+microwaves&hl=es&ei=jBvHTYPE8e5tge4ybSuBA&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2&sqi=2&ved=0CC4Q6AEwAQ#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com/books?id=owZJJf6gPGIC&pg=PA170&dq=Pozar,+D.+(2007).+microwaves&hl=es&ei=jBvHTYPE8e5tge4ybSuBA&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2&sqi=2&ved=0CC4Q6AEwAQ#v=onepage&q&f=false)

[15] Delgado I. (2009), **Desarrollo de un Software Interactivo para la Enseñanza del Tema Interacción Microondas-Materia**, Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias-Facultad de Humanidades, U.C.V., Caracas-Venezuela.

[16] Yuncosa R. (2008), **Síntesis y Caracterización de Zeolita “Y” Mediante Calentamiento por Microondas**, Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas- Venezuela.

[17] Reboredo, Ma. (2008). **Sintesis Asistida por Microondas de Compuestos de Interes Biologico e Industrial**

http://books.google.com/books?id=9_NAdE-XCwC&pg=PA241&lpg=PA241&dq=Sintesis+Asistida+por+Microondas+de+Compuestos+de+Interes+Biologico+e+Industrial&source=bl&ots=GrYawSrwMh&sig=XMDuUnhLrr2es3TUw5yyR1CA65M&hl=es&ei=ABbHTZeoMcG2tgfHosilBA&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=4&sqi=2&ved=0CCgQ6AEwAw#v=onepage&q&f=false

- [18] Grindlay, G. (2003). ***Aplicación de las Microondas a la Desolvatación de Disoluciones Orgánicas en ICP-AES***, Trabajo especial de grado. Facultad de ciencias Dpto. de Química Analítica, Universidad de Alicante.
http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:c2M5HaT0q4gJ:rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/13422/1/Tesina.pdf+constante+dielectrica+etanol%2B25+C%2B3+Ghz&hl=es&pid=bl&srcid=ADGEESiZzo79j24haA7hU47xi2iG22er7RjLhZIEdXsv9JaxZ1jsM5dRO6Kkz4Z7dZ7_eth5SqXdRgjqpA-oDXLyvqIyhkzlZqT9dydtl2JXh3fgJeoizZzbAruQhOA4QIQ-196c-1Z&sig=AHIEtbSnXzpl5_Bnpw9prwDLv1LXaJ9G6
- [19] **Microchip Technology Incorporated (2001), PIC16F87X Datasheet, U.S.A.**
<http://www.sapiensman.com/ESDictionary/docs/d2.htm>
- [20] Rojas J. (2006), ***Preparación y Uso del los Líquidos Iónicos en Reacciones de Síntesis Orgánicas Empleando Radiación de Microondas***, Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas- Venezuela.
- [21] Calderón J. y Fragachán G. (2007), ***Preparación de Alúminas Mesoporosas Empleando la Técnica de Microondas***, Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas- Venezuela.
- [22] Espinasa A. y Ríos M. (2008), ***Nueva Tecnología de Preparación de Sólidos del Tipo Pt-Sn Y Pt-Cu Soportado sobre Zeolita "Y"***, Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas- Venezuela.
- [23] Estebes A. y Maldonado J. (2008), ***Síntesis de catalizadores Bifuncionales y Bimetálico Pd/H-ZSM5, Cu/H-ZSM5 y Pd-Cu/H-ZSM5 por Reducción Química Asistida por Microondas***, Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas- Venezuela.
- [24] Mediavilla M. (2009), ***El Uso de las Microondas en la Preparación de Catalizadores del Tipo Pt/H-ZSM5***, Trabajo de Ascenso Agregado. Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas- Venezuela.

- [25] Mediavilla M., Melo L., Sifontes A, Moronta D. y Brito J. (2010). ***Microwave Assisted Polyol Synthesis of Pt/H-ZSM5 Catalysts***. Microporous and Mesoporous Materials, **131**, (342-349)
- [26] Salazar, A. y Morales, J. (2010), “***Diseño de un Reactor para las Síntesis de Zeolita Mediante Microondas***”, Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas- Venezuela.