

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
POSTGRADO EN INSTRUMENTACIÓN



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
AUTOMÁTICO DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA LA
ACELERACIÓN DE REACCIONES QUÍMICAS, MEDIANTE
EL USO DE UN HORNO DE MICROONDAS COMERCIAL”**

Trabajo de Grado de Maestría presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela por la Licenciada Berekyakaleb
Nereida Errico Lebrun para optar al título de “Magister
Scientiarum, mención Instrumentación”

Tutores: Prof. Delfín Moronta.

Prof. Fernando Moutinho.

Caracas – Venezuela

13 de Abril de 2018



VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela para examinar el Trabajo de Grado de Maestría presentado por **ERRICO LEBRUN BEREKYAKALEB NEREIDA**, portadora de la Cédula de Identidad N° **17.287.247**, bajo el título:

"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA LA ACELERACIÓN DE REACCIONES QUÍMICAS, MEDIANTE EL USO DE UN HORNO DE MICROONDAS"

A los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de **MAGISTER SCIENTIARUM**, **MENTIÓN INSTRUMENTACIÓN** dejan constancia de lo siguiente:

1º Leído como fue dicho Trabajo por cada uno de los miembros del Jurado, éste fijó el día viernes 13 de abril de 2018 a las 11:00 a.m. para que la autora lo defendiera en forma pública, lo que ésta hizo en la Sala Ruggeri ubicada en el primer piso de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió en forma satisfactoria a las preguntas que le fueron formuladas por el Jurado; todo ello conforme a lo dispuesto en los artículos 45, 50, 51, 52 y 53 del Reglamento de Estudios de Postgrado vigente.

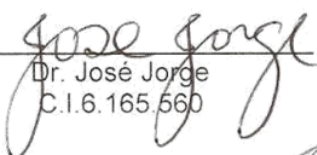
2º Finalizada la defensa pública del trabajo, el jurado decidió **APROBAR** por considerar, sin hacerse solidario de las ideas expuestas por la autora, que se **AJUSTA** a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

El Jurado decidió, por unanimidad, aprobar el trabajo con la calificación de **SOBRESALIENTE**.

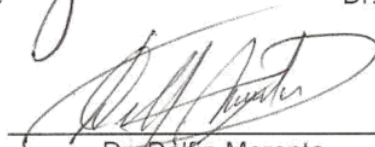
Para dar el veredicto el jurado estimó que la obra examinada es un aporte original en área de Instrumentación Científica en el aspecto del control de temperatura para la aceleración de reacciones químicas, mediante el uso de un horno microondas comercial.

En fe de lo cual se levanta el acta a los trece (13) días del mes de abril del año dos mil dieciocho, dejándose también constancia de que actuaron como tutores en el desarrollo del trabajo los doctores Delfín Moronta y Fernando Moutinho y que, conforme a lo dispuesto en la normativa jurídica vigente, actuó como Coordinador del Jurado el tutor Dr. Delfín Moronta

Firma del Jurado examinador:


Dr. José Jorge
C.I. 6.165.660


Dr. Pierre Embaid
C.I. 12.162.811


Dr. Delfín Moronta
Coordinador
C.I. 1.755.919

Postgrado
INSTRUMENTACIÓN
Fac. Ciencias UCV

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA LA ACELERACIÓN DE REACCIONES QUÍMICAS, MEDIANTE EL USO DE UN HORNO DE MICROONDAS COMERCIAL

Errico B.^{1,*}, Moronta D¹ y Moutinho F.²

*berekerrico@gmail.com

¹*Laboratorio de Paramagnetismo, Escuela de Física, Facultad de Ciencias, U.C.V.*

²*Laboratorio de Superficies, Escuela de Física, Facultad de Ciencias, U.C.V.*

Resumen

Se desarrolló un sistema de control automático de temperatura, adaptable a hornos de microondas comerciales, para el tratamiento térmico de distintos materiales. Para dicho sistema se diseñó y ensambló un sistema electrónico de control de potencia que incluye un software propio para su automatización, esto permite ejercer un control a lazo cerrado PID en la temperatura mediante la variación de la potencia del horno microondas.

El sistema automático de control de temperatura es capaz de medir la temperatura directamente en la muestra y seguir una curva teórica de calentamiento prediseñada. La desviación estándar promedio de las medidas $\bar{\sigma}$ es de 0,5 °C, la apreciación del equipo es de 0,1 °C. El diseño fue aplicado en la extracción de solvente en la producción de oleorresinas de ajo en el cual se realizaron medidas de temperatura entre 22 °C y 60 °C y se fijó un rango de valores entre 58 % y 77 % de la potencia de trabajo del microondas; potencialmente se prevee su uso en la producción de nano partículas de distintos metales.

Palabras Claves: Sistema de control automático, automatización y horno de microonda

DESIGN AND APPLICATION OF AN AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL SYSTEM TO STUDY THE ACCELERATION OF CHEMICALS REACTIONS BY MEANS OF A MICROWAVE OVEN

Errico B.^{1,*}, Moronta D¹ y Mounthino F.²

^{*}berekerrico@gmail.com

¹ *Paramagnetic Laboratory, Physics School, Science Department, U.C.V.*

² *Surfaces Laboratory, Physics School, Science Department, U.C.V.*

Abstract

An automatic temperature control system was developed adaptable to commercial microwave ovens, for the thermal treatment of different materials. An electronic power control system that includes its own software for automation was designed and assembled; this allows applying a PID closed-loop control on the temperature by varying the power of the microwave oven.

The automatic temperature system control is capable to directly measure the temperature in the sample and follow a theoretical heating curve. The average standard deviation of the measurements $\bar{\sigma}$ is 0,5 °C and the equipment has a resolution reading of 0,1 ° C. The design was tested in the extraction of solvent in the production of garlic oleoresins. The temperature measurements were made between 22 °C and 60 °C; the microwave working power values are between 58% and 77%. This system is potentially foreseen to be used in the production of nanoparticles of different metals.

Keywords: Control system, automation and microwave ovens.

Dedicado a mis hermanos y primos que son menores.

Ellos son mi fuerza y me impulsan a ser mejor;

ya que soy ejemplo a seguir para la nueva

Juventud que en estos momentos de crisis dice

“Para que voy a estudiar si como buhonero gano más dinero”.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme salud y fuerza, para luchar cada día e iluminarme los caminos a recorrer hacia mis metas; a mis padres, abuelos, tíos y primos, que en todo momento me han apoyan y de una u otra manera me ayudan día a día. Todos me han motivado a continuar con mis estudios.

A la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, por hacer posible mis estudios y ser prácticamente mi primer hogar y a mis tutores el Prof. Delfín Moronta y Prof. Fernando Moutinho, que me guiaron y colaboraron en todo momento en la realización de este trabajo de grado.

Agradezco también a las siguientes personas, quienes considero parte de mi familia y han estado a mi lado a lo largo de la carrera; siempre me han prestado su ayuda fuera y dentro de la universidad, han soportado mis necesidades y mal humor: Javier Lugo, María Yépez, Osiris Barrios y Carlet Sánchez. Con ellos y otros que no menciono porque sería una lista un poco larga he compartido momentos divertidos, bonitos y en ocasiones tristes donde su apoyo ha sido de mucha importancia estando aquí en el país o fuera, espero seguir contando con su amistad durante toda mi vida. ¡Mil Gracias!

Índice General

Índice de Figuras.....	i
Índice de Tablas	viii
Introducción	1
Capítulo1. Planteamiento del Problema.....	3
1.1. Descripción del problema.	3
1.2. Justificaciones.....	5
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo General.....	6
1.3.2. Objetivos Específicos.	6
Capítulo 2. Marco Teórico.....	7
2.1. Sistema Automático de Control.....	7
2.1.1. Definición.	7
2.1.2. Tipos de Sistema de Control.....	8
2.2. Principios Básicos de Diseño de Sistemas de Control.....	13
2.3. Planta ó Proceso: Horno de Microondas.	19
2.3.1. Definición.	19
2.3.2. Método de Calentamiento: Radiación Microondas.	21
2.3.3. Influencia de la Constante Dieléctrica en el Calentamiento (ϵ').	25
2.4. Actuador: El Magnetron.	26
2.4.1. Definición.	26
2.4.2. Generación de Microondas Mediante un Magnetron.	27
2.5. Sensor: Sonda de Fibra Óptica.	30
2.5.1. Definición.	30

2.5.2.	Principio Básico de Transmisión del Haz de Luz a Través de la Fibra Óptica.	31
2.5.3.	Tipos de Fibra Óptica Según el Modo de Propagación del Haz de Luz.....	32
2.5.4.	Principios Físicos para la Medición de la Temperatura Mediante una Sonda de Fibra Óptica.....	34
2.6.	Módulo Controlador: Placa Arduino.	36
2.6.1.	Entorno de Desarrollo.....	37
2.6.2.	Estructura básica de un programa para Arduino.	38
2.6.3.	Entradas y salidas digitales y analógicas.....	39
2.6.4.	Señales analógicas de salida en el Arduino usando PWM “Pulse Width-Modulation”.	40
2.7.	Sistema Electrónico de Potencia.....	42
2.7.1.	Definición y Aplicaciones.	42
2.7.2.	Dispositivos semiconductores de potencia.....	44
2.7.3.	Circuitos Electrónicos de Potencia.	47
2.8.	Sistema Digital.....	59
2.9.	Acoplamiento Óptico entre Sistemas Digitales y Sistemas de Potencia.	61
2.10.	Diseño de Un Nuevo Sistema Automático de Control de Temperatura.....	62
2.10.1.	Funcionamiento del Sistema Automatizado de Control de Temperatura..	66
Capítulo 3. Marco Experimental.....		67
3.1.	Ensamblaje del Manejador de Potencia.....	67
3.2.	Diseño de Software de Control.....	69
3.3.	Descripción de la Pruebas Realizadas al Sistema de Control de Temperatura..	73
3.3.1.	Funcionamiento del Sistema de Control.....	74

3.3.2. Efecto de la variación de la potencia de trabajo del horno de microondas sobre la temperatura.....	77
3.3.3. Funcionamiento del Sistema de Control de Temperatura en el Proceso de Evaporación.....	78
Capítulo 4. Resultados y Discusión.	82
4.1. Funcionamiento del Sistema de Control de Temperatura.....	82
4.2. Efecto de la variación de la potencia de trabajo del horno de microondas sobre la temperatura.	89
4.3. Funcionamiento del Sistema de Control de Temperatura en el Proceso de Evaporación.	92
4.3. Discusión de resultados.	102
Conclusiones.....	104
Recomendaciones	106
Anexos	108
Anexo 1. Propiedades de las zeolitas según su aplicación en la industria.	108
Anexo 2. Sistema de control de temperatura ON-OFF en lazo cerrado.....	109
Anexo 3. Pruebas realizadas al sistema automatizado de control de temperatura ON-OFF en lazo cerrado.	112
Anexo 4. Comparación entre los métodos de calentamiento convencional y por radiación microondas.....	118
Anexo 5. Aplicaciones en diversas áreas científicas de los hornos de microondas..	119
Anexo 6. Otros principios físicos que se pueden aplicar en el diseño de sensores que utilicen fibras ópticas.	123
Anexo 7. Datos de las temperatura medidas en las pruebas de exactitud, precisión y funcionamiento del sistema de control de temperatura.....	128
Bibliografía	150

Índice de Figuras

Fig. 1 Diagrama en bloque del sistema de control automatizado de temperatura tipo ON-OFF en lazo cerrado.	3
Fig. 2 Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto.....	8
Fig. 3 Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado.	9
Fig. 4 Respuesta temporal de un control tipo PID.....	11
Fig. 5 Respuesta temporal de cada acción del control PID	12
Fig. 6 Diagrama en bloques de un compensador en serie (cascada).....	16
Fig. 7 Diagrama en bloques de un compensador mediante realimentación.....	16
Fig. 8 Diagrama en bloques de un compensador mediante realimentación de estado.....	17
Fig. 9 Diagrama en bloques de un compensador en serie-realimentada.....	17
Fig. 10 Diagrama en bloques de un compensador prealimentado: a) en serie y b) paralelo	18
Fig. 11 Estructura básica de un horno de microondas convencional.....	20
Fig. 12 Onda electromagnética.	22
Fig. 13 Ubicación de las microondas en el espectro electromagnético.	22
Fig. 14 Rotación dipolar.	24
Fig. 15 Desplazamiento iónico.	24
Fig. 16 Estructura básica de un magnetrón.....	27
Fig. 17 Trayectoria de los electrones en ausencia de campo magnético.	27
Fig. 18 Trayectoria de los electrones en presencia de campo magnético.	28
Fig. 19 Visualización de los segmentos del ánodo como circuitos resonantes.....	29
Fig. 20 Nube de electrones.	29
Fig. 21 Ubicación de ancho de banda de la fibra óptica en el espectro electromagnético. ..	30
Fig. 22 Principios básicos de transmisión del haz de luz.....	31

Fig. 23 Trasmisión multimodo de haz de luz.....	32
Fig. 24 Trasmisión monomodo de haz de luz.....	33
Fig. 25 Sonda de fibra óptica	33
Fig. 26 Sonda de fibra óptica.	34
Fig. 27 (a) Sonda de fibra óptica; (b) Módulo acondicionador de señal.	35
Fig. 28 Estructura básica de una tarjeta “Arduino UNO”.....	36
Fig. 29 Ejemplo de un entorno de desarrollo de las tarjetas Arduino.....	37
Fig. 30 Ciclo de trabajo asociado a la señal PWM..	41
Fig. 31 Conexión del control, electrónica y energía.	43
Fig. 32 (a) Circuito básico convertidor de voltaje de AC monofásico con carga resistiva, (b) Señales de entrada y salida del convertidor de voltaje de AC.....	48
Fig. 33 (a) Circuito rectificador de puente monofásico de onda completa, (b) Señal de entrada y de salida del rectificador.	48
Fig. 34 (a) Circuito rectificador de puente monofásico, (b) Señal de salida de voltaje y de corriente de rectificador.....	49
Fig. 35 (a) Circuito Controlador de voltaje de AC, (b) Señal de entrada y salida de voltaje del circuito y pulsos de compuertas de tiristores, (c) Factor de potencia.	52
Fig. 36 (a) Circuito controlador de voltaje de AC monofásico unidireccional, (b) señal de entrada y de salida de voltaje del circuito y pulsos de compuerta del tiristor.	53
Fig. 37 (a) Circuito controlador de voltaje AC bidireccional monofásico, (b) señales de entrada y de salida de voltaje del circuito y pulsos de compuertas de tiristores.	54
Fig. 38 Circuito controlador de voltaje AC con aislamiento.	55
Fig. 39 (a) Circuito controlador de voltaje de AC bidireccional con carga inductiva, (b) Señal de voltaje de entrada del circuito, pulsos de compuertas y señal de la corriente de salida del tiristor 1, (c) Pulsos de compuertas de tiristores.....	56

Fig. 40 (a) Señal de entrada de voltaje, (b) Señal de voltaje y corriente de salida con $L \neq 0$ y (c) Señal de voltaje y corriente de salida con $L=0$.	59
Fig. 41 Entradas y salidas de un circuito digital.	59
Fig. 42 Circuito electrónico estándar controlador de voltaje de AC con acoplamiento óptico, lógica digital negativa.	62
Fig. 43 Circuito rectificador de puente con acoplamiento óptico.	62
Fig. 44 Sistema automático de control de temperatura.	63
Fig. 45 Diagrama en bloque del sistema de control automatizado de temperatura.	63
Fig. 46 Diagrama del circuito básico de un horno de microondas.	64
Fig. 47 Diagrama del circuito de manejo de potencia para el horno de microondas.	65
Fig. 48 Gráfica del circuito PBC	67
Fig. 49 Baquelita luego de pasar por el cloruro férrico.	68
Fig. 50 Circuito manejador de potencia.	68
Fig. 51 (a) Montaje del sistema automático de control temperatura, (b) Conexión horno de microondas-manejador de potencia.	69
Fig. 52 Ventana Principal.	71
Fig. 53 Iconos.	72
Fig. 54 Ventana Secundaria	72
Fig. 55 Ventana de graficación de temperatura vs tiempo.	73
Fig. 56 Conexión del variac al transformador de alta potencia.	74
Fig. 57 Sistema de control de potencia conectado a un bombillo o a un secador de cabello.	75
Fig. 58 Reactor de teflón.	76
Fig. 59 Curva teórica de calentamiento para el calentamiento del agua al realizar control ON-OFF y variar la potencia: (a) 100%, (b) 70% y (c) 60%.	78

Fig. 60 Curva teórica de calentamiento, tanto para el rector con la tapa cerrada como para el rector con la tapa sobre puesta.....	79
Fig. 61 Curva teórica de calentamiento programada para el experimento2 para el rector con la tapa sobre puesta.	80
Fig. 62 Curva teórica de calentamiento programada para el experimento1 en el proceso de evaporación.....	81
Fig. 63 Curva teórica de calentamiento programada para el experimento2 en el proceso de evaporación.....	81
Fig. 64 Comparación entre la señal de entrada de voltaje al circuito y la señal de salida del acoplamiento del rectificador de puente.	82
Fig. 65 Potencia de trabajo del horno de microondas y retardo de la señal de salida del Arduino UNO: (a) 100 % de potencia, retardo $t=0$ ms, (b) 89,9 % de potencia, retardo $t=1$ ms y (c) 74 % potencia, retardo $t > 1$ ms.	83
Fig. 66 Señal de voltaje de entrada al transformador de alto voltaje al variar la intensidad de luz de un bombillo: (a) 100%, (b) 97 %, (c) 90 % y (d) 74 %.	84
Fig. 67 Señal de voltaje de entrada al transformador de alto voltaje al variar la potencia de trabajo del horno de microondas: (a) 100 %, (b) 93,5 y (c) 76%.	84
Fig. 68 Gráfica del comportamiento de la salida analógica del sensor de fibra óptica con respecto a la temperatura.	85
Fig. 69 Gráfica de la temperatura vs el tiempo del agua sin control de potencia: (a) 19/07/17 y (b) 21/07/17.	86
Fig. 70 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la línea de tendencia de las medidas de la temperatura del agua, sin control de potencia del horno: (a) 19/07/17 y (b) 21/07/17.....	87
Fig. 71 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura ajustada, la temperatura promedio y la línea de tendencia de las medidas de la temperatura del agua sin control de potencia del horno: (a) 19/07/17 y (b) 21/07/17.	88

Fig. 72 Gráfica de la temperatura Vs el tiempo del agua con control ON-OFF a 100% de potencia de trabajo del horno de microondas.	89
Fig. 73 Gráfica de la temperatura Vs el tiempo del agua con control ON-OFF a 70% de potencia de trabajo del horno de microondas.	90
Fig. 74 Gráfica de la temperatura Vs el tiempo del agua con control ON-OFF a 60% de potencia de trabajo del horno de microondas.	91
Fig. 75 Gráfica de calentamiento de agua con control ON-OFF a 100%, 70% y 60 % de potencia de trabajo del horno de microondas.	92
Fig. 76 Gráfica de la temperatura vs tiempo del agua con la tapa del reactor sobre puesta, controlando la potencia del horno. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C. ...	93
Fig. 77 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia las medidas de la temperatura del agua con control de potencia del horno, con la tapa de reactor sobre puesta. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C	93
Fig. 78 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura ajustada, la temperatura promedio y la tendencia de las medidas de la temperatura del agua con control de potencia del horno con la tapa de reactor sobre puesta. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C.....	94
Fig. 79 Gráfica de la temperatura vs tiempo del agua con la tapa del reactor cerrada, controlando la potencia del horno. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C. ...	95
Fig. 80 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura del agua con control de potencia del horno, con la tapa del reactor cerrada. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C.	95
Fig. 81 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura ajustada, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura del agua con control de potencia del horno, con la tapa de reactor cerrada. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C.	96
Fig. 82 Gráfica de la temperatura vs tiempo del agua, con la tapa del reactor cerrada controlando la potencia del horno. La curva teórica de calentamiento aumenta durante 10 minutos hasta 50 °C y luego permanece constante a esa temperatura durante 10 minutos	97

Fig. 83 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura del agua, con la tapa del reactor cerrada controlando la potencia del horno. La curva teórica de calentamiento aumenta durante 10 minutos hasta 50 °C y luego permanece constante a esa temperatura durante 10 minutos.	97
Fig. 84 Gráfica de la temperatura vs tiempo, experimento 1 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.	98
Fig. 85 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura, experimento 1 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.	99
Fig. 86 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura ajustada, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura, experimento 1 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.	100
Fig. 87 Gráfica de la temperatura vs tiempo, experimento 2 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.	100
Fig. 88 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura, experimento 2 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.	101
Fig. A2-1 Sistema automatizado de control de temperatura ON-OFF en lazo cerrado. ...	109
Fig. A2-2 Tren de pulsos cuadrados enviados por el sistema de control para el encendido y apagado del horno microondas.	110
Fig. A2-3 Parte interna del módulo controlador ON-OFF en lazo cerrado.	110
Fig. A3-1 Gráfica de la temperatura versus el tiempo del agua sin control ON-OFF en lazo cerrado, duración 4 minutos y medios.	112
Fig. A3-3 Gráfica de la temperatura versus el tiempo del agua sin control ON-OFF en lazo cerrado, duración 3 minutos.	113
Fig. A3-4 Gráfica de la temperatura versus el tiempo del agua con control ON-OFF en lazo cerrado, temperatura deseada 60 °C, duración 5 minutos.	114

Fig. A3-5 Grafica de la temperatura versus el tiempo del agua con control ON-OFF en lazo cerrado, temperatura deseada 60 °C, duración total 18 minutos.	115
Fig. A3-6 Grafica de la temperatura versus el tiempo del agua con control ON-OFF en lazo cerrado. La curva teórica de calentamiento se mantiene a 120 °C durante 5 minutos, luego en 1 minuto disminuye la temperatura a 100 °C para mantenerse durante 1 hora.	115
Fig. A3-7 Espectro infrarrojo de una muestra patrón de zeolita tipo Y.....	116
Fig. A3-8 Espectro infrarrojo de la muestra “a”	117
Fig. A3-9 Espectro infrarrojo de la muestra “b”	117
Fig. A5-1 Artículos sobre el secado de materiales en el área de la industria.....	119
Fig. A5-2 Artículos sobre síntesis de nanoestructuras en el área de la medicina.	120
Fig. A5-3 Artículos sobre síntesis de nanoestructuras en el área de la electrónica.	120
Fig. A5-4 Artículos sobre investigaciones en el área de química.....	121
Fig. A5-5 Artículos sobre síntesis de nanoestructuras en el área de tecnología de alimentos.	122
Fig. A6-1 Esquema de la relación entre cavidad y magnitud	126

Índice de Tablas

Tabla 1. Cuadro de valores de constante dieléctrica, factor de pérdida dieléctrica, y factor de disipación de algunos materiales	26
Tabla 2. Tipos de datos y su descripción.	39
Tabla 3. Áreas de aplicaciones de la electrónica de potencia.	44
Tabla 4. Algunas características de dispositivos de potencia.	45
Tabla 5. Símbolos y características de dispositivos de potencia.	46
Tabla 6. Números expresados en los tres sistemas más usados.	60
Tabla 7 Volumen de contenido de ajo en etanol en los experimento del proceso de evaporación.....	101
Tabla A1-1 Propiedades de las zeolitas y su aplicación industrial.	108
Tabla A4- 1 Cuadro comparativo de métodos de calentamiento.	118
Tabla A7- 1 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso a” del agua sin control.....	130
Tabla A7- 2 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso b” del agua sin control.	133
Tabla A7- 3 Datos tomados por el sistema de control de temperatura del control con agua con la tapa del reactor sobre puesta.	136
Tabla A7- 4 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso a” control con agua con la tapa del reactor cerrada.	139
Tabla A7- 5 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso b” control con agua con la tapa del reactor cerrada.	143
Tabla A7- 6 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso a” control con ajo en etanol	146
Tabla A7- 7 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso b” control con ajo en etanol.	149

Introducción

En el Laboratorio de Paramagnetismo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, desde hace años se sigue una línea de investigación en el área de aceleración de reacciones químicas para la obtención de distintos compuestos, mediante la técnica de calentamiento por microondas. En este marco, se desarrolló un primer prototipo de sistema automático de control de temperatura, el cual se puede conectar a cualquier horno de microondas comercial. Este prototipo ha sido probado en la producción de zeolitas por su interés industrial (Anexo 1). Los resultados obtenidos de las síntesis que se han realizado en el laboratorio, han sido material para ponencias en congresos y trabajos especiales de grados. Sin embargo, por sus limitaciones en cuanto a su exactitud, precisión y funcionamiento del control, en las nuevas investigaciones sobre la producción de nano partículas de distintos metales, tales como: oro (Au), platino (Pt), plata (Ag), etc. y la extracción del solvente en la producción de oleorresinas, nos vimos en la necesidad de mejorar el sistema de control de temperatura.

Con la finalidad de tener mayor precisión y exactitud en la medida y el control de temperatura, así como la reproducibilidad de los resultados obtenidos, se diseñó y elaboró un sistema de control de potencia para hornos microondas, el cual ejerce en la temperatura un control tipo PID en lazo cerrado. El nuevo sistema automático de control consta de un sensor de fibra óptica para las medidas de temperatura y un sistema electrónico de potencia. Éste último está conformado por un circuito controlador de voltaje AC monofásico para cargas inductivas y por un circuito rectificador de puente monofásico de onda completa, acoplados ópticamente a un sistema digital (Arduino UNO), permitiéndose así la automatización de todo el sistema de control. A su vez se diseñó un software en Visual Basic 6.0, capaz de enviar y recibir datos, de graficar y de guardar la información. Los datos obtenidos de la temperatura medida por la fibra óptica, se guardan en un documento .txt y son evaluados por el programa. Este realiza una serie de cálculos, que permiten saber si se debe aumentar o disminuir la potencia de trabajo del horno; el programa le envía al Arduino UNO, la información sobre la potencia de trabajo. El Arduino está programado para medir la temperatura y enviarla a la PC,

así como para generar pulsos cuadrados de 60 Hz y amplitud de 5 VDC, con cierto retraso con respecto la línea de la calle. Al variar dichos retrasos es lo que permite tener diferentes valores de potencia de trabajo del horno de microondas.

Este nuevo diseño de sistema de control, tiene la ventaja de poder medir la temperatura de la muestra cuando ella está dentro del horno de microondas y, graficar la temperatura en función del tiempo durante el calentamiento. También permite variar la potencia de trabajo del horno desde un 58% hasta un 77% de su valor máximo, con lo cual se logra un control tipo PID sobre la temperatura. El equipo tiene una apreciación de 0,1 °C, una desviación estándar promedio de la medida de 0,5 °C y la temperatura máxima con la cual se puede trabajar es 200 °C, debido a las características del material de la fibra óptica.

Capítulo 1. Planteamiento del Problema.

1.1. Descripción del problema.

Actualmente se hace uso de hornos de microondas para llevar a cabo la aceleración de distintas reacciones químicas; estos deben tener un sistema de control de temperatura, de alto estándar técnico. Estos controles deben incluir ajustes manuales que permitan el calentamiento a una temperatura fija durante un tiempo establecido por el usuario, según lo requiera la reacción química con la cual se está trabajando. La adquisición de un horno de este tipo es muy costosa, razón por la cual se ha desarrollado hace cuatro años en nuestro laboratorio, un prototipo de sistema automático de control de temperatura en lazo cerrado. Se diseñó y ensambló un circuito electrónico, que ejerce un control tipo ON-OFF en el magnetrón (Anexo 2). En la figura 1 podemos observar el diagrama en bloque del sistema de control.

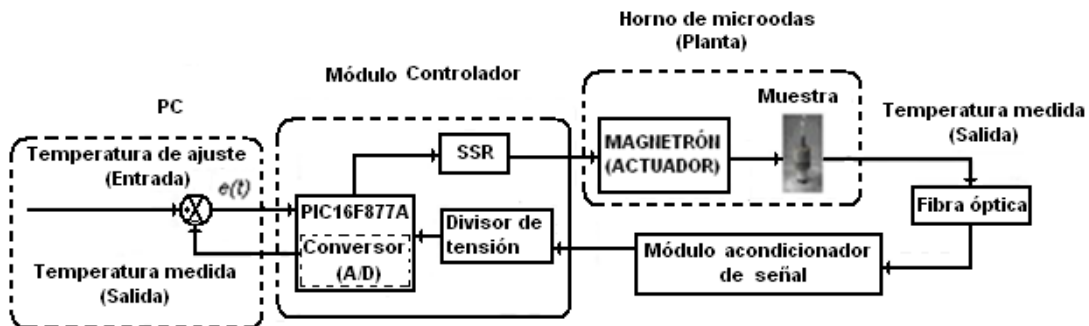


Fig. 1 Diagrama en bloque del sistema de control automatizado de temperatura tipo ON-OFF en lazo cerrado.

La eficiencia de este sistema de control se evaluó bajo los criterios de: sensibilidad, precisión y capacidad de controlar la temperatura al sintetizar un tipo zeolita. Se realizaron varias pruebas (Anexo 3) y al analizar los resultados obtenidos, nos encontramos con las siguientes características y limitaciones:

- El tipo de control que se ejerce en el horno microondas, ya que este es de tipo ON-OFF en lazo cerrado, ocasiona cambios bruscos en el encendido y apagado que pueden causar daños al magnetrón.
- La potencia del magnetrón no es controlada, al trabajar siempre a su máxima potencia que es 1,05 KW, ocasiona un rápido aumento en la temperatura de las muestras alterando el producto final.
- El equipo no mantiene la curva de calibración de la medición de la temperatura al momento de trabajar con él en diversas oportunidades.
- El panel de control del horno de microondas no está automatizado, es decir, el encendido de horno y el tiempo de calentamiento se establece directo en el panel de control del horno y no por la computadora.
- La desviación estándar en las medidas de temperaturas fue de 1,5 °C, esto afectó la reproducibilidad y obtención del producto final, ya que en la caracterización por medio de infrarrojo de las muestras obtenidas, se observa que el tipo de zeolita obtenida es diferente a la tipo Y, producto que se esperaba sintetizar.
- La inercia térmica, el carácter exotérmico de las reacciones, así como, la estabilidad térmica entre la muestra y el reactor, deben ser tomados en cuenta al momento de generar los patrones de calentamiento.

1.2. Justificaciones.

A. Técnica

- Realizar mejoras en el diseño, tales como el tipo de control ejercido en el horno de microondas, ayuda obtener mayor exactitud y precisión de las medidas.

B. Económica

- La adquisición de un horno de microondas con un sistema automático de control de temperatura a nivel de laboratorio, requiere su importación por medio de la universidad y el costo de este equipo en el mercado es muy alto [1 y 2], por lo tanto la compra de él en estos momentos no es factible.

C. Científica

- Permite que el laboratorio este a la vanguardia en el área de aceleración de reacciones químicas con el uso del método de calentamiento mediante radiación microondas, dicho método por los beneficios que ofrece con respecto al método convencional por conducción (Anexo 4, Tabla A4-1) ha hecho que los hornos microondas tengan aplicaciones importantes en diversas áreas al ofrecer mejores resultados, ver Anexo 5.

1.3. Objetivos.

En la sección 1.1 y 1.2 se describe los puntos clave en los cuales se enfoca este proyecto: primero, la dificultad de adquisición de un horno de microondas con sistema de control de temperatura incorporado y segundo, las características y limitaciones del sistema de control de temperatura diseñado anteriormente, por lo tanto, se propone los siguientes objetivos:

1.3.1. Objetivo General.

- Diseñar y elaborar a un bajo costo, utilizando un horno de microondas comercial, un sistema automático de control de temperatura con una precisión y exactitud tal que, las medidas sean confiables y exista reproducibilidad de los resultados en la aceleración de reacciones químicas.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Establecer un método de control que pueda garantizar una apreciación del equipo de 0,1 °C y la disminución de la desviación estándar promedio a un valor aproximado de 0,5 °C.
- Diseñar y construir un manejador de potencia, de acuerdo al método de control que se establezca. Este circuito será para el control del funcionamiento del magnetrón y el que recibe la señal del módulo controlador.
- Diseñar el software que servirá de plataforma entre PC y módulo de controlador, así como, programar el módulo.
- Realizar una serie de pruebas que permitan evaluar tanto las características como el funcionamiento del sistema automático de control de temperatura.
- Establecer una prueba para evaluar la tasa de evaporación de solución de ajo en etanol sin causar daños a la muestra, esto como una aplicación comercial de este nuevo diseño de sistema automático de control de temperatura.

Capítulo 2. Marco Teórico.

2.1. Sistema Automático de Control.

2.1.1. Definición.

Un sistema de control automatizado es un conjunto de dispositivos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan automáticamente las variables que intervienen en un proceso (velocidad, temperatura, presión, etc.), es decir, las variables son reguladas sin intervención de agentes exteriores, incluido el factor humano. Los elementos característicos de todo sistema de control son [3]:

- **Proceso o Planta:** Conjunto de elementos físicos o químicos susceptibles de ser controlados.
- **Actuador:** Elemento o dispositivo que concreta la acción tendiente a modificar la variable salida.
- **Transductor:** Es un dispositivo que transforma una magnitud física en otra capaz de ser interpretada por el sistema.
- **Controlador (o compensador):** Es un circuito que se encarga de emitir una señal correctiva, luego de la comparar el valor de la variable que se va a controlar, con el valor deseado (setpoint). La respuesta temporal del sistema que debe ser controlado, dependerá del tipo de acción que el controlador ejerza sobre las variables según se requiera. Su diseño involucra tres pasos: uno, especificaciones del diseño, es decir, que tiene que hacer y como lo va hacer; dos, determinar la configuración del compensador relativa a como está conectado al proceso de control y tercero, determinar los valores de los parámetros del controlador para lograr los objetivos del diseño [4].

2.1.2. Tipos de Sistema de Control.

2.11.2.1. Según el Efecto de la Salida Sobre la Acción del Control.

1. En lazo abierto

Un sistema de control en lazo o bucle abierto es aquél en el que la señal de salida no influye sobre la señal de entrada. La exactitud de estos sistemas depende de su calibración, de manera que al calibrar se establece una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada. El diagrama de bloque de un sistema en lazo abierto se puede observar en la figura 2 [5].

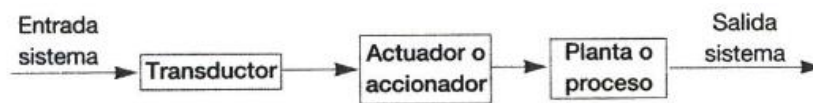


Fig. 2 Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto.

Nota. Recuperado de “Sistema Automático de control”, (28,02,2017) de http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~23005153/d_tecnologia/bajables/2%20bachillerato/SISTEMAS%20AUTOMATICOS%20DE%20CONTROL.pdf

2. En lazo cerrado

Un sistema de control de lazo cerrado es aquél en el que la acción de control es, en cierto modo, dependiente de la salida, la cual influye en la entrada. Para esto se necesita que la entrada sea modificada constantemente en función de la salida. Esto se consigue por medio de lo que llamamos “feedback” (realimentación o retroalimentación) [5].

La realimentación es la propiedad que tiene un sistema en lazo cerrado donde la salida o cualquier otra variable del sistema que se quiera controlar, se compara con la entrada del sistema o una de sus entradas, de manera que la acción de control se establezca como una función de ambas. El transductor de la señal de salida en ocasiones es llamado *realimentación*, ya que mide en cada instante el valor de la señal de salida y proporciona

un valor a dicha señal. En la figura 3, podemos ver el diagrama en bloque de este tipo de sistema de control, donde aparece un nuevo componente, el controlador [5].

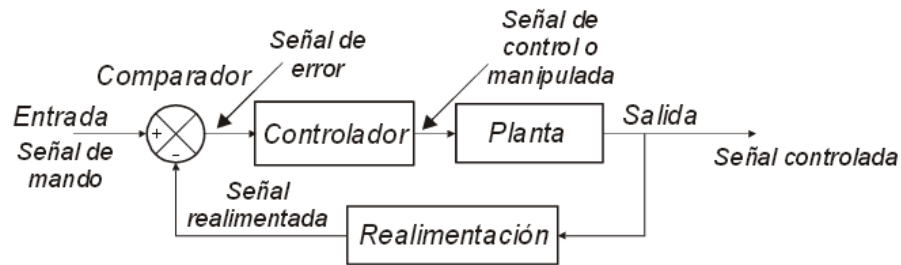


Fig. 3 Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado.

Nota. Recuperado de “Sistema Automático de control”, (28,02,2017) de http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~23005153/d_tecnologia/bajables/2%20bachillerato/SISTEMAS%20AUTOMATICOS%20DE%20CONTROL.pdf.

2.11.2.2. Según el Nivel de Control Implementado.

Podemos conseguir sistemas clasificados por el nivel de control que implementan [6]:

1. **Control manual.** Es cuando el trabajo de regular las variables es ejecutada por un operario, basándose en mediciones previas de la misma y según la experiencia, con el fin de compensar alguna alteración en el proceso.
2. **Control automático simple.** Cuando el trabajo de regular las variables es ejecutado por una máquina (controlador), obedeciendo indicaciones dadas de antemano según el tipo de proceso a controlar y el modo de acción de la máquina. Este modo de control es ejecutado en forma individual para cada sistema de proceso.
3. **Control automático por computadora.** Es la forma moderna de control de procesos, es un control integral, es decir, de todo el proceso mediante una sola máquina (computadora digital), la cual analiza las señales dadas por los puntos de medición y emite las señales respectivas hacia los elementos que regulan las variables.

2.11.2.3. Según su Acción de Control.

Existen seis tipos de control según el tipo de acción que ejerce en el sistema [7,8]:

1. Control ON-OFF.
2. Control Proporcional (P).
3. Control Integral (I).
4. Control Proporcional e Integral (PI).
5. Control Proporcional y Derivativo (PD).
6. Control Proporcional, Integral y Derivativo (PID).

En nuestro caso, el control que se implementó es el PID, ya que se quiere controlar la temperatura y esta varía muy rápidamente por efecto de las microondas, así como, debido a la existencia de reacciones químicas que son sensibles a su variación de manera brusca o sobrecalentarse causaría resultados no esperados. Este tipo de control, combina el integral, proporcional y derivativo ofreciendo una respuesta rápida y una compensación adecuada e inmediata de la señal de error, en los casos de cambios o perturbaciones.

Si consideramos un sistema lineal invariante con una señal de entrada $u(t)$, podemos observar en la figura 4, como la respuesta temporal ante una señal de error tipo rampa unitaria (impulso unitario $\delta(t)$), al aplicar el control, la compensación e la señal de error permite que la pendiente de subida de la señal de salida $y(t)$ disminuya con respecto a la señal de entrada, lo cual permite un incremento gradual en el tiempo .



Fig. 4 Respuesta temporal de un control tipo PID.

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

Sabiendo la respuesta temporal de la señal de entrada ante una señal de error tipo rampa unitaria, se puede encontrar la señal de salida $y(t)$ mediante la función de transferencia del controlador (transformada de Laplace de la respuesta al impulso), esta relación de la entrada y la salida entre las variables, está representada por la ecuación 1.2.

$$G(s) = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1.2)$$

Donde s es el operador de Laplace (variable compleja), K_p es la ganancia proporcional, T_d el tiempo de acción derivativa y T_i de la acción integral.

En la figura 5 se observa la respuesta temporal del control ante una señal de error unitaria $e(t)$ y como actúa cada control, el predominio en el control de la acción PI o PD depende de la velocidad de variación de la señal de error, si esta varía rápidamente la acción predominante será la proporcional y derivativa.

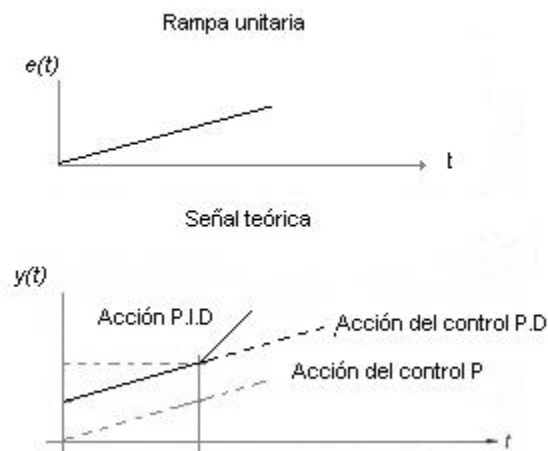


Fig. 5 Respuesta temporal de cada acción del control PID

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

El control proporcional (P) actúa como un amplificador, en el cual, la señal de control a la salida está relacionada con la entrada mediante una constante proporcional (K_p), debido a esto se disminuye el error en estado estable, aumenta tanto la velocidad de respuesta como el sobrepaso de la respuesta temporal. Al aplicar a dicha señal de entrada una acción derivativa, se ejerce un control proporcional y derivativo (PD), este mide la pendiente instantáneamente de la señal $e(t)$, anticipando así, la dirección de él y prediciendo el sobrepaso de la respuesta temporal a la rampa unitaria, esto permite que el controlador haga un esfuerzo correctivo antes de que exista un sobrepaso excesivo, se puede decir, que el control añade mejoras al amortiguamiento en el sistema y aumenta tanto el tiempo de levantamiento como el de asentamiento, sin afectar la respuesta en estado estable del control y mejorando la estabilidad del sistema. Sin embargo, puede no cumplir con los objetivos de compensación, la acción integral produce una señal que es proporcional a la integral con respecto al tiempo de la entrada del controlador, es decir, se ejerce un control proporcional e integral sobre el sistema (PI), este puede mejorar el error en estado estable, pero la estabilidad del sistema disminuye. Este tipo de control es prácticamente un filtro pasa bajos, por lo tanto el sistema compensado tiene un tiempo de levantamiento más bajo y un tiempo de asentamiento más largo [4].

2.2. Principios Básicos de Diseño de Sistemas de Control.

1. Requisitos Generales de Sistemas de Control.

Todo sistema de control, como requisito básico, debe ser *estable*. Es decir, si ocurre un cambio en la señal de referencia o se produce una perturbación, el sistema al principio se desviará de su valor, para luego alcanzar el valor correcto. Asimismo, la *velocidad de respuesta* debe ser aceptable, esto es, la variable controlada debe aproximarse con rapidez a la señal de referencia. Además debe tener también *exactitud*, el sistema de control debe ser capaz de reducir los errores a cero, o a un valor pequeño tolerable [6].

2. Teoría de Control Moderno Versus Teoría de Control Clásico.

Se debe identificar y tener claro si se va a trabajar con base a la teoría de control moderno o en base a la teoría de control clásico. Tomando en cuenta ambos casos, la dinámica del proceso que se desea controlar, se expresa normalmente con ecuaciones diferenciales ordinarias. En el caso de sistemas lineales se usa la transformada de Laplace, para obtener una representación matemática llamada función de transferencia [4 y 6].

- La teoría de control clásica, utiliza la *función de transferencia* para tener una relación matemática entre la señal que se quiere controlar y la señal de entrada al sistema. En ella se realiza el análisis y el diseño en el dominio de tiempo y/o en el dominio de frecuencias, donde se emplean las siguientes especificaciones:

Dominio Temporal: la precisión en estado estable, el sobrepaso máximo (M_p , valor del pico máximo de la señal de respuesta) y el tiempo de levantamiento (t_r , tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final) y asentamiento (t_s , tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final entre 2 y 5% y permanezca

dentro de él). Este diseño es factible analíticamente, solo para sistemas de segundo orden o que se puedan aproximar mediante uno de segundo orden.

Dominio de Frecuencia: el margen de ganancia (MG, indica la influencia que tiene sobre la estabilidad de un sistema, únicamente la variación de la ganancia del lazo), el de fase (MF, cantidad de retardo puro que se puede añadir al lazo en un sistema estable, antes de que el mismo se vuelva inestable) y el pico de resonancia (MR, frecuencia característica del sistema, en la cual alcanza el grado máximo de oscilación). Para sistemas de orden superior los controladores no presentan problemas y para cierto tipo de ellos, algunos procedimientos reducen el esfuerzo de prueba y el error a un mínimo.

- La teoría de control moderna, está basada en el concepto del *estado del sistema*. Cualquier ecuación diferencial de orden n se puede expresar como una ecuación de estado de primer orden, en notación vectorial-matricial. El análisis y el diseño se realizan en el dominio de tiempos.

La teoría de control clásica brinda generalmente buenos resultados para sistemas de control de una entrada y una salida (SISO). Sin embargo, dicha teoría no puede manejar los sistemas de control de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO).

3. Modelado Matemático.

Los componentes que abarcan los sistemas de control son muy diversos. Pueden ser electromecánicos, hidráulicos, neumáticos, electrónicos, etc. Para conocer el comportamiento de los elementos que eventualmente pueden formar parte del sistema a controlar, en lugar de operar con dispositivos o componentes físicos, se les reemplaza por sus modelos matemáticos, esto es, ecuaciones diferenciales de varios tipos [6].

Un modelo matemático, debe representar los aspectos esenciales de un componente físico. Las predicciones sobre el comportamiento de un sistema, basadas en el modelo

matemático, deben ser bastante precisas. En algunos casos, los sistemas puede ser diferentes y ser representados por el mismo modelo. El uso de ellos, permite desarrollar una teoría de control unificada [6].

Aunque las relaciones entrada-salida de muchos componentes que se trabajan en el modelo matemático son no-lineales, normalmente se hacen lineales, para facilitar el manejo tanto analíticamente como computacional [6].

4. Análisis y diseño de sistemas de control.

En este punto es importante definir los siguientes términos [6]:

Análisis de un sistema de control: Es la investigación, bajo condiciones especificadas, del comportamiento de un sistema cuyo modelo matemático se conoce. Como cualquier sistema consta de componentes, el análisis debe comenzar con una descripción matemática de cada uno de ellos. Una vez que se ha elaborado un modelo del sistema completo, la forma en que el análisis se lleva a cabo, es independiente de si el sistema físico es neumático, eléctrico, mecánico, etc.

Análisis de respuesta transitoria: En general, los sistemas físicos reales que forman parte del sistema de control, poseen inercias que le impiden seguir la señal de entrada de manera instantánea, esto implica la existencia de un período transitorio que es necesario conocer, así como el tiempo requerido para llegar al estado estacionario.

Análisis de respuesta en estado estable: Es la determinación de la respuesta tras la desaparición de la respuesta transitoria.

Diseño de un sistema de control: El objetivo es hallar un sistema que cumpla una tarea dada y lograr que las variables controladas se comporten en cierta forma deseada, si las características de respuesta dinámica y/o de estado estacionario no son satisfactorias, se debe agregar una compensación al proceso controlado.

La mayoría de los métodos se basan en el diseño de una configuración fija, en el cual al principio el diseñador decide la configuración básica del diseño y donde será colocado el controlador en relación con el proceso controlado. Existen tres tipos de compensación [4]:

- **En serie (cascada).** Este es el más común, él se coloca en serie el controlador con el proceso. En la figura 6 se muestra el diagrama en bloques del compensador.

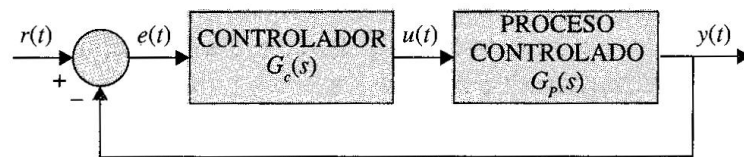


Fig. 6 Diagrama en bloques de un compensador en serie (cascada)

Nota. Recuperado de "Sistemas de control Automáticos" de Kuo B. (1996).

- **Mediante realimentación.** El controlador se coloca en la trayectoria menor de alimentación, ver la figura 7.

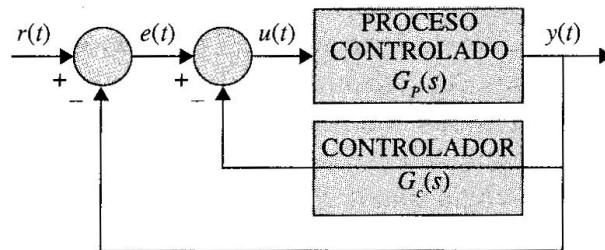


Fig. 7 Diagrama en bloques de un compensador mediante realimentación

Nota. Recuperado de "Sistemas de control Automáticos" de Kuo B. (1996).

- **Mediante la realimentación de estado.** En la figura 8, se muestra como la señal de control se genera mediante la realimentación de las variables de estado a través de ganancias constantes reales, si el sistema es de orden superior se

requeriría de gran cantidades de transductores para detectar las variables, lo que pudiera ocasionar problemas a nivel económico y de practicidad.

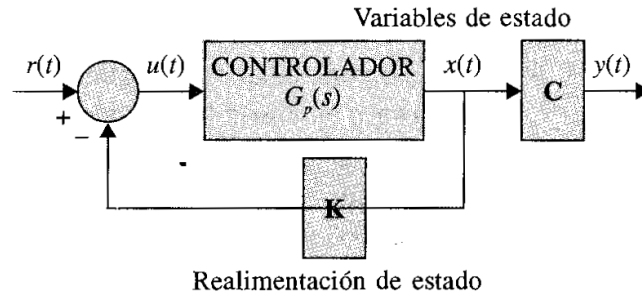


Fig. 8 Diagrama en bloques de un compensador mediante realimentación de estado

Nota. Recuperado de "Sistemas de control Automáticos" de Kuo B. (1996).

- **En serie-realimentada.** Como se muestra en la figura 9, se emplea un controlador tanto en serie con el proceso como es su realimentación.

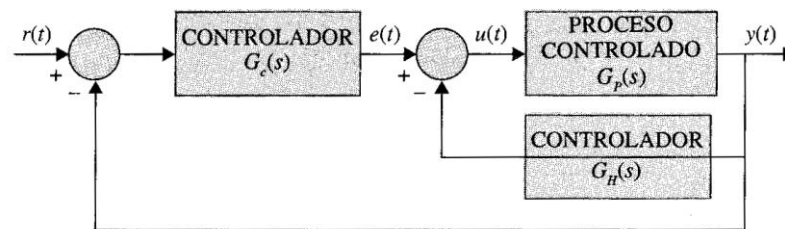


Fig. 9 Diagrama en bloques de un compensador en serie-realimentada

Nota. Recuperado de "Sistemas de control Automáticos" de Kuo B. (1996).

- **Prealimentado.** Existe dos configuraciones en este caso. Una, el controlador prealimentado está en serie con el sistema en lazo cerrado, dicho sistema tiene un controlador en la línea directa de la trayectoria con el proceso de control (Fig. 10a) y la otra, el controlador prealimentado este en paralelo con la línea directa del proceso (Fig. 10b).

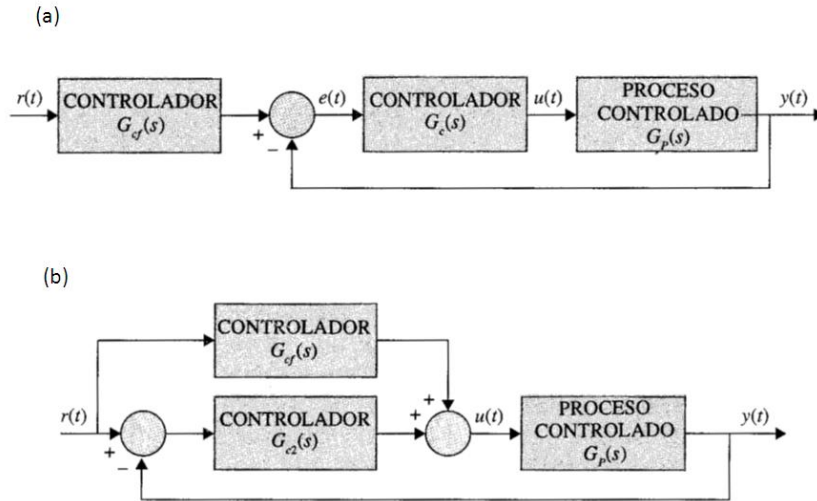


Fig. 10 Diagrama en bloques de un compensador prealimentado: a) en serie y b) paralelo

Nota. Recuperado de “Sistemas de control Automáticos” de Kuo B. (1996).

Síntesis: Encontrar mediante un procedimiento directo, un sistema de control que se comporte de un modo específico. Generalmente, tal procedimiento es totalmente matemático, de principio a fin del proceso de diseño. Se dispone de procedimientos de síntesis para el caso de sistemas lineales y para sistemas lineales de control óptimo.

En años recientes, las computadoras digitales han jugado un importante papel en el análisis, diseño y operación de sistemas de control. La computadora puede utilizarse para efectuar los cálculos necesarios, para simular los componentes de un sistema o una planta, o para controlar un sistema.

5. Método básico de diseño de control.

La síntesis de sistemas de control lineales es teóricamente posible, y se puede determinar sistemáticamente los componentes necesarios para realizar el objetivo propuesto. En la práctica sin embargo, el sistema puede estar expuesto a muchas restricciones, no ser lineal o que las características de los componentes no se conozcan con precisión, en tales casos, no se cuenta actualmente con métodos de síntesis. Por tanto, siempre resultará necesario seguir “procedimientos de tanteo”. No obstante en la práctica a

menudo se enfrentan situaciones en las que un proceso no es alterable, es decir, no se tiene la libertad de modificar la dinámica del proceso y se debe diseñar el resto del sistema, de modo que el conjunto cumpla con las normas previstas en tanto se lleva a cabo la tarea propuesta [6].

Las especificaciones pueden incluir factores tales como la velocidad de respuesta, estabilidad, exactitud, confiabilidad y costo. En algunos casos los requerimientos o especificaciones pueden darse explícitamente y en otros no. Todos los requerimientos o especificaciones deben interpretarse en términos matemáticos. Es importante recordar que algunas de las especificaciones quizás no sean realistas. En tal caso, las especificaciones deben revisarse en las primeras etapas del diseño. Asimismo las especificaciones dadas, en el caso de que incluyan condiciones contradictorias o conflictivas, los cuales se deben buscar la manera de resolver en forma satisfactoria [6].

El diseño basado en teoría de control moderna, requiere que el diseñador tenga un índice de desempeño razonable, es decir, una medida cuantitativa del comportamiento, que indica la desviación con respecto al comportamiento ideal. Este en particular se determina por los objetivos del sistema de control [6].

2.3. Planta ó Proceso: Horno de Microondas.

2.3.1. Definición.

Un horno de microondas comercial es una cavidad electromagnética multimodo con paredes reflectoras. En él 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. Este tipo de hornos operan a la frecuencia de 2,45 GHz, generando microondas con una longitud de onda aproximadamente de 12,24 cm, con potencia constante entre 500 W y 1000 W, dependiendo del modelo del horno de

microondas que se esté usando. Como se puede observar en la figura 11, la estructura básica de un horno de microondas convencional es la siguiente [8-10]:

- Transformador de alto voltaje
- Capacitor de alto voltaje
- Magnetron
- Ventilador como sistema de enfriamiento del magnetron
- Guía de ondas
- Antena del magnetron
- Ranura de entrada a la cavidad
- Ventilador de aspas “Stirrer Blade” (distribuidor) o en su defecto un plato giratorio
- Salida de aire
- Lámpara
- Malla de alambrado en la puerta, previene la fuga de las microondas.
- Cavidad
- Mecanismos de seguridad, dispositivos que garantizan la desactivación del magnetron al estar abierta la puerta, así como, un sensor de calor en la estructura metálica que desactiva el magnetron en caso que se sobrecaliente la cavidad.
- Panel de Control, se encarga de controlar el tiempo de calentamiento y la potencia.

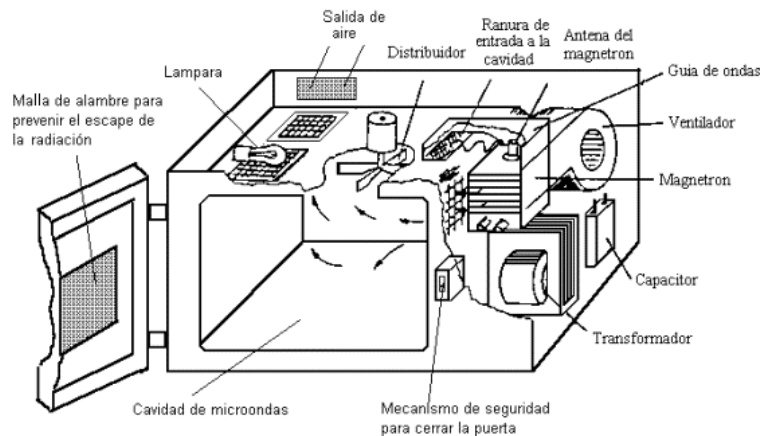


Fig. 11 Estructura básica de un horno de microondas convencional.

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

2.3.2. Método de Calentamiento: Radiación Microondas.

Una vez activado el horno el magnetrón genera las microondas, estas son conducidas por la guía de ondas hasta la parte interna del horno. Dentro de la cavidad del horno de microondas se propagan en varias direcciones. Si el horno no tienes ventilador de aspas sino plato giratorio las microondas chocan solo con las paredes, al moverse el plato permite un calentamiento uniforme. Si es el caso de que el horno tenga ventilador de aspas (ya en des uso) las microondas chocan con las paredes y las aspas “Stirrer Blade” pero el calentamiento no es suficientemente uniforme. El calentamiento por la radiación de las microondas se genera dentro de la muestra debido a la penetración de unos pocos centímetros de las microondas, a diferencia de un horno convencional donde se aplica el calor al exterior de las muestras. [8-10]

Un horno de microondas nunca debe ser activado sin nada dentro, debe tener una carga que absorba las microondas generadas, toda la energía rebota dentro y una gran cantidad se refleja de vuelta a la fuente. Esto puede causar costosos daños al magnetrón y otros componentes [4].

2.3.2.1. 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 figura 12, los campos están perpendiculares entre si y también con respecto a la dirección de propagación [8 y 11].

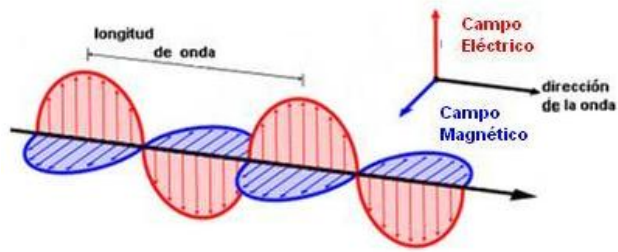


Fig. 12 Onda electromagnética.

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

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 1 mm (10^{-3} m) hasta 1 m. Las podemos ubicar en el espectro electromagnético entre las ondas de radios y el infrarrojo, ver figura 13 [8 y 11].

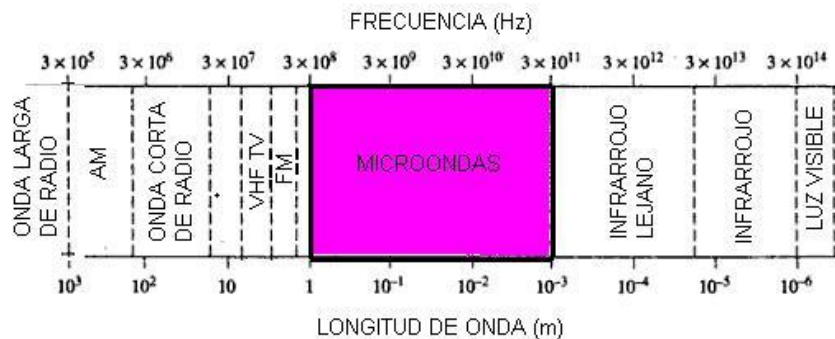


Fig. 13 Ubicación de las microondas en el espectro electromagnético.

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

La radiación microonda es de tipo no ionizantes, al interactuar con la materia no modifican la estructura electrónica del material, el mecanismo único de calentamiento mediante ella es llamado calentamiento dieléctrico (calentamiento eléctrico indirecto). Características generales de este tipo de ondas electromagnéticas [12]:

- Penetración de la radiación, la profundidad de penetración depende de tres factores:
 - La longitud de onda de las microondas, si disminuye la longitud aumenta la frecuencia y la capacidad de penetración disminuye.
 - Conductividad eléctrica de las muestras, a menor conductividad menor penetración, a conductividad elevada son absorbidas.
- Calentamiento rápido, la velocidad de generar calor es inversamente proporcional al cuadrado de la profundidad de penetración.
- Calentamiento selectivo del material a través del calentamiento inducido sobre partículas eléctricamente cargadas.

2.3.2.2. Calentamiento Dieléctricos Mediante Radiaciones de Microondas

En un mecanismo de calentamiento dieléctrico, el proceso de calentamiento se produce por la conversión de la energía eléctrica en radiación electromagnética que genera calor en el interior del material expuesto, este se explica mediante las pérdidas dieléctricas, lo cual hace que la “constante dieléctrica” de los materiales influya en su calentamiento. Al someter algún alimento, material, reacción química, etc. a un campo eléctrico alternante, pueden ocurrir dos fenómenos [8]:

1. Rotación Dipolar

Dependiendo de la condición de polaridad de las moléculas, cuando el campo eléctrico de la radiación interactúa con ellas, comienzan a girar sus dipolos tanto en sentido horario como antihorario (Fig. 14), 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 de las colisiones entre las moléculas y las interacciones entre los campos eléctricos y magnéticos locales, aumenta la energía cinética de las moléculas generándose el calentamiento instantáneo y uniforme de los materiales [8].

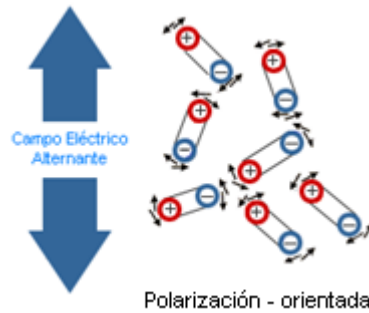


Fig. 14 Rotación dipolar.

Nota. Recuperado de “Microondas [CH Wonders] – CH”
(07,09,2017) de <http://www.chw.net/2011/09/microondas-chwonders/>

2. 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 (Fig. 15), transformando la energía cinética en calor [8].

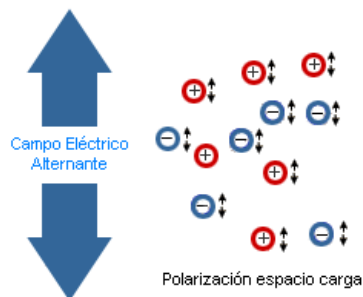


Fig. 15 Desplazamiento iónico.

Nota. Recuperado de “Microondas [CH Wonders] – CH”
(07,09,2017) de <http://www.chw.net/2011/09/microondas-chwonders/>

2.3.2.3. Comportamiento de Distintos Materiales Frente a las Microondas.

En un horno de microondas ya que el calentamiento es relativamente uniforme en todo el líquido puede ocurrir un sobrecalentamiento y no darnos cuentas. La mayoría de los

objetos de metal deben ser excluidos de un horno de microondas, especialmente si tienen bordes filosos (zonas de alto gradiente de campo eléctrico) que puede generar chispas o arcos, que como mínimo es un riesgo de incendio [9].

a) Materiales Conductores Con Electrones Libres.

En esta clasificación de materiales encontramos diferentes metales, al incidir las microondas perpendicularmente sobre su superficie, el campo eléctrico mueve rápidamente los electrones produciendo un calentamiento instantáneo y que las microondas se reflejen. Desde otro punto de vista, el campo magnético producirá una inducción de corriente de Foucault (corriente eléctricas circulares inducidas) que producirán calentamiento óhmico [8].

b) Materiales Eléctricamente Neutros.

Podemos encontrar en esta clasificación: el teflón, la cerámica, vidrios, etc., en este tipo de materiales, no hay dipolos eléctricos presentes, por lo tanto, con una baja pérdida dieléctrica que permiten que la onda atraviese el material con una pequeña atenuación o ninguna, estos pueden ser totalmente transparentes a las microondas [8].

c) Materiales Polares.

Materiales como: agua, alcoholes, grasas, albúminas e hidratos de carbono, son capaces de absorber la onda electromagnética y transformarla en calor. En el caso de fluidos el calentamiento se produce debido a dos mecanismos de calentamiento por radiación de microondas: rotación dipolar y conducción iónica [8].

2.3.3. 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 ecuación 2.2. 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 [8].

$$\tan \gamma = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.2)$$

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 3 GHz [8].

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. Cuadro de valores de constante dieléctrica, factor de pérdida dieléctrica, y factor de disipación de algunos materiales

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

2.4. Actuador: El Magnetron.

2.4.1. Definición.

Es un tubo electrónico tipo diodo, que se emplea para producir ondas electromagnéticas, en este caso las microondas. Las configuraciones exteriores de los magnetrones, varían según la marca y el modelo, pero la estructura básica interna (Fig. 16) siempre es la misma y la compone: el bloque del ánodo, un filamento, una antena, dos imanes permanentes y el

soporte de la estructura [8].

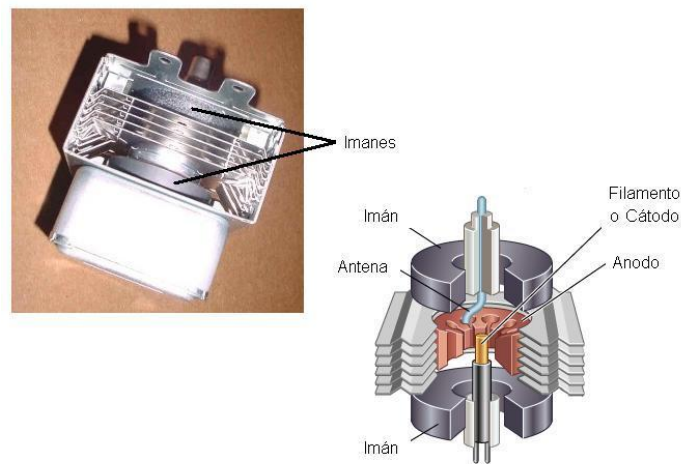


Fig. 16 Estructura básica de un magnetrón.

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

2.4.2. Generación de Microondas Mediante un Magnetrón.

Un circuito calienta el filamento y la camisa, al punto de emitir electrones (efecto termoiónico), estos toman una trayectoria lineal hacia los segmentos del ánodo en ausencia de campo magnético (Fig. 17). Debido a una diferencia de potencial de unos 4KV entre el cátodo (elemento de calefacción) y el ánodo, se aceleran los electrones entre ellos [8].

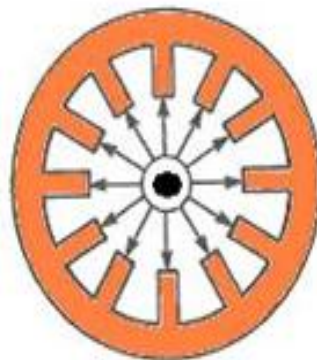


Fig. 17 Trayectoria de los electrones en ausencia de campo magnético.

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

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 figura 18. Los electrones, viajan con una trayectoria curva, volviendo a su punto de partida sin tocar el ánodo, ya que el campo es suficientemente intenso [8].



Fig. 18 Trayectoria de los electrones en presencia de campo magnético.

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

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 (Fig. 19). Como se ve en la misma figura, los circuitos están conectados entre sí [8].

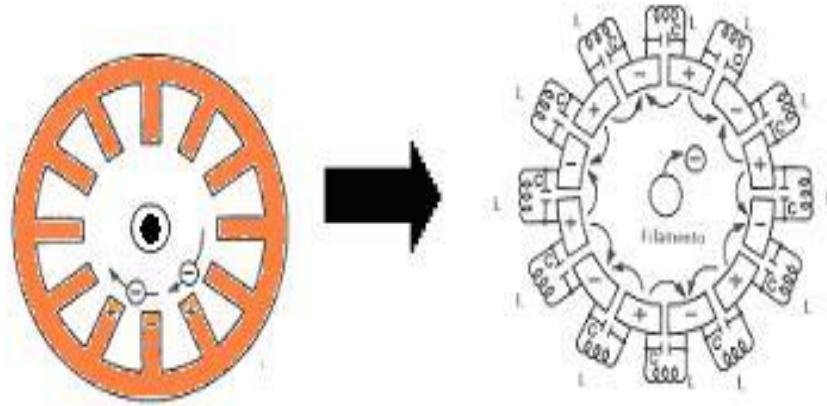


Fig. 19 Visualización de los segmentos del ánodo como circuitos resonantes.

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

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 figura 20 [8].

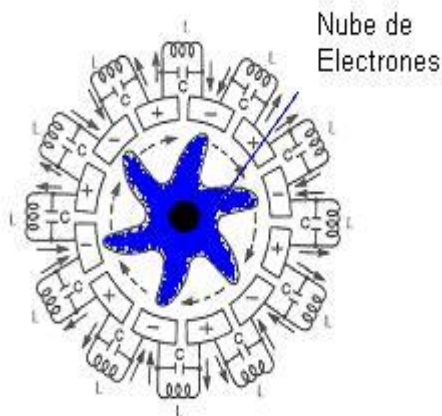


Fig. 20 Nube de electrones.

Nota. Recuperado de “Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas” de Errico B. (2011).

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 se desplazan de un lado a otro de la antena a la frecuencia de las cavidades resonantes, originándose alrededor de ella una onda electromagnética (las microondas) que se transporta mediante una guía de onda al interior del horno [8].

2.5. Sensor: Sonda de Fibra Óptica.

2.5.1. Definición.

Fibra óptica es un medio utilizado para transmitir señales electromagnéticas de alta frecuencia tal como área del infrarrojo y luz visible. Éstas se usan como portadoras de información y se limitan a un ancho de banda como se muestra en la figura 21 situado entre 193.000 GHz y 354.000 GHz ($1,93 \times 10^{14}$ Hz – $3,54 \times 10^{14}$ Hz) [13].

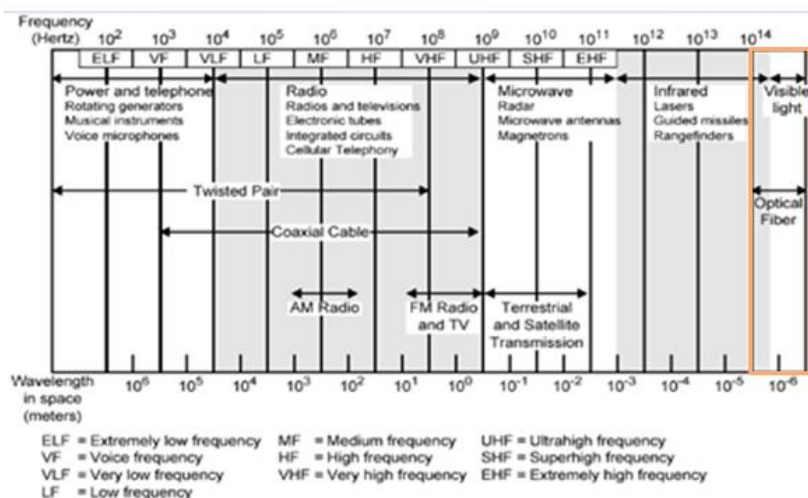


Fig. 21 Ubicación de ancho de banda de la fibra óptica en el espectro electromagnético.

Nota. Recuperado de “Medio de Transmisión”, (25, 05, 2017) de <http://modul.galeon.com/aficiones1360146.html>

La fibra puede ser fabricada de silicio (vidrio) o plástico muy procesado, en ella se producen los fenómenos físicos de reflexión y refracción. La pureza de este material es lo que marca la diferencia para saber si es buena para transmitir o no, una simple impureza puede desviar el haz de luz, haciendo que este se pierda o no llegue a destino. La aplicación de ella se extienden áreas como:

1. Telecomunicación y prácticas militares para la comunicación.
2. Medicina y arqueología para observaciones directas en zonas de poco acceso.
3. Sensores de temperatura, tensión, presión, de niveles de compuestos químicos entre otros

2.5.2. Principio Básico de Transmisión del Haz de Luz a Través de la Fibra Óptica.

La figura.22 muestra como el haz de luz queda completamente confinado dentro de la fibra óptica y se propaga usando el principio de reflexión (ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total interna), en función de la ley de Snell y el principio de refracción, la fuente de luz puede ser láser o un LED [13].

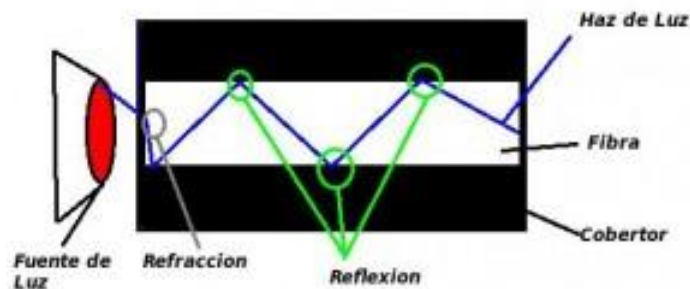


Fig. 22 Principios básicos de transmisión del haz de luz.

Nota. Recuperado de “Fibra Óptica, qué es y cómo funciona “ Rodríguez, A.. (18 ,06,2015) de <http://www.fibraoptica hoy.com/fibra-optica-que-es-y-como-funciona/>

2.5.3. Tipos de Fibra Óptica Según el Modo de Propagación del Haz de Luz.

- **Multimodo:** Los haces de luz con longitud de ondas entre 850nm y 1300nm pueden ser transportados por más de una vía por sucesivos modos de propagación y de manera simultánea, su núcleo tienen un diámetro entre 50 y 62,5 μm y el revestimiento de vidrio un diámetro de 125 μm , tiene un índice de refracción superior, aunque de igual magnitud que su revestimiento, ver figura 23. Se utiliza generalmente en un radio de distancias cortas menor a 10 km. Sus ventajas radican es su bajo costo y su simplicidad de conexión [16]:

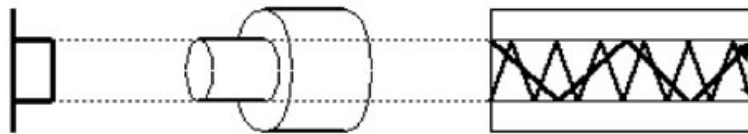


Fig. 23 Trasmisión multimodo de haz de luz.

Nota. Recuperado de “Fibra Óptica, qué es y cómo funciona “ Rodríguez, A.. (18/06,2015) de <http://www.fibraoptica hoy.com/fibra-optica-que-es-y-como-funciona/>

A su vez, existen dos tipos de fibra óptica multimodo, según el índice de refracción del núcleo:

- Escalonado: el índice de refracción es constante en la totalidad de su sección cilíndrica. Su dispersión modal es alta.
 - Gradual: el índice no es constante, el núcleo está formado por materiales diversos. La velocidad de transmisión entre los haces de luz puede ser distinta. Su dispersión modal es baja.
- **Monomodo:** Los haces con longitud de ondas entre 1300nm y 1550nm se propagan de un único modo sin reflexión (Fig. 24), su núcleo tienen un diámetro entre 9 y 50 μm y el revestimiento de vidrio un diámetro de 125 μm . Tiene un alcance de trasmisión máximo de 400 km, en condiciones generales. Su ancho de banda es muy grande, por lo que tiene una capacidad de transmisión de datos muy alta. Además, es inmune a interferencias electromagnéticas. Por todo esto, su principal aplicación es

en complejos sistemas de telecomunicaciones. Su desventaja es su alto costo y su mayor dificultad para ser instalada y mantenida [16].

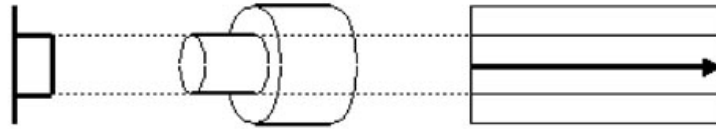


Fig. 24 Trasmisión monomodo de haz de luz.

Un sensor de fibra óptica es un instrumento de medición que consta de: Un transmisor, un receptor y una sonda de fibra óptica. La sonda es la encargada de sensar mediante una o varias fibras ópticas y tiene diversas capas como se muestra en la figura 25, esto depende de su fabricación. Existen diferentes principios físicos (Anexo 6), que se pueden usar al momento de la fabricación de la fibra para lograr la transmisión en ella, esto varía según la variable a medir.

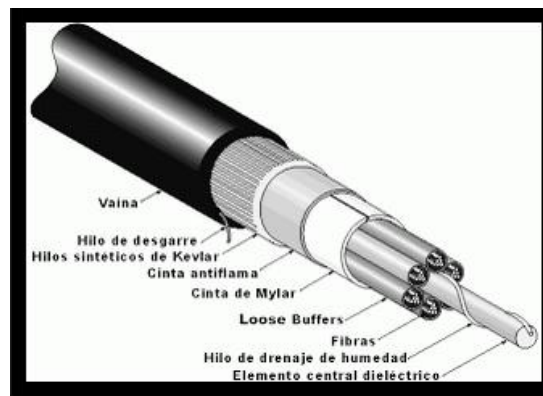


Fig. 25 Sonda de fibra óptica

Nota. Recuperado de “Fibra Óptica, qué es y cómo funciona “ Rodríguez, A.. (18 ,06,2015) de <http://www.fibraoptica hoy.com/fibra-optica-que-es-y-como-funciona/>

Existen ciertas características en las sondas que nos permite trabajar con ellos, por ejemplo [14]:

1. No se ven perturbados por campos electromagnéticos.
2. Son resistentes al agua, calor y corrosión, gracias a sus múltiples capas de protección.

3. Son de pequeño tamaño, flexibles y livianos, por tanto, ocupa poco espacio y fácil instalación.

2.5.4. Principios Físicos para la Medición de la Temperatura Mediante una Sonda de Fibra Óptica.

En nuestro caso la sonda de fibra óptica, aplica una técnica simple de espectrometría para medir la temperatura. Se basa en el cambio que sufre la intensidad de la luz infrarroja al hacer contacto con el cristal semiconductor de GaAs debido a la variación de la temperatura, en la figura 26 se observa la estructura básica este tipo de sondas de fibra óptica [17].

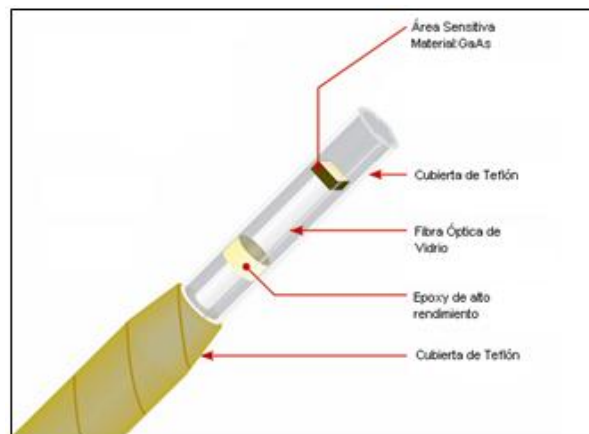


Fig. 26 Sonda de fibra óptica.

Nota. Recuperado de “Transequipos S.A. Monitoreo Inteligente del Transformadore.”
http://www.transequipos.com/index.php?option=com_content&view=article&id=135&Itemid=300

El proceso de medición de temperatura se realiza mediante el envío y la posterior captación de luz infrarroja en el módulo acondicionador de señal. La luz se transmite a lo largo de la sonda, hacia el cristal, éste absorbe ciertas longitudes de onda. Las ondas reflejadas al módulo, cuya intensidad varía según la temperatura, son recibidas por un detector lineal CCD (“*charge-coupled device*”, dispositivo de carga acoplada) y convertida en una lectura de la temperatura absoluta, utilizando un método de procesamiento digital

de señales basado en filtrado adaptativo [17]. El sensor de temperatura que usamos tiene como componente las sondas de fibra óptica y módulo de acondicionamiento de señal que se muestra en la figura 27.

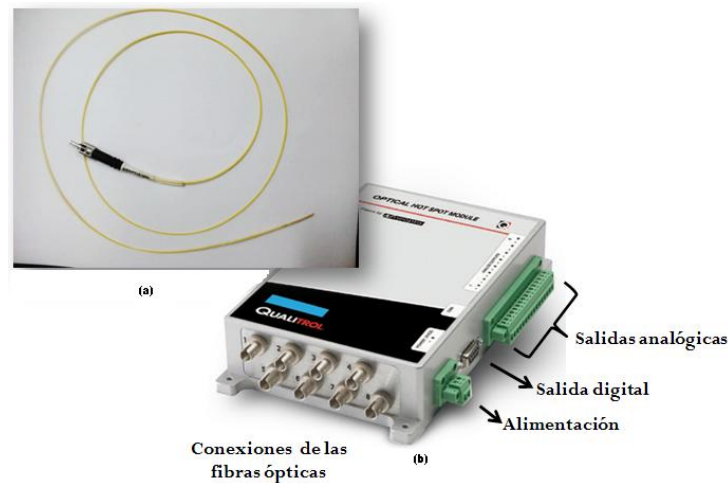


Fig. 27 (a) Sonda de fibra óptica; (b) Módulo acondicionador de señal.

Características de la Sonda de Fibra Óptica

“T1 Fiber Optic Temperature Sensor” Su capacidad térmica es desde $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el rango de medición de temperatura comprendido entre 0°C hasta $250\text{ }^{\circ}\text{C}$., el error de medición es menor a $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y tiene una longitud de 1 metro y su diámetro es de 1,15 milímetros. El área sensitiva es de 400 micrones (área del cristal) y su tiempo de respuesta es de 250 ms [18].

Características del Módulo de Acondicionamiento de la Señal de la Fibra Óptica.

- **“T / Guard Link (RevB) System”** El módulo de adaptación del sensor de fibra óptica que se usó se alimenta con 18 VDC (0,67 A), tiene para adaptar de máximo 8 conexiones de fibra óptica, 8 salidas analógicas que dan valores desde 0 VDC hasta 10 VDC (4-20 mA) y una salida digital (la empresa proporciona un software) con comunicación serial o Modbus RTU, cuenta con RS-232 con aislamiento

óptico o RS-485 [19] y una resolución de lectura de lectura de 1 °C (-80 to +250 °C)

2.6. Módulo Controlador: Placa Arduino.

Un Arduino es una plataforma de hardware diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios; consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR (Atmega168, Atmega328, Atmega1280 y Atmega8), puertos de entrada/salida y un entorno de desarrollo. Éste utiliza el lenguaje de programación “Processing/Wiring” y el cargador de arranque, que es ejecutado en la placa, se programa en el ordenador, para que la placa controle los componentes electrónicos. [20].

Para este proyecto utilizaremos un “Arduino UNO” (Fig. 28), este trabaja con un microcontrolador ATmega328P, cuenta con 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación (voltaje de entrada 7 V-12 V), el método de programación es ICSP (“In Circuit Serial Programming”), memoria flash de 32 KB y un botón de reinicio [21].

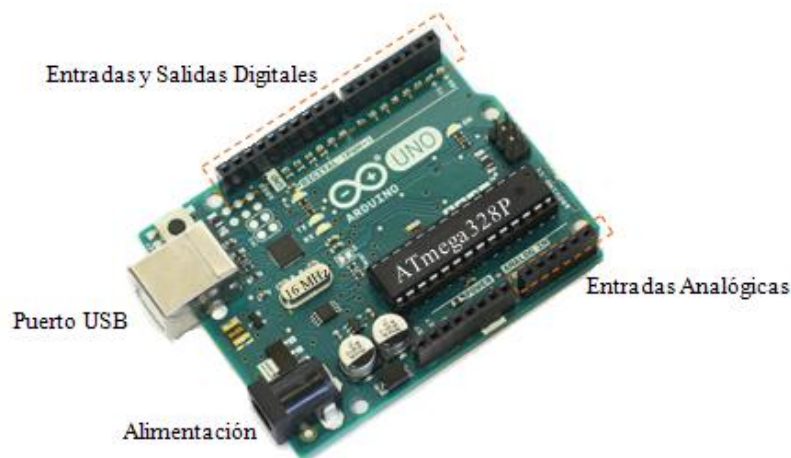


Fig. 28 Estructura básica de una tarjeta “Arduino UNO”.

El programa con que se trabaja este tipo de placa electrónica, se implementa haciendo uso del entorno propio de los Arduino y se transfiere empleando un cable USB. En caso de placas con puertos USB, no es preciso utilizar una fuente de alimentación externa, ya que el propio cable USB la proporciona. Para la realización de algunos de los experimentos puede ser necesario disponer de una fuente de alimentación externa ya que la alimentación proporcionada por el USB puede no ser suficiente. El voltaje de la fuente puede estar entre 6 y 25 Voltios [20].

2.6.1. Entorno de Desarrollo.

Para programar la placa es necesario descargar de la página web de Arduino, el entorno de desarrollo (IDE). Se dispone de versiones para Windows y para MAC, así como las fuentes para compilarlas en LINUX. En la figura 29 se muestra un ejemplo del aspecto del entorno de programación. En el caso de disponer de una placa con puertos USB, es necesario instalar los “drivers” FTDI. Estos vienen incluidos en el paquete de Arduino mencionado anteriormente, existen en la web diversas versiones para distintos sistemas operativos [20].

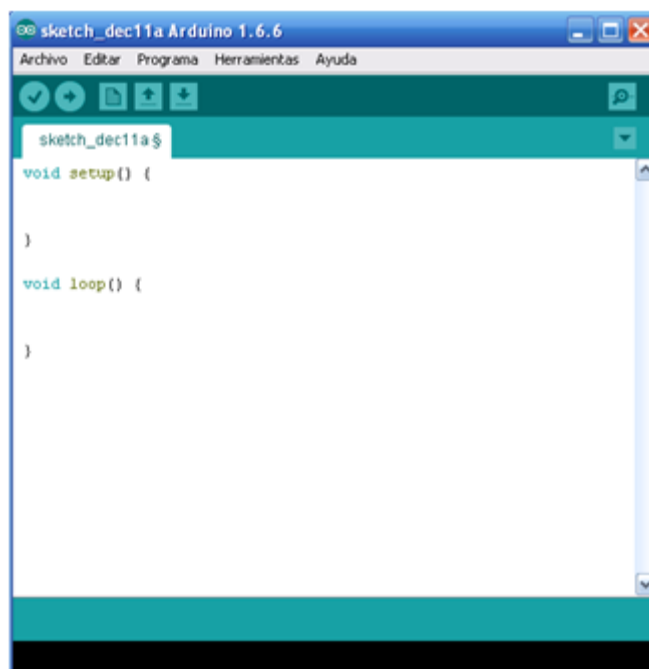


Fig. 29 Ejemplo de un entorno de desarrollo de las tarjetas Arduino.

Lo primero que tenemos que hacer para comenzar a trabajar con el entorno de desarrollo de Arduino es configurar las comunicaciones entre la placa y el PC. Para ello debemos abrir en el menú del entorno de desarrollo "Herramienta" en la opción "Puerto". En esta opción deberemos seleccionar el puerto serial al que está conectada nuestra placa. En Window's, si lo desconocemos, podemos hallarlo mediante el administrador de dispositivos (Puertos COM & LPT/ USB Serial Port) [20].

2.6.2. Estructura básica de un programa para Arduino.

La estructura básica de programación de Arduino es bastante simple y divide la ejecución en dos partes [21]:

La estructura "Setup()" Esta se ejecuta una única vez, constituye la preparación inicial del programa, en ella se incluye la configuración de la placa y es la primera acción que realiza el programa.

La estructura "loop()" incluye el código a ser ejecutado repetitivamente por el programa.

Al momento de programar la placa Arduino se deben definir el tipo de dato con el cual se va a trabajar, a continuación en la tabla 2 se muestra los cinco tipos de datos con su descripción [21].

DATOS	DESCRIPCIÓN
Byte	Almacena un valor numérico de 8 bits. Tienen un rango de 0-255.
Int	Almacena un valor entero de 16 bits con un rango de 32,767 a -32,768.
Long	Valor entero almacenado en 32 bits con un rango

	de 2,147,483,647 a -2,147,483,648.
Float	Tipo coma flotante almacenado en 32 bits con un rango de 3.4028235E+38 a -3.4028235E+38.
Arrays	Se trata de una colección de valores que pueden ser accedidos con un número de índice (el primer valor del índice es 0).

Tabla 2. Tipos de datos y su descripción.

2.6.3. Entradas y salidas digitales y analógicas.

En el caso del “Arduino UNO” como se mencionó anteriormente cuenta con 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, en cuanto el manejo de esas entradas y salidas, tanto digitales como las analógicas, se trabajan con las siguientes funciones [21]:

pinMode(pin, mode)

Es una función usada dentro de la estructura “setup()”, para configurar un pin dado, para que se comporte como entrada o salida. Ej. pinMode(pin, salida); configura el pin número 'pin' como salida. Los pines del Arduino funcionan por defecto como entradas, de forma que no necesitan declararse explícitamente como entradas empleando “pinMode()”.

digitalRead(pin)

Lee el valor desde un pin digital específico. Devuelve un valor alto o bajo. El pin puede ser especificado con una variable o una constante (0-13). Ej. v = digitalRead(Pin).

digitalWrite(pin, value)

Introduce un nivel alto o bajo en el pin digital especificado. De nuevo, el pin puede ser especificado con una variable o una constante 0-13. Ej. digitalWrite(pin, alto).

analogRead(pin)

Lee el valor desde el pin analógico especificado con una resolución de 10 bits. Esta función solo funciona en los pines analógicos (0-5). El valor resultante es un entero de 0 a 1023. Los pines analógicos, a diferencia de los digitales no necesitan declararse previamente como entrada o salida.

analogWrite(pin, value)

Escribe un pseudo-valor analógico usando modulación por ancho de pulso (PWM “Pulse Width-Modulation”) en un pin de salida marcado como PWM. Esta función está activa para los pines 3, 5, 6, 9, 10, 11. Por ejemplo: `analogWrite(pin, v);` escribe 'v' en el 'pin' analógico, y se le puede especificar un valor entre 0 - 255. Un valor 0 genera 0 Voltios en el pin especificado y 255 genera 5 V. El pin alterna rápidamente entre 0 V y 5 V, cuanto mayor sea el valor de “v”, más a menudo el pin se encuentra en alto (5 V). Veamos tres casos, un valor de 64 será 0 V tres cuartas partes del tiempo y 5 V una cuarta parte. Un valor de 128 será 0 V la mitad del tiempo y 5 V la otra mitad. Un valor de 192 será 0 V una cuarta parte del tiempo y 5 V tres cuartas partes.

2.6.4. Señales analógicas de salida en el Arduino usando PWM “Pulse Width-Modulation”.

Para generar una señal analógica se hace uso de PWM, ésta señal es para la modulación del ancho del pulso, donde [22]:

- PW “Pulse Width” o ancho de pulso, representa al ancho en tiempo del pulso.
- “length/period” periodo o ciclo, es el tiempo total que dura la señal.

La frecuencia (f) se define como la cantidad de pulsos (estado encendido/apagado) por segundo y es la inversa del periodo (T), como muestra la ecuación 3.2.

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

Existe otro parámetro asociado a la señal PWM, denominado ciclo de trabajo "duty cycle", el cual determina el voltaje aplicado o porcentaje de tiempo que el pulso está en estado activo (encendido) durante un ciclo.

Por ejemplo, si una señal tiene un periodo de 10 ms y sus pulsos son de ancho (PW) 2 ms, dicha señal tiene un ciclo de trabajo de 20 % (20 % encendido y 80 % apagado). Como se muestra en la figura 30, muestra tres señales PWM con diferentes ciclos de trabajo [22].

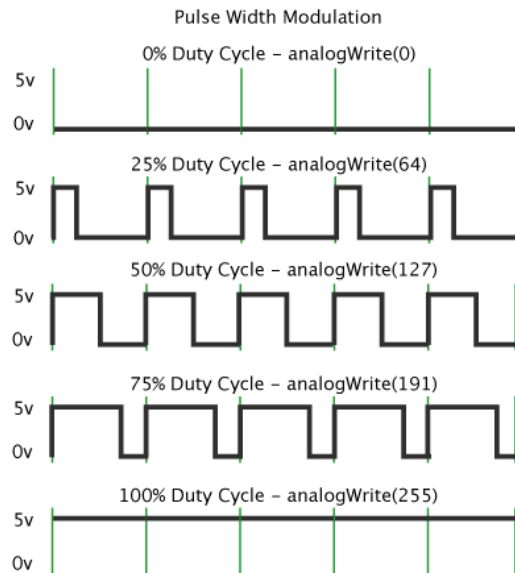


Fig. 30 Ciclo de trabajo asociado a la señal PWM..

Los casos en los cuales se usa la señal PWM son los siguientes [22]:

- Como método para controlar circuitos analógicos. El periodo y el ciclo de trabajo del tren de pulsos, pueden determinar la tensión entregada a dicho circuito. Si, por ejemplo, tenemos un voltaje de 5 V y lo modulamos con un ciclo de trabajo del 10%, obtenemos 0.5 V de señal analógica de salida.

- Son comúnmente usadas para el control de velocidad de motores DC. Por ejemplo, si se disminuye el ciclo de trabajo sobre la señal de control del circuito de potencia que actúa sobre el motor, éste se mueve más lentamente. Otro uso es el de ajustar la intensidad de brillo de un LED, etc.
- En las placas Arduinos con ATmega168 o ATmega328, la señal de salida PWM (pines 3, 5, 6, 9, 10, y 11) tiene una frecuencia de 490 Hz aproximadamente y sólo nos permite cambiar el "duty cycle" o el tiempo que el pulso está activo o inactivo, utilizando la función "analogWrite()".
- Se puede utilizar las propiedades del microprocesador para generar una señal PWM. Puesto que la señal de salida obtenida de un microprocesador es digital de 0 voltios (bajo) o de 5 voltios (alto), se puede usar un código mediante la función "digitalWrite ()", para hacer modificaciones en los intervalos de tiempo, en los cuales el pin seleccionado tenga valor alto o bajo.

2.7. Sistema Electrónico de Potencia.

2.7.1. Definición y Aplicaciones.

La electrónica de potencia trabaja con altas corriente, combina la energía, la electrónica y el control, se puede observar en la figura 31 la relación existente entre las tres, podemos definirla como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica. Esta se basa, en primer lugar, en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia.

Los desarrollos tecnológicos en semiconductores de potencia y microprocesadores-microcomputadoras, ha logrado mejoras en el manejo de la energía y velocidad de conmutación, así como, un gran impacto sobre el control y la síntesis de estrategia de control en dispositivos semiconductores de potencia [23].

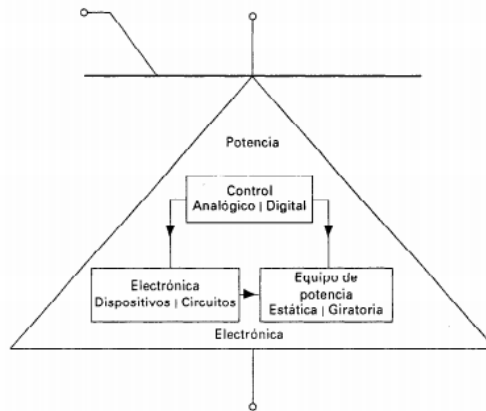


Fig. 31 Conexión del control, electrónica y energía.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

En la tabla 3 se indican alguna de la aplicaciones de la electrónica de potencia en diversas áreas.

Residencial • Electrodomésticos • Iluminación	Transporte • Control de tracción de vehículos eléctricos • Cargadores de baterías • Electrónica de medios de transporte urbano: mecánicos y eléctricos
Comercial • Calefacción • Ventilación • Aire acondicionado • Refrigeración • Alimentación de ordenadores y equipos • Sistemas de alimentación ininterrumpida	Redes Eléctricas • Sistemas de transmisión de energía en alto voltaje DC (HVDC) • Compensación estática de energía reactiva • Corrección del factor de potencia • Filtros activos • Fuentes de energía renovable (aerogeneradores, paneles solares) • Sistemas de almacenamiento de energía (SMES).
Industrial • Control y accionamiento de motores CA y CC • Electrólisis	Aeroespacial • Alimentación de satélites y plataformas de lanzamiento

• Alarmas • Tratamiento ultra-sónico • Sistemas de alimentación para uso químico • Soldadoras • Control de iluminación • Bombas • Ventiladores • Inyectores • Robótica • Hornos de arco y de inducción. • Láseres industriales • Hornos • Fundición	• Alimentación de aeronaves
---	---

Tabla 3. Áreas de aplicaciones de la electrónica de potencia.

2.7.2. Dispositivos semiconductores de potencia

A partir de 1970, se desarrollaron varios tipos de dispositivos semiconductores de potencia, tales como: Diodos de potencia, tiristores, transistores bipolares de juntura de potencia (BJT), MOSFET de potencia, transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT) y de inducción estáticos (SIT). En la tabla 4 se da la especificación de algunas características de los dispositivos semiconductores de potencia[23].

Tipo		Especificación de voltaje/corriente	Alta frecuencia (Hz)	Tiempo de conmutación (μ s)	Resistencia en estado activo (Ω)
Diodos	Uso general	5000 V/5000 A	1k	100	0.16m
	Alta velocidad	3000 V/1000 A	10k	2-5	1m
	Schottky	40 V/60 A	20k	0.23	10m
Tiristores desactivados en forma forzada	De bloqueo inverso	5000 V/5000A	1k	200	0.25m
	Alta velocidad	1200 V/1500 A	10k	20	0.47m
	Bloqueo inverso	2500 V/400 A	5k	40	2.16m
	Conducción inversa	2500 V/1000 A	5k	40	2.1m
	GATT	1200 V/400 A	20k	8	2.24m
	Disparo lumínico	6000 V/1500 A	400	200-400	0.53m
TRIAC		1200 V/300 A	400	200-400	3.57m
Tiristores desactivados automáticamente	GTO	4500 V/3000 A	10k	15	2.5m
	SITH	4000 V/2200 A	20k	6.5	5.75m
Transistores de potencia	Individual	400 V/250 A	20k	9	4m
		400 V/40 A	20k	6	31m
		630 V/50 A	25k	1.7	15m
	Darlington	1200 V/400 A	10k	30	10m
		1200 V/300 A	100k	0.55	1.2
MOSFET de potencia	Individual	500 V/8.6 A	100k	0.7	0.6
		1000 V/4.7 A	100k	0.9	2
		500 V/50 A	100k	0.6	0.4m
IGBT	Individual	1200 V/400 A	20k	2.3	60m
MCT	Individual	600 V/60 A	20k	2.2	18m

Tabla 4. Algunas características de dispositivos de potencia.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

En la electrónica todo dispositivo tiene su símbolo y características del comportamiento de voltaje-corriente y en la siguiente tabla 5 se muestra la de los dispositivos antes mencionados [23].

Dispositivos	Simbolos	Características
Diodo		
Tiristor		
SITH		
GTO		
MCT		
TRIAC		
LASLH		
NPN BJT		
IGBT		
MOSFET de canal N		
SIT		

Tabla 5. Símbolos y características de dispositivos de potencia.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

Estos dispositivos pueden ser operados como interruptores mediante la aplicación de señales de control a la terminal de compuerta de los tiristores o a la bases de los transistores bipolares y su salida es regulada mediante la variación del tiempo de conducción, estos presentan la salida cuando está en modo de conducción normal una pequeña caída de voltaje a través del mismo. Podemos clasificar en [23]:

1. Activación y desactivación sin control como son los diodos.
2. Activación controlada y desactivación sin control en el caso de los SCR.
3. Características de activación y desactivación controladas donde encontramos los BJT, MOSFET, GTO, SITH, IGBT, SIT, MCT.
4. Requerimiento de señal continua en la compuerta, clasificación donde también se encuentran los antes mencionados BJT, MOSFET, IGBT y SIT.
5. Requerimiento de pulso en compuerta, los SCR, GTO y MCT son ejemplos de los que están en esta clasificación.

6. Capacidad de soportar voltajes bipolares, como son los SCR y GTO.
7. Capacidad de soportar voltajes unipolares BJT, MOSFET, GTO, IGBT, MCT.
8. Capacidad de corriente bidireccional TRIAC y RCT.
9. Capacidad de corriente unidireccional SCR, GTO, BJT, MOSFET, MCT, IGBT, SITH, SIT y diodos.

2.7.3. Circuitos Electrónicos de Potencia.

Para el control de potencia eléctrica o acondicionamiento de la misma, es necesario un circuito electrónico que transforme la potencia de una forma a otra y las características de interrupción de los dispositivos de potencia permiten lograr dicha conversión. Estos circuitos los podemos clasificar en [23]:

1. Rectificador de diodos.
2. Convertidores AC-DC o Rectificadores Controlados.
3. Convertidores AC-AC o Controlador de Voltaje de AC.
4. Convertidores AC-DC o Pulsadores de DC.
5. Convertidores DC-AC o Inversores.
6. Interruptores Estáticos.

Me enfocaré en dos de los circuitos mencionados, uno es el controlador de voltaje de AC ya que, para la ejecución de este trabajo de grado se necesita variar la corriente alterna de la línea de la calle y esta tiene un valor fijo de aproximadamente 116 VAC. Para que el funcionamiento de este circuito tenga cierta sincronía con la línea de la calle se debe usar un circuito rectificador de diodos para convertir el voltaje de AC de la línea de la calle en voltaje de DC. Ambos para lograr la automatización deben ser acoplados ópticamente al sistema digital, próximamente se explica cómo se realiza este acople.

En la figura 32a se muestra un circuito básico de un convertidor de voltaje de AC monofásico con carga resistiva, en él se usa un TRIAC como el dispositivo semiconductor de potencia, en la figura 32b se ve gráficamente como la señal alterna del voltaje de salida

es controlada por el tiempo la conducción del TRIAC o el ángulo de retardo del disparo (α) del mismo [23].

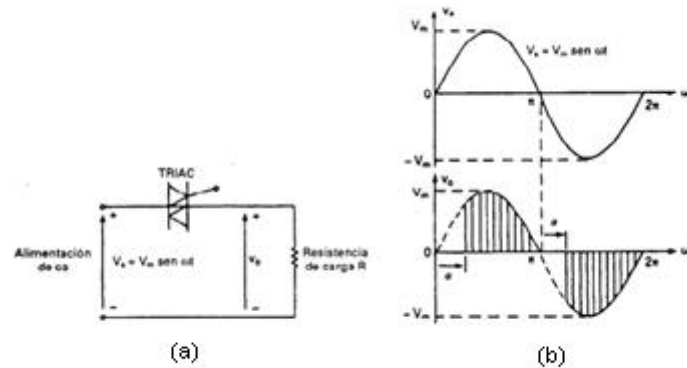


Fig. 32 (a) Circuito básico convertidor de voltaje de AC monofásico con carga resistiva, (b) Señales de entrada y salida del convertidor de voltaje de AC.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

Para el disparo del TRIAC se eligió un circuito rectificador de puente monofásico de onda completa, ver figura 33a. Se observa en la figura 33b como la señal de entada AC es rectificadas convirtiéndola en señal DC positiva o negativa [23].

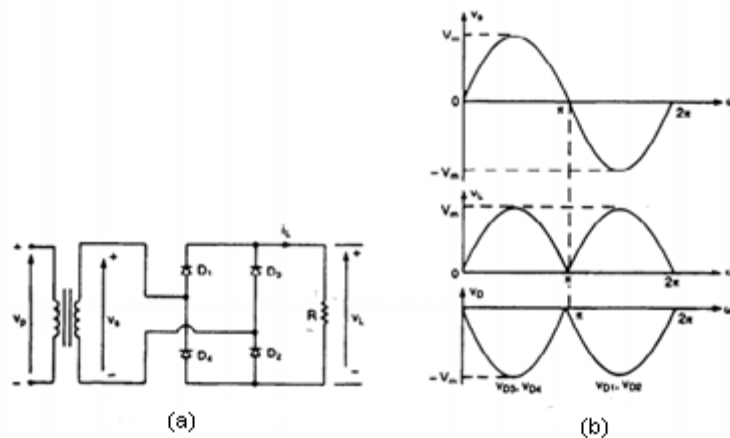


Fig. 33 (a) Circuito rectificador de puente monofásico de onda completa, (b) Señal de entrada y de salida del rectificador.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

2.7.3.1. Circuito Rectificador de Puente Monofásico de Onda Completa.

En el caso de que el circuito tenga una carga resistiva, la forma de la corriente de carga es igual a la del voltaje de salida, en el caso de tener una carga RL como se muestra en la figura 34a, se le agregó una fuente E con fines de desarrollar ecuaciones. La corriente se ve afectada ya que depende del valor de la resistencia de carga R y la inductancia de carga L, ver figura 34b [23].

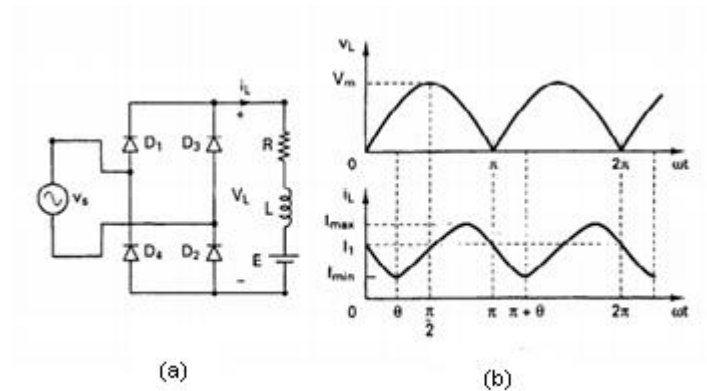


Fig. 34 (a) Circuito rectificador de puente monofásico, (b) Señal de salida de voltaje y de corriente de rectificador.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

Si se quiere calcular la corriente de carga i_L , se puede usar la ecuación 4.2, siendo el voltaje de entrada $v_s = V_m \sin \omega t = \sqrt{2} V_s \sin \omega t$.

$$i_L = \frac{\sqrt{2} V_s}{Z} \sin \omega t - \theta + A_1 e^{\frac{-R}{L} t} - \frac{E}{R} \quad (4.2)$$

Donde $Z = \sqrt{R^2 + \omega L^2}$ y el ángulo de impedancia $\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$.

El cálculo de la constante A_1 depende de si la corriente de carga es continua o discontinua, debido a que la condición ωt varía para cada caso.

Si la corriente de carga es continua, obtendremos el valor de la constante con la ecuación 5.2 colocar como condiciones: $i_L = I_L$ y $\omega t = \pi$.

$$A_1 = I_L + \frac{E}{R} - \frac{\bar{2}V_s}{Z} \sin \theta e^{\frac{R}{L} \frac{\pi}{\omega}} \quad (5.2)$$

La corriente rms (I_{rms}) de salida se puede calcular con la ecuación 6.2, donde se combinación de corriente rms de cada diodo

$$I_{rms} = \sqrt{2} I_r; \quad I_r = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_L^2 d\omega t \quad (6.2)$$

Y la corriente promedio de un diodo $I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_L d\omega t$

Para la corriente de carga discontinua, la corriente solo fluye durante el periodo $\alpha \leq \omega t \leq \beta$. Los diodos empiezan a conducir cuando $\omega t = \alpha = \sin^{-1} \frac{E}{V_m}$ y si se coloca $i_L = 0$, obtendremos la ecuación 7.2 para A_1 .

$$A_1 = \frac{E}{R} - \frac{\bar{2}V_s}{Z} \sin \alpha - \theta e^{\frac{R}{L} \frac{\pi}{\omega}} \quad (7.2)$$

En este caso, para los cálculos para la I_{rms} en los diodos, los puntos de evaluación de las integrales tanto para I_r e I_d serán de α a β .

2.7.3.2. Circuito Controlador de Voltaje de AC.

Es posible controlar el flujo de potencia variando el valor del voltaje rms del voltaje de corriente alterna aplicado a la carga, esto se logra conectando un tiristor entre la alimentación de corriente alterna y la carga (Fig. 33a). Estos son muy comunes en el

control de calefacción industrial, de derivaciones de transformadores cambio de carga, de luces, de velocidad de motores de inducción polifásicos y de electromagnetos de corriente alterna. Este tipo de controladores se pueden clasificar en: Controladores monofásico y trifásicos, subdivididos en unidireccionales o control de media onda y bidireccionales o control de onda completa, existen dos maneras de realizar control con estos controladores:

1. *Abrir y Cerrar*: Este tipo de control se puede explicar en un controlador de onda completa monofásico y son usados en aplicaciones que tienen una alta inercia mecánica y una alta constante térmica, por ejemplo, calefacciones industriales y control de velocidad de motores.

Los tiristores que se muestran en la figura 35a conectados a una carga resistiva, se conectan la carga a la fuente de corriente alterna durante un tiempo t_n formando un número enteros de ciclos de voltaje de entrada y luego lo desconecta por un tiempo t_m , es decir, un pulso inhibidor de compuertas abre el interruptor t_0 . Los tiristores se activan en los cruces por cero de voltaje de entrada de corriente alterna, se puede observar en la figura 35b los pulsos de compuerta para los tiristores, así como, la forma de los voltajes de entrada y salida del circuito. El factor de potencias en este tipo de circuitos aumenta junto con el ciclo de trabajo, ver figura 35c [23].

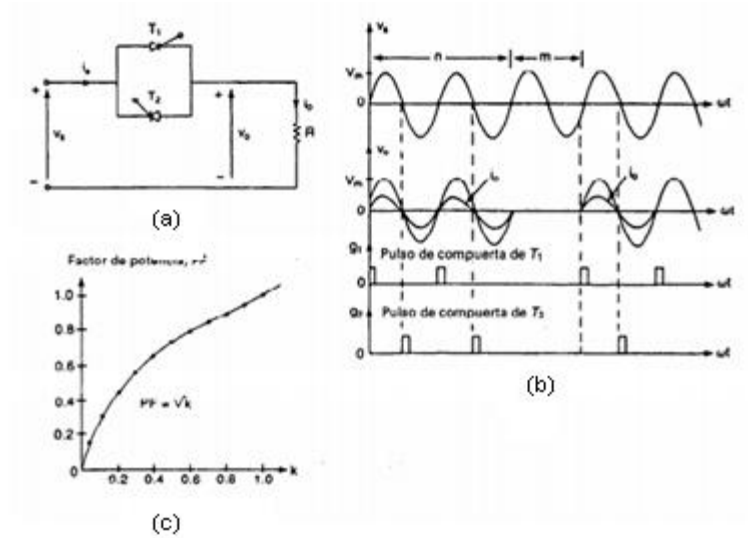


Fig. 35 (a) Circuito Controlador de voltaje de AC, (b) Señal de entrada y salida de voltaje del circuito y pulsos de compuertas de tiristores, (c) Factor de potencia.

Nota. Recuperado de "Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones" de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

El voltaje rms de salida se calcula a partir de la ecuación 8.2, donde sustituyendo $v_s = V_m \sin \omega t = \sqrt{2} V_s \sin \omega t$, obtendremos la ecuación 9.2.

$$V_0 = \frac{n}{2\pi n+m} \int_0^{2\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t^2 d(\omega t)^{1/2} \quad (8.2)$$

$$V_0 = V_s \sqrt{\frac{n}{m+n}} = V_s \sqrt{k} \quad (9.2)$$

Donde k se conoce como ciclo de trabajo, n es el número de ciclos donde está el circuito conectado a la carga y m el número de ciclos donde esta desconectado.

2. *Angulo de fase* en este caso el tiristor conecta la carga a la fuente durante una porción de cada ciclo de voltaje de entrada. Se puede observar en la figura 36a un controlador de voltaje de AC monofásico de media onda unidireccional, adecuado solo para cargas resistivas. El diodo D_1 , el rango de control está limitado y el voltaje rms

efectivo de salida solo puede variar entre 70,7 % y 100 %, el voltaje de salida (36b) y la corriente de entrada son asimétricos con una componente de corriente directa [23].

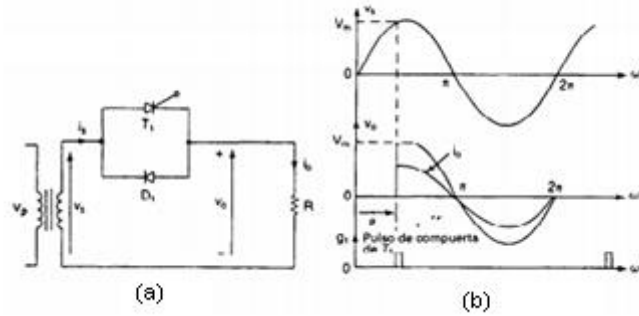


Fig. 36 (a) Circuito controlador de voltaje de AC monofásico unidireccional, (b) señal de entrada y de salida de voltaje del circuito y pulsos de compuerta del tiristor.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

Partiendo de la ecuación 10.2, si se sustituye en la ecuación 11.2 el voltaje de entrada $v_s = V_m \sin \omega t = \sqrt{2} V_s \sin \omega t$ en la y el ángulo de retraso del tiristor T_1 es $\omega t = \alpha$, obteniendo la ecuación 12.2 para calcular el cálculo de V_{rms} .

$$V_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t \, d(\omega t) + \frac{2\pi}{\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t \, d(\omega t)^{1/2} \quad (10.2)$$

$$V_0 = \frac{V_s^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 1 - \cos 2\omega t \, d(\omega t) + \frac{2\pi}{\pi} 1 - \cos 2\omega t \, d(\omega t)^{1/2} \quad (11.2)$$

$$V_0 = V_s \frac{1}{2\pi} \left[2\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right]^{1/2} \quad (12.2)$$

El promedio de salida se calcula con la ecuación 13.2.

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2} V_s}{2\pi} \cos \alpha - 1 \quad (13.2)$$

Existirán variaciones en α desde 0 hasta π , en V_0 desde V_s hasta $\frac{V_s}{2}$ y en V_{dc} desde 0 hasta $-\frac{\sqrt{2}V_s}{\pi}$.

La configuración de los circuitos para el control de abrir y cerrar es similar a la del control de fase, así como, los análisis de rendimiento, por lo tanto se basaran solo el control de fase.

Se estudiaran dos casos de controladores de voltaje de AC monofásicos, con carga resistiva y carga inductiva, ya que, el circuito para control de potencia que se necesita para fines de este trabajo trabajara con una fuente fija de AC y se conectara a ambos tipos de carga, de este modo poder saber cómo funcionan ambos controladores.

2. Controlador de Voltaje de AC Bidireccional Monofásico con Cargas Resistivas.

Durante el semiciclo de voltaje de entrada, se controla el flujo de potencia variando el ángulo de retraso de los tiristores T_1 y T_2 , los pulsos de disparos de cada tiristor se conservan a 180° uno del otro. Se observa en la figura 37a un circuito básico controlador con carga resistiva y en la figura 37b la forma de onda para el voltaje de entrada y de salida, así como, los pulsos de compuerta [23].

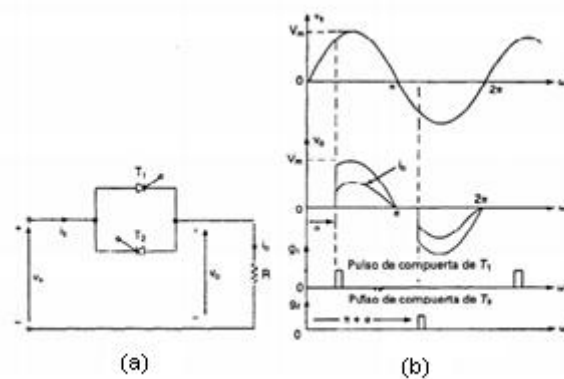


Fig. 37 (a) Circuito controlador de voltaje AC bidireccional monofásico, (b) señales de entrada y de salida de voltaje del circuito y pulsos de compuertas de tiristores.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

En este caso se calcula el voltaje rms de salida con la ecuación 14.2, donde $v_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega t$ es el voltaje de entrada y los ángulos de retraso de los tiristores son iguales a $\alpha = \omega t$.

$$V_0 = V_s \frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)^{1/2} \quad (14.2)$$

Variando α desde 0 a π , se varia V_0 desde V_s hasta 0.

Debido a que existen dos dispositivos de potencia que conducen en forma simultánea, se debe aislar los circuitos de los tiristores para mejorar la conducción de los dispositivos y la eficiencia, esto se logra mediante la adición de dos diodos, ver figura 38 [23].

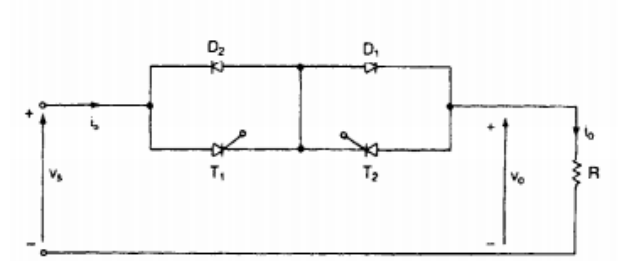


Fig. 38 Circuito controlador de voltaje AC con aislamiento.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

3. Controladores Bidireccionales Monofásicos con Cargas Inductiva.

En la práctica la mayor parte de las veces se trabaja con cargas hasta cierto punto inductivas. En la figura 39a se muestra un circuito controlador de voltaje de AC con dos tiristores y dos tipos de cargas (resistivas e inductivas). Si el tiristor T_1 se dispara durante el semiciclo y conduce la corriente de carga, dada la inductancia del circuito la corriente del tiristor no se reducirá a cero cuando el voltaje de entrada empieza a ser negativo, en

$\omega t = \pi$. El tiristor seguirá conduciendo hasta que su corriente i_1 llegue a cero en $\omega t = \beta$, el ángulo de conducción es $\delta = \beta - \alpha$, este depende de α el ángulo de retraso y el ángulo del factor de potencia de la carga θ . Se puede observar en la figura 39b la forma de onda de la corriente de salida de T_1 y en la figura 39c los pulsos de las compuertas y [23].

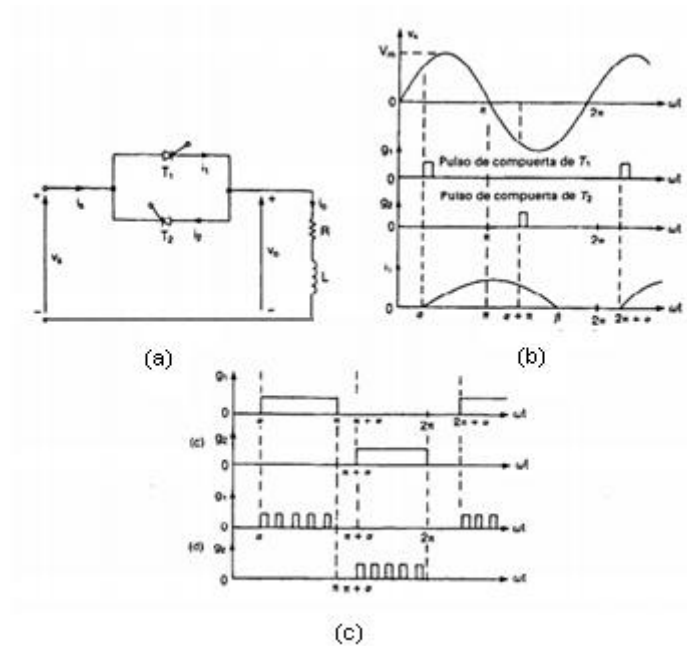


Fig. 39 (a) Circuito controlador de voltaje de AC bidireccional con carga inductiva, (b) Señal de voltaje de entrada del circuito, pulsos de compuertas y señal de la corriente de salida del tiristor 1, (c) Pulsos de compuertas de tiristores.

Nota. Recuperado de "Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones" de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

Si el voltaje instantáneo de entrada es $v_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega t$ y el ángulo de retraso es α , la corriente se calcula con la ecuación 15.2

$$L \frac{di_l}{dt}; Ri_l = \sqrt{2}V_s \sin \omega t \quad (15.2)$$

La ecuación 16.2 es la solución de la ecuación anterior.

$$i_l = \frac{\bar{2}V_s}{Z} \sin \omega t - \theta + A_1 e^{-R/L t} \quad (16.2)$$

Donde la impedancia de la carga $Z = [R^2 + (\omega L)^2]^{1/2}$ y el ángulo de la carga $\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$

La constante A_1 se puede calcular colocando en la ecuación anterior las condiciones iniciales de $\omega t = \alpha$ y $i_l = 0$, obteniendo la ecuación 17.2.

$$A_1 = -\frac{\bar{2}V_s}{Z} \sin \alpha - \theta e^{-\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega}} \quad (17.2)$$

Al sustituir la ecuación 17.2 en la ecuación 16.2, Se obtiene la ecuación 18.2 para calcular i_l .

$$i_l = \frac{\bar{2}V_s}{Z} \sin \omega t - \theta - \sin \omega t - \theta e^{-\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega - t}} \quad (18.2)$$

Esta ecuación indica que el voltaje y la corriente de carga serán senoidales, si en α es menor que θ , de lo contrario serán discontinua y no senoidal.

El tiristor T_1 se desactiva cuando la corriente i_l pasa por cero, donde $\beta = \omega t$ conocido como ángulo de excitación, lo cual no da la ecuación 19.2:

$$\sin \beta - \theta = \sin \omega t - \theta e^{-\frac{R}{L} \frac{\alpha - \beta}{\omega}} \quad (19.2)$$

El voltaje rms de salida, se calcula con la ecuación 20.2.

$$V_0 = V_s \frac{1}{\pi} \beta - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\beta}{2}^{1/2} \quad (20.2)$$

La corriente rms de salida, se calcula combinando la corriente rms de cada tiristor $I_0 = \sqrt{2} I_R$, donde I_R se calcula con la ecuación 21.2.

$$i_R = \frac{V_s}{Z} \frac{1}{\pi} \frac{\beta}{\alpha} \sin \omega t - \theta - \sin \omega t - \theta e^{-\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega - t}} d(\omega t)^{1/2} \quad (21.2)$$

Para el cálculo de la corriente promedio del tiristor se realiza con la ecuación 22.2.

$$i_A = \frac{\sqrt{2} V_s}{2\pi Z} \frac{\beta}{\alpha} \sin \omega t - \theta - \sin \omega t - \theta e^{-\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega - t}} d(\omega t) \quad (22.2)$$

Los pulsos de conducción en este caso no son cortos, cuando se dispara el tiristor T_2 el tiristor T_1 aún está conduciendo debido a la inductancia de la carga, cuando la corriente del tiristor T_1 pasa por cero y se desactiva el pulso de la compuerta del tiristor T_2 ha dejado de funcionar y no se activará. Esto causa que la forma de las ondas de voltaje y corrientes de salidas sean asimétricas y la corriente en T_1 cae a cero y se activa con pulsos en las compuertas, ver figura 38c.

La inductancia en la alimentación retarda la desactivación de los tiristores, es decir, no se desactivaran en el cruce del voltaje de entrada y los pulsos de compuerta de corta duración puede ser no adecuadas, también aumentarían el contenido armónico del voltaje de salida. En la figura 40 se muestra: (a) como la señal de voltaje de entrada que es continua es convertida en pulsos y (b) como la inductancia afecta la corriente [23].

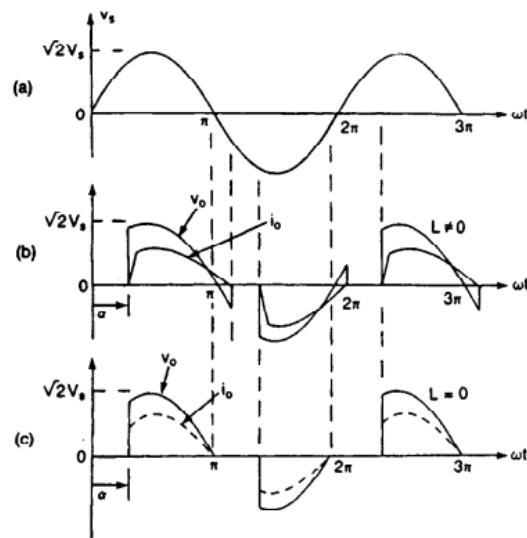


Fig. 40 (a) Señal de entrada de voltaje, (b) Señal de voltaje y corriente de salida con $L \neq 0$ y (c) Señal de voltaje y corriente de salida con $L = 0$.

Nota. Recuperado de “*Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*” de Rashid, M. H. (1995). (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.

2.8. Sistema Digital.

Este sistema se encarga de procesar las señales digitales (señales analógicas convertidas a través de un conversor analógico – digital) sin cambiar el tipo de señal. En el proceso de digitalización de datos se genera un número E_m de entradas de números binarios y un número de salida S_n de números binarios, estos se manipulan, almacenan, recuperan y transporta, ver figura 41 [24].

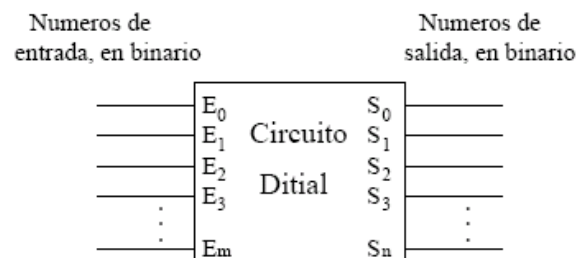


Fig. 41 Entradas y salidas de un circuito digital.

Nota. Recuperado de “Fundamentos y Teoría Básica de señales Digitales” (09, 08,2018) de <https://caece-mys1.wikispaces.com/Fundamentos+y+Teor%C3%ADa+B%C3%A1sica+de+Se%C3%B1ales+Digitales>

Existen varios tipos de sistemas digitales como son [24]:

- Sistema discreto.
- Sistemas de mayor integración en escalas SSI, MSI, VLI o VLSI.
- Sistema integrado programable a nivel de memorias EPROM o EEPROM.
- Dispositivos programables "inteligentes" como son: microprocesadores, microcontroladores, dispositivos lógicos programables, arreglos lógicos programables, controladores lógicos programables o computadores.

El tipo de números que manipula este tipo de sistemas representados en binarios (números que vienen expresados con los dígitos '0' y '1') recibe el nombre de BIT. La entrada E_0 corresponden al dígito de menor peso $2^0=1$, la entrada E_1 correspondería a $2^1=2$ y así sucesivamente hasta la entrada n que es la de mayor peso. Lo mismo se aplica a la salida. La tabla 6 que se muestra a continuación representa las equivalencias entre diferentes números expresados los sistemas: decimal, binario y hexadecimal, que son los que más se usan [24 y 25]

DECIMAL	BINARIO	HEXADECIMAL
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

Tabla 6. Números expresados en los tres sistemas más usados.

Nota. Recuperado de “Fundamentos y Teoría Básica de señales Digitales” (09, 08,2018) de <https://caece-mys1.wikispaces.com/Fundamentos+y+Teor%C3%ADa+B%C3%A1sica+de+Se%C3%B1ales+Digitales>

2.9. Acoplamiento Óptico entre Sistemas Digitales y Sistemas de Potencia.

Uno de los usos de un sistemas digitales es controlar a otros sistemas, lo que implica que ambos estén interconectados, como por ejemplo el control de un sistema de potencia (etapa de potencia), con base en tiristores (TRIACs, scr, etc.) para actuar sobre cargas resistivas o inductivas en sistemas de iluminación, o en procesos industriales o en control de velocidad de motores, entre otros [25].

Cuando se maneja potencia (altas corrientes) hay que considerar la seguridad eléctrica para los operarios y de protección para el sistema digital, la interconexión de ambos sistemas se debe hacer por medio del montaje de un circuito de un acoplamiento óptico (el acoplamiento se efectúa en el rango del espectro infrarrojo) que permita aislar eléctricamente ambos sistemas, de esta manera se protege el sistema digital en caso de que ocurra un corto en la etapa de potencia, o cualquier otro tipo de anomalía eléctrica. El optoacoplador es el dispositivo principal en este tipo de circuitos electrónicos y el cual cumple la función de aislamiento eléctrico, este lo compuesto por un LEDs (diodos emisores de luz), actuando como emisores y un fotoreceptor de luz, estos pueden ser transistores o tiristores [24 y 25].

El circuito control de voltaje de AC con acoplamiento óptico se puede realizar con un TRIAC, normalmente usado para control de fase de corriente alterna. Este tipo de dispositivo es bidireccional, ya que, puede conducir en ambas direcciones, esto hace difícil identificar la polaridad de sus terminales T_1 y T_2 . Para su activación es necesario una señal positiva o negativa de compuerta G, normalmente opera en el cuadrante I^+ (voltaje y corriente de compuerta positivos) o en el cuadrante III^- (el voltaje y corriente de compuerta negativos) podemos observar en la figura 42 un montaje básico de acoplamiento óptico con TRIAC [24].

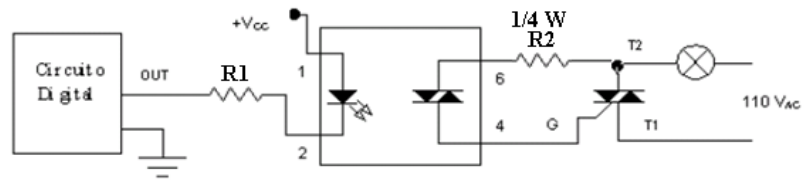


Fig. 42 Circuito electrónico estándar controlador de voltaje de AC con acoplamiento óptico, lógica digital negativa.

El disparo del TRIAC para el control se efectúa mediante la señal de compuerta generada por un circuito electrónico rectificador de puente monofásico de onda completa, el cual también tiene aislamiento eléctrico del sistema digital. Este tipo de circuito electrónico genera señales cuadradas de 5 V y 60 Hz, Podemos observar en la figura 43 un montaje básico de este tipo de circuito [25].

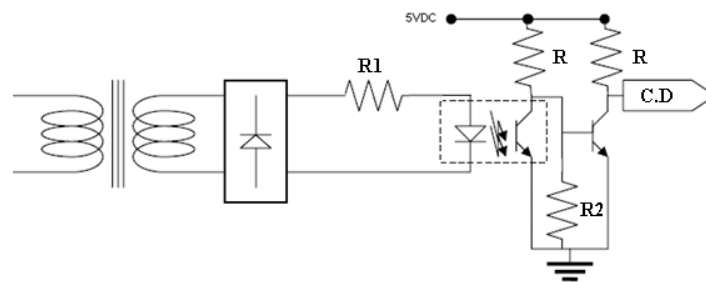


Fig. 43 Circuito rectificador de puente con acoplamiento óptico.

2.10. Diseño de Un Nuevo Sistema Automático de Control de Temperatura.

El sistema automático de control de temperatura consta de: un horno de microondas comercial, un sensor de fibra óptica con su módulo acondicionador de señales, una placa Arduino UNO, un circuito controlador de potencia y una PC, ver figura 44.

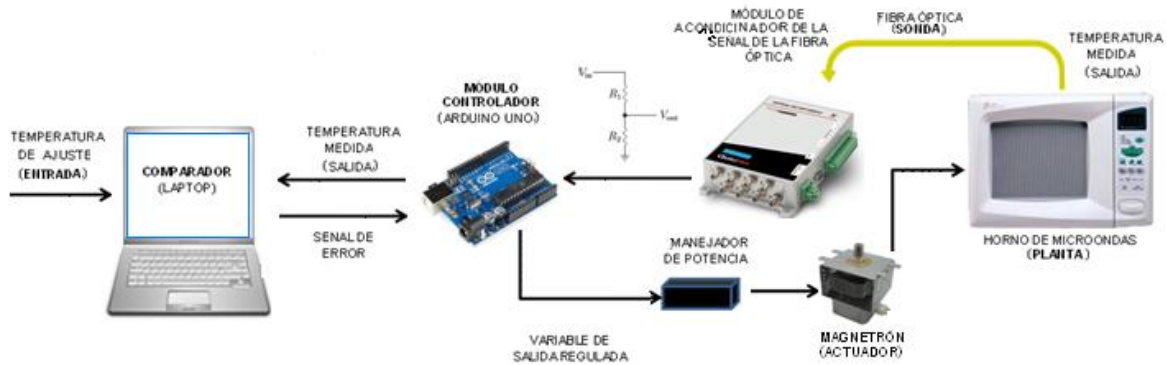


Fig. 44 Sistema automático de control de temperatura.

En un sistema de control al ser en lazo cerrado su entrada es realimentada por la salida y se debe leer constantemente la variable que se quiere controlar, en nuestro caso medimos la temperatura de las muestras que se exponen a la radiación microondas, luego se compara con la temperatura deseada, así como, la velocidad con la cual se calienta la muestra y de esa manera variar la potencia de trabajo del magnetrón a la necesaria para mantener el control de la temperatura en las muestras. Para presenta el diagrama en bloque que se muestra a continuación en la figura 45.

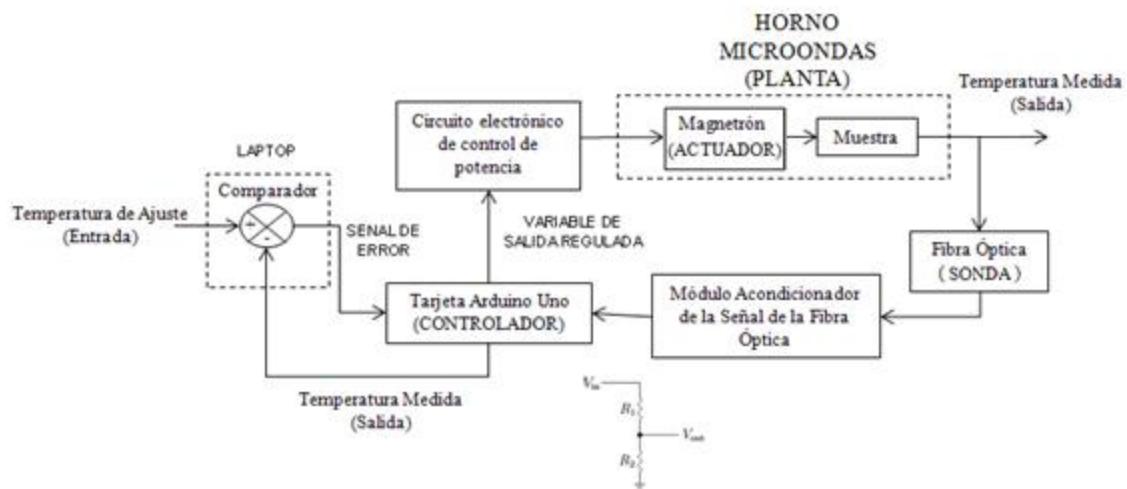


Fig. 45 Diagrama en bloque del sistema de control automatizado de temperatura.

Para el control continuo y preciso de la temperatura, es necesario variar el voltaje de entrada al transformador de alta potencia del horno de microondas, así, poder manejar la

potencia con la cual trabaja, basándonos en el funcionamiento y estructura básica de los hornos (Fig. 46), se diseñó un circuito electrónico manejador de potencia, este se conecta deshabilitando su panel de control, entre el sistema de seguridad del horno de microondas y al transformador.

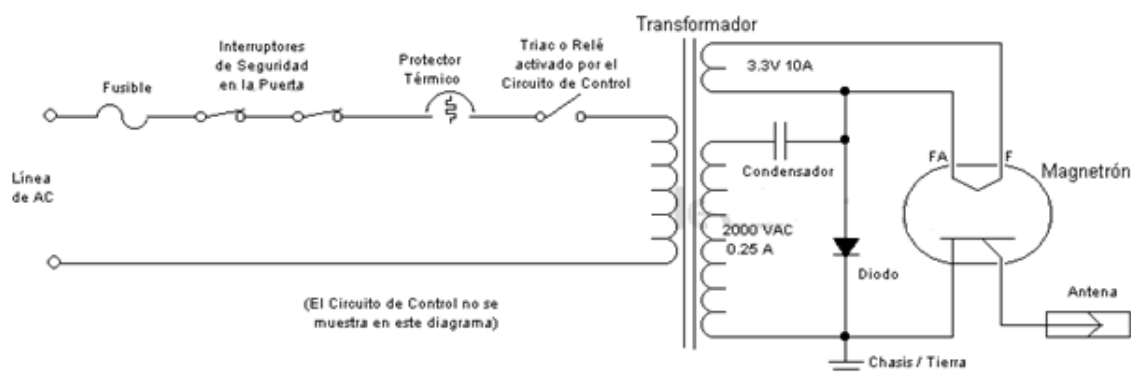


Fig. 46 Diagrama del circuito básico de un horno de microondas.

Nota. Ajustado de "Goldwasser, S. M. (s.f.). El Horno de Microondas; Su funcionamiento, fallas, pruebas y reparación - Parte 2 " (02,08,2017) de <http://www.comunidadelectronicos.com/articulos/microondas-2.htm>)

Siguiendo los esquemas mostrados en la figuras 41 y 42, se diseñó para el control de la potencia de trabajo del magnetrón, un circuito electrónico de potencia que consta de: un controlador de voltaje AC monofásico y un rectificador de puente. El disparo del TRIAC del controlador se genera mediante la interrupción de la señal generada del rectificador, el cual indica cuando el valor de la línea de la calle es 0 V, esto se hace, con el fin de que el disparo del TRIAC esté en fase con la línea. Ambos circuitos están acoplados ópticamente a un Arduino UNO para poder automatizar el sistema de control de temperatura y poder manejar el equipo desde la computadora. También tiene un divisor de tensión, para la adquisición de las medidas de la temperatura. Ya que la salida analógica del módulo de acondicionamiento de señal de la fibra óptica tiene un máximo de salida de 10 VDC; un valor de voltaje de salida mayor 5 VDC ocasionaría daños al Arduino UNO.

El diagrama para la elaboración del circuito electrónico para el manejo de potencia del horno de microondas se muestra a continuación en la figura 47.

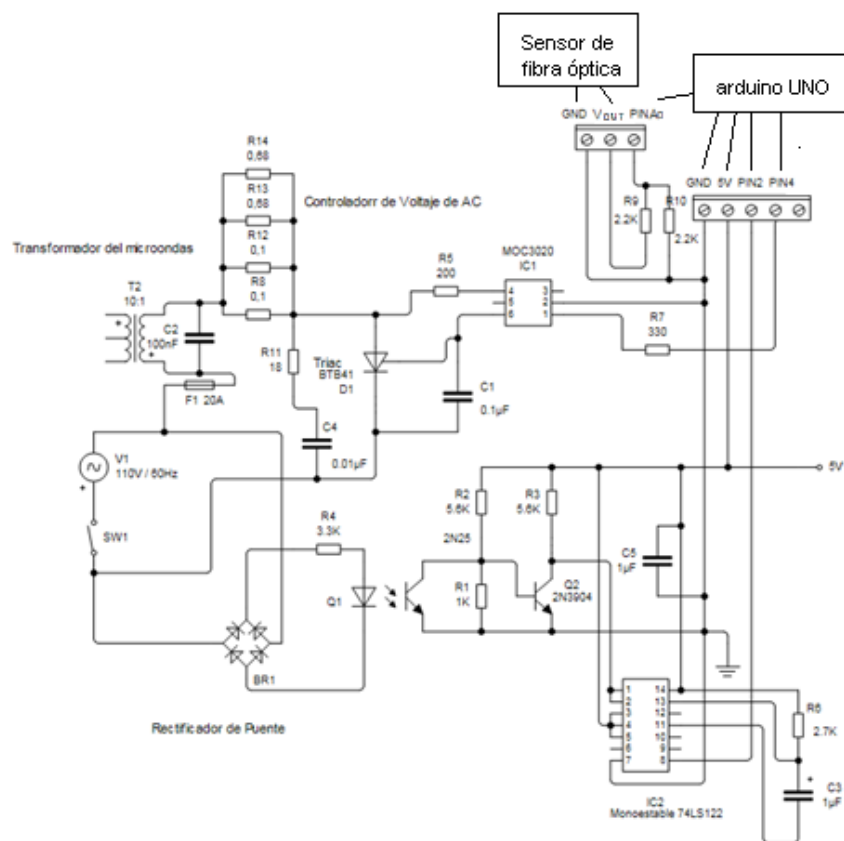


Fig. 47 Diagrama del circuito de manejo de potencia para el horno de microondas.

Para la automatización, del sistema de control de temperatura se programó una placa Arduino UNO para genera trenes de pulsos cuadrados de 60 Hz para el disparo del TRIAC del circuito controlador de voltaje de AC, así como para leer y enviar la información de la medida de la temperatura a la PC. Se diseñó un software en Visual Basic 6.0, este es capaz de recibir, comparar, graficar, enviar y guardar datos con la finalidad de variar la potencia

de trabajo del magnetrón para lograr el control de la temperatura durante un tiempo determinado¹.

2.10.1. Funcionamiento del Sistema Automatizado de Control de Temperatura.

Para iniciar el proceso de control, el usuario del equipo tiene que establecer en el software diseñado en Visual Basic 6.0 una curva teórica de temperatura y otros datos necesarios. Al iniciar el proceso de calentamiento el sensor de fibra óptica sensa la temperatura (T_m). La señal analógica generada por el sensor es leída y convertida en digital por la tarjeta Arduino UNO. El valor digitalizado lo envía a la computadora donde el programa recibe esos datos, luego, compara las temperaturas medidas (T_m) con las temperaturas de la curva teórica (T_a). Simultáneamente las T_m son graficadas en función del tiempo y guardadas en un documento .txt. También se compara la pendiente de cada segmento de la curva teórica de temperatura, con la pendiente generada por dos T_m consecutivas. Después de ser analizados los resultados de dichas comparaciones, el software le envía al sistema un dato para ajustar la potencia con la cual va a calentar el horno microondas. Si $T_m > T_a$ automáticamente, el programa envía la orden al Arduino UNO para que el magnetrón se apague independientemente de las pendientes. Si $T_m < T_a$, dependiendo del valor calculado de la comparación de las pendientes (mayor, menor o igual a cero), el programa le envía la orden al Arduino UNO para aumentar o disminuir la potencia a la cual está trabajando el horno, repitiéndose una y otra vez este proceso durante el calentamiento, de esta manera la temperatura se mantiene controlada.

¹ Los códigos de los programas están a la disposición, para mayor información pueden comunicarse al correo berekerrico@gmail.com

Capítulo 3. Marco Experimental.

3.1. Ensamblaje del Manejador de Potencia.

Como primer paso, se procedió a armar el circuito en protoboard, tomando en cuenta el diagrama mostrado en la figura 43. Los dispositivos necesarios para su construcción se eligieron tomando en cuenta el voltaje, corriente y potencia con la cual se trabaja.

Luego de realizar algunas pruebas y verificar el funcionamiento del circuito montado en el protoboard, se procedió a ensamblar la tarjeta electrónica. Para su elaboración, se imprimió en papel transfer el circuito² que se muestra en la figura 48.

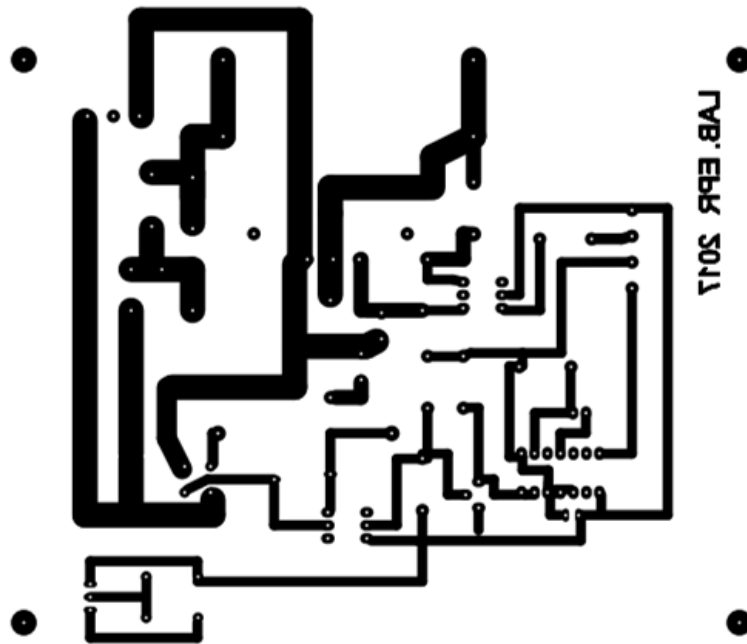


Fig. 48 Gráfica del circuito PBC

² La impresión debe realizarse en impresoras láser y verificarse que la configuración esté en tamaño real.

Se toma una baquelita con capa de cobre por una sola cara, se lija un poco esa cara y se procede a imprimir la imagen (Fig. 42) de manera convencional sobre la baquelita; luego se sumerge por unos minutos en una solución de cloruro férrico FeCl_3 , ver figura 49.

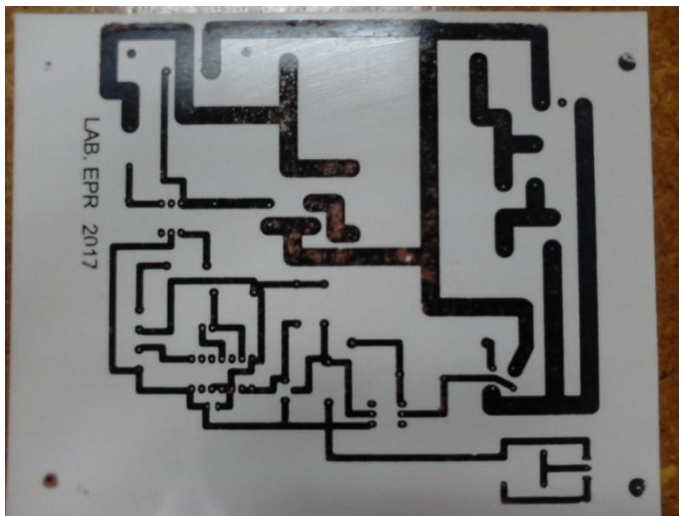


Fig. 49 Baquelita luego de pasar por el cloruro férrico.

Para culminar se perforó con un dremel los lugares donde se coloca cada dispositivo, para luego solar, ver figura 50.

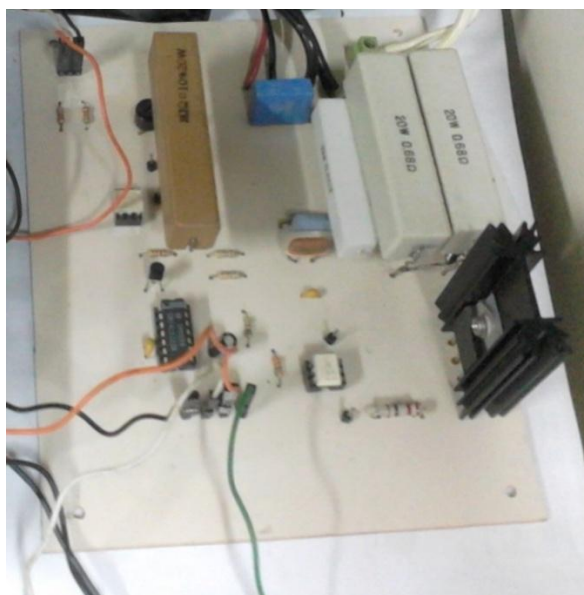


Fig. 50 Circuito manejador de potencia.

Para el montaje final del sistema de control de temperatura, el circuito manejador de potencia se conectó a un horno de microondas comercial (Samsung modelo MW1050STC, la potencia máxima de trabajo es 1,05 KW) como se observa en la figura 51a, entre el sistema de seguridad y el transformador de alto voltaje del horno, ver la figura 51b.

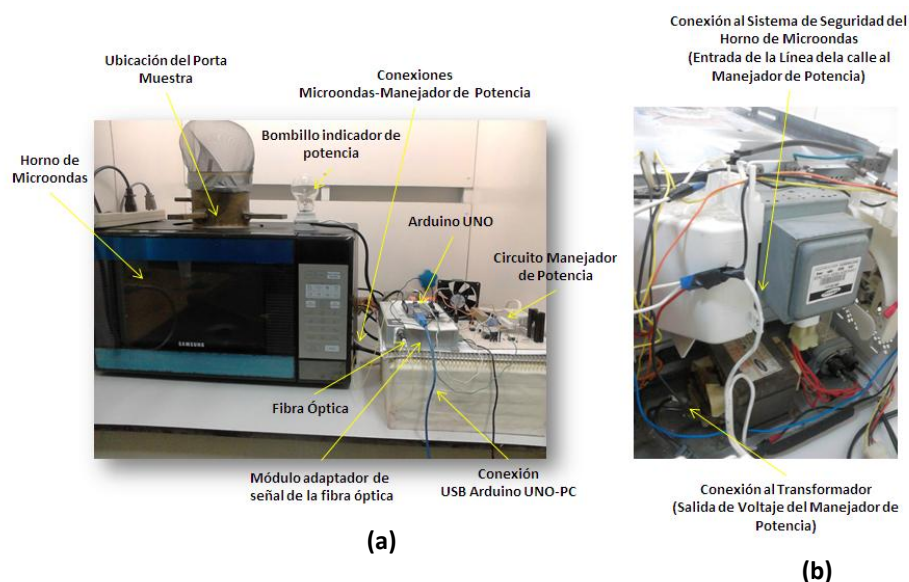


Fig. 51 (a) Montaje del sistema automático de control temperatura, (b) Conexión horno de microondas-manejador de potencia.

3.2. Diseño de Software de Control.

a) Diseño del programación del módulo controlador “Arduino UNO”.

Para realizar el control del sistema fue necesario el uso de dos pines digitales y uno analógico del Arduino UNO. La programación de dichos pines, el puerto serial para la comunicación y las rutinas necesarias, se realizó en el entorno de desarrollo Arduino mencionado en la sección 2.6.1 del capítulo 2.6.

En este programa, inicialmente se establecieron las variables necesarias para la lectura de las medidas de las temperaturas, así como, para variar la potencia de trabajo del magnetrón. En la estructura “setup” del programa se establecieron las propiedades del puerto serial para la

comunicación Arduino-PC, así como las características de tres pines. Un pin analógico se colocó como entrada para la medición de la temperatura; uno de los pines digitales como entrada para la señal de interrupción generada por el rectificador de puente y otro como salida para la señal de disparo del TRIAC del circuito controlador de voltaje de AC.

En la rutina cíclica se realiza la lectura del valor del puerto serial, según dicho valor, puede entrar en alguna de estas tres subrutinas:

- Lectura y envío del valor de la temperatura: lee el valor del pin analógico, correlaciona los valores entre 0 y 1023 con el voltaje entre 0 y 5 VDC de salida y envía el valor a la PC.
- Apagar el magnetrón: Saca de la interrupción al programa, evitando la generación de la señal de activación del TRIAC.
- Generación de la señal de activación del TRIAC: Solo entra en esta subrutina por interrupción externa, es decir, cuando existe señal del rectificador de puente. En este caso lee la entrada de un segundo valor por puerto serial, este establece el retardo de la señal generada para la activación del TRIAC, de esta manera regular la potencia de trabajo del magnetrón.

b) Diseño de una Interfaz Gráfica en Visual Basic 6.0.

Se desarrolló un programa con una interfaz gráfica de fácil uso para el usuario, este es capaz de intercambiar información con el módulo de control, medir por segundo la temperatura, calcular el número de mediciones realizadas, dispersión y desviación cada 5 mediciones de temperatura, graficar cada 5 minutos y guardar datos y en algún dispositivo de memoria extraíble de manera que el usuario pueda usarlos en otra ocasión.

Al iniciar el programa, se abrirá una ventana llamada “Datos” (Fig. 52), donde el usuario deberá introducir datos como: nombre del usuario, nombre de la muestra con la cual se va a trabajar y una pequeña descripción de la muestra. Al finalizar se debe crear un documento donde guardar toda información sobre el trabajo realizado.

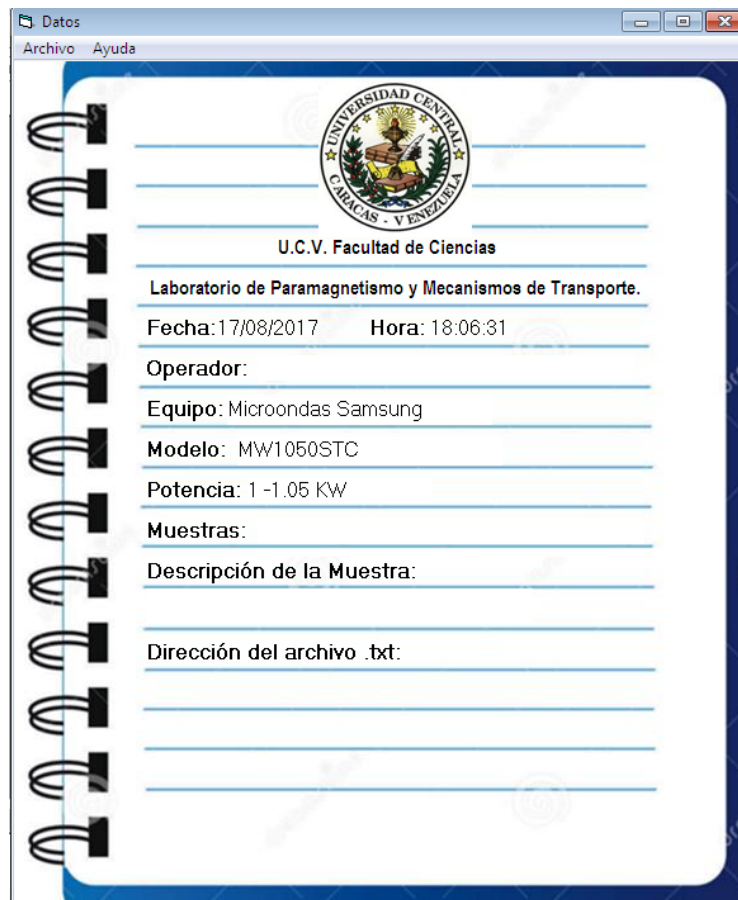


Fig. 52 Ventana Principal.

Podemos observar en la figura anterior en la parte superior izquierda de la ventana dos iconos, “Archivo” y “Ayuda”, ambos se despliegan, ver la figura 53. En Archivo encontramos los iconos para: crear un nuevo archivo, abrir algún archivo existente, convertir un documento .txt a .pdf y por ultimo para imprimir. El icono “Ayuda” contiene un documento .pdf, este es un manual de uso del programa.

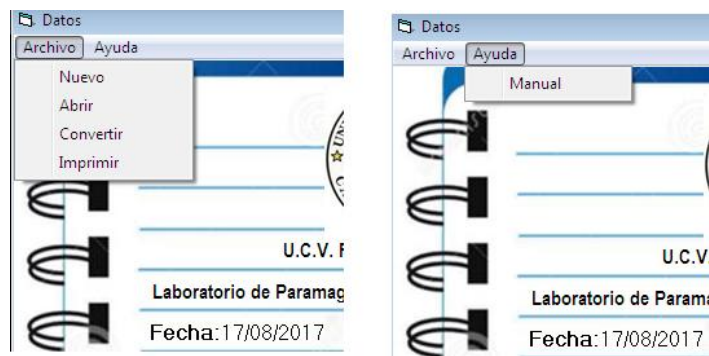


Fig. 53 Iconos.

Al introducir los datos necesarios en la primera ventana y crear un archivo se abren dos ventanas, una llamada Experimento y la otra t & T.

– Ventana “Experimento”: En esta ventana se introducen los parámetros con los cuales se va a trabajar: La escala de la gráfica según la temperatura a la cual se quiere controlar y el tiempo de calentamiento, así como, la curva teórica de calentamiento que debe seguir el sistema de control, ver figura 54.

1. ESCALA DE LA GRÁFICA

t (min.) T(°C)

Mayor Mayor

Unidad Unidad

2. CURVA TEÓRICA

t(min.) T(°C)

PUNTOS TEÓRICOS

Ecuación de la Recta

Fig. 54 Ventana Secundaria

– Ventana “t & T”: En ella se grafica la temperatura cada 5 seg. en función del tiempo durante el experimento y al finalizar se graba automáticamente en un archivo .jpg. Como se muestra en la figura 55, se simula el frontal de un horno de microondas donde se establece el modo de trabajo (medir o controlar), el tiempo y el número del puerto serial para establecer la comunicación, para luego iniciar el proceso.

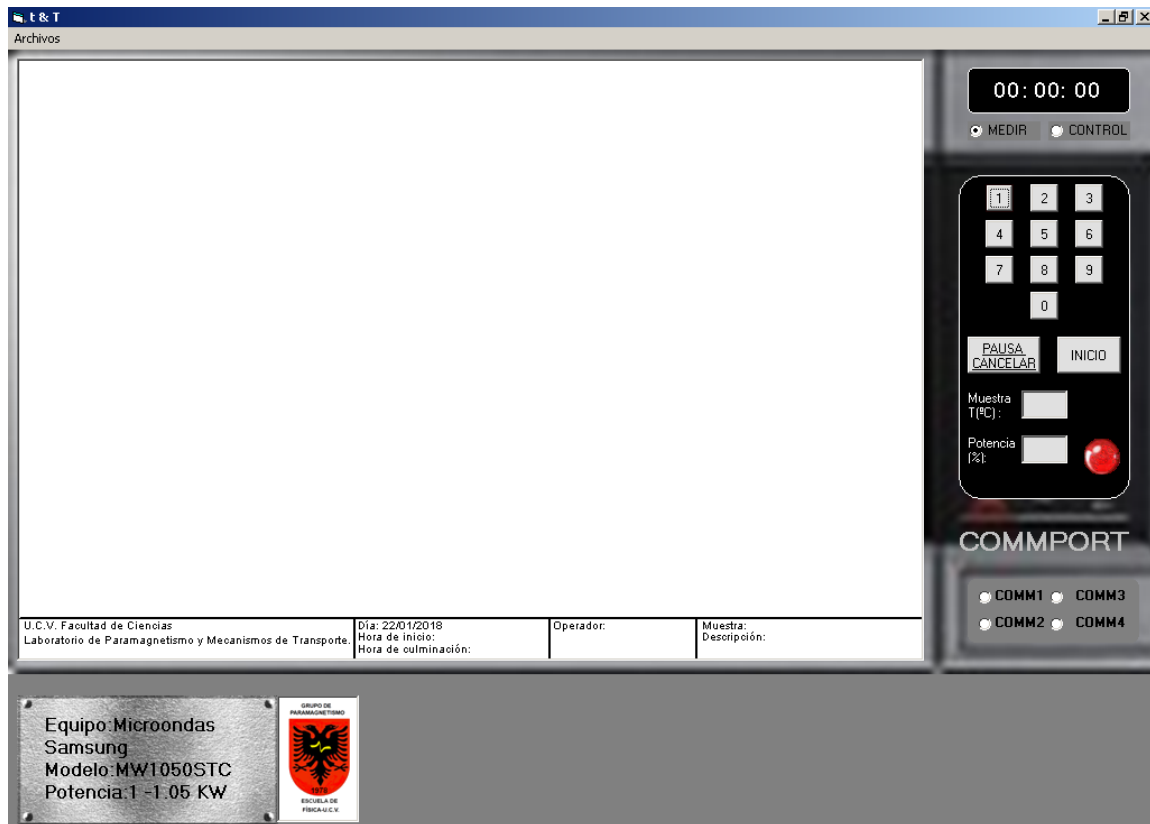


Fig. 55 Ventana de graficación de temperatura vs tiempo.

3.3. Descripción de la Pruebas Realizadas al Sistema de Control de Temperatura

Para el diseño de las pruebas del sistema de control de temperatura se evaluaron las siguientes características: el manejo de potencia del horno con lo cual se verificó el funcionamiento del equipo, así como su exactitud, precisión y el grado de control sobre la temperatura al establecer un rango de potencia de temperatura y una curva teórica de calentamiento para lo cual se usó dos tipos de muestras diferentes.

3.3.1. Funcionamiento del Sistema de Control.

Manejo de Potencia de Trabajo del Horno de Microondas

Experimento 1. Verificación de la respuesta del horno, al variar el voltaje de entrada en su transformador.

Antes de conectar el sistema de control al horno de microondas, para asegurarnos de que el horno acepta variaciones en el voltaje de entrada y poder así variar su potencia de trabajo, se conectó un variac a su transformador de alto voltaje (Fig. 56). Se colocó un beaker con agua a temperatura ambiente dentro del mismo para verificar al tacto si hay variaciones de temperatura. Tanto el agua como el beaker fueron remplazados antes de cada cambio de voltaje, el cual se disminuyó desde 116 VAC hasta 80 VAC. En cada nuevo voltaje, este se mantuvo constante durante 3 minutos.



Fig. 56 Conexión del variac al transformador de alta potencia.

Experimento 2. Activación del TRIAC del circuito manejador de potencia.

Para monitorear la activación correcta y buen funcionamiento del TRIAC, se observó en un osciloscopio, el desfase entre la señal AC de la línea de la calle y la señal de salida del acoplamiento óptico del circuito rectificador.

Para los experimentos siguientes se conectó el manejador de potencia a diferentes tipos de cargas como se observa en la figura 57.

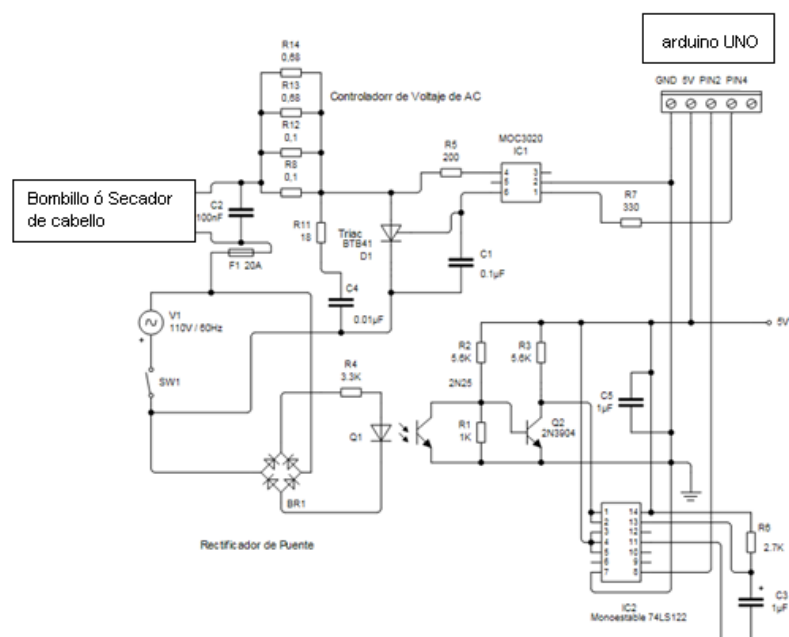


Fig. 57 Sistema de control de potencia conectado a un bombillo o a un secador de cabello.

Experimento 3. Observación del control por ángulo de fase.

Se conectó el manejador de potencia a un bombillo de 60 watt (0,06 KW) y se observó el retraso entre la señal de salida del acoplamiento óptico del circuito rectificador, con respecto a la señal de salida generada por el Arduino UNO al variar la potencia.

Experimento 4. Comparación de las señales de salida del circuito manejador de potencia al conectarlo a dos diferentes tipos de cargas (resistiva e inductiva).

Con la finalidad de verificar si el circuito electrónico diseñado, puede manejar la potencia máxima de trabajo del horno de microondas (1.05 KW), se observó la respuesta del sistema al conectarlo a los siguientes elementos:

1. A un bombillo de 60 watts (0,06 KW), controlando su intensidad de luz.
2. A un secador de cabello de 1875 watts (1,875 KW), controlando su velocidad.

Se conectó el circuito al bombillo (carga resistiva) y al horno de microondas (carga inductiva). Al variar la potencia, se observó en un osciloscopio las señales de salida del circuito manejador de potencia.

Dispersión de las medidas de equipo.

Al conectar el manejador de potencias al horno de microondas y tener todo el sistema automático de control de temperatura instalado, se procedió a realizar pruebas para el conocimiento de la exactitud y precisión, así como de la capacidad para controlar la temperatura. Los experimentos fueron realizados colocando las muestras en un reactor de teflón (Fig. 58) y éste dentro del horno, en su parte superior (Fig. 51a), inicialmente se usó agua como muestra ya que es un medio líquido polar común.



Fig. 58 Reactor de teflón.

Antes de comenzar los experimentos se procedió a calibrar el sensor de fibra óptica. Se colocó el reactor con 30 ml. de agua en una plancha en baño de maría y se calentó desde 23 °C hasta 70 °C. Se midió la temperatura con un termómetro de mercurio y con la fibra óptica al mismo tiempo. Luego se colocó el reactor con la tapa cerrada dentro del horno de microondas y en el programa diseñado en Visual Basic 6.0 se seleccionó el modo de trabajo “medir”, para luego medir la temperatura durante 15 minutos sin hacer control de la misma, se repitió este procedimiento dos días diferentes, de esta manera se correlacionó el voltaje de salida del módulo de acondicionamiento de la señal de la fibra óptica con la temperatura del agua.

3.3.2. Efecto de la variación de la potencia de trabajo del horno de microondas sobre la temperatura.

Se colocó 30 ml. de agua en el reactor de teflón (este se ubicó como se muestra en la figura 49a) y se calentó durante 5 minutos en el horno de microonda colocando potencia de trabajo fija de 100%,70% y 60% durante el calentamiento. Se realizó un control ON-OFF al horno donde la temperatura deseada (setpoint) en los tres casos fue 60 °C, creando una curva teórica de calentamiento como se muestra en la figura 59.

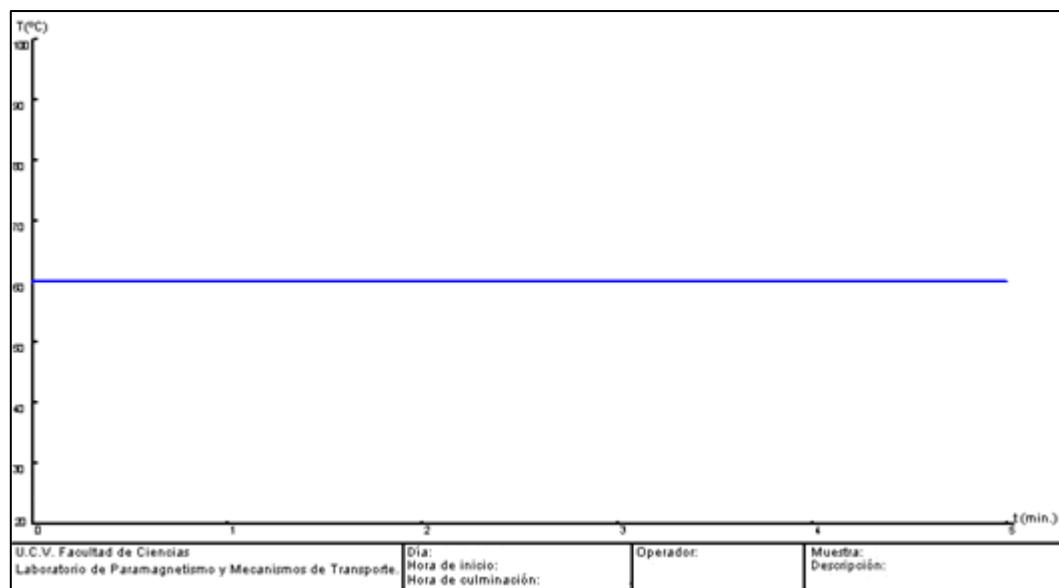


Fig. 59 Curva teórica de calentamiento para el agua al realizar control ON-OFF y variar la potencia: (a) 100%, (b) 70% y (c) 60%.

3.3.3. Funcionamiento del Sistema de Control de Temperatura en el Proceso de Evaporación.

Para los experimentos que a continuación se presentan, en el software diseñado en Visual Basic 6.0, previamente se fijaron los siguientes valores de potencias de trabajo del horno de microondas: 0 %, 58 %, 60 %, 63 %, 65 %, 70 %, 74 %, y 77 % y se seleccionó el modo “control”.

Muestra 1. Uso del control de temperatura utilizando agua como muestra.

Para cada experimento se colocó 30 ml. de agua en el reactor de teflón y se colocó en el horno de microondas, ver figura 50a.

Caso a. Reactor con la tapa sobre puesta.

Para fines de esta prueba la tapa del reactor se colocó sin cerrar herméticamente y se creó una curva de calentamiento constante a 50 °C durante 15 minutos, como se observa en la figura 60.

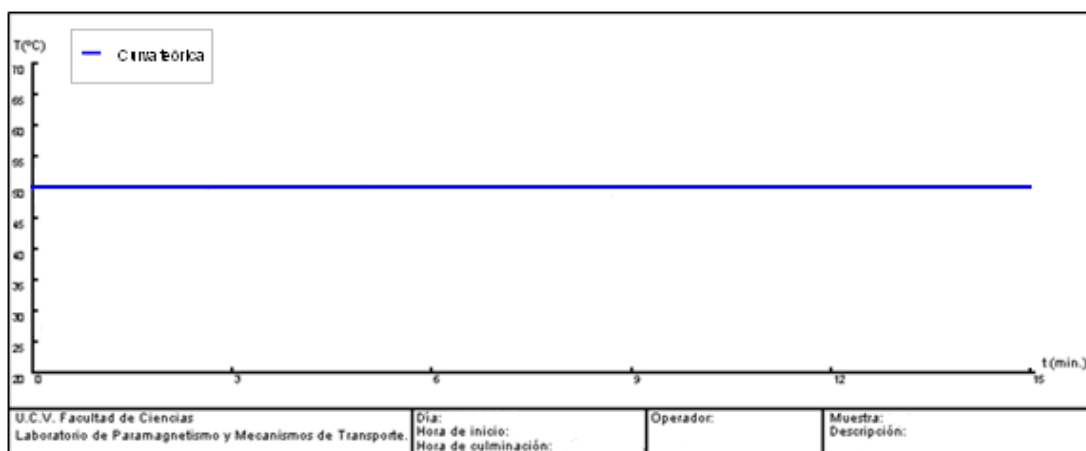


Fig. 60 Curva teórica de calentamiento, tanto para el reactor con la tapa cerrada como para el reactor con la tapa sobre puesta.

Caso b. Reactor con la tapa cerrada.

Se colocó el reactor con la tapa cerrada herméticamente y se crearon dos curvas de calentamiento diferentes:

Experimento 1. Curva teórica de calentamiento se diseñó igual que la de la prueba anterior.

Experimento 2. Curva teórica de calentamiento de 20 minutos (Fig. 61); durante los primeros 10 minutos la temperatura aumenta hasta 50 °C y luego, permanece constante en 50 °C durante los siguientes 10 minutos.

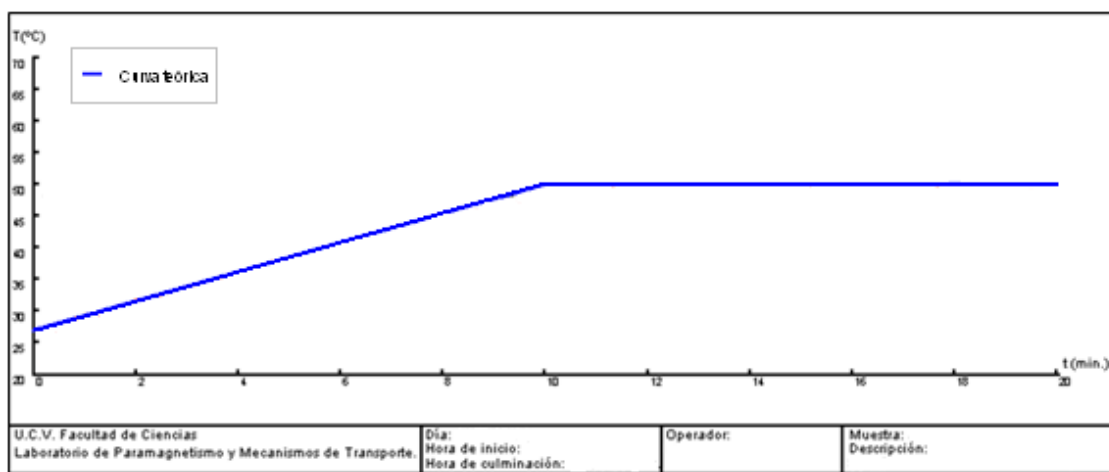


Fig. 61 Curva teórica de calentamiento programada para el experimento2 para el reactor con la tapa sobre puesta.

Muestra 2. Uso del control de temperatura en la evaporación de etanol, en la producción de oleorresina de ajo.

Como en otras investigaciones, se contó con la colaboración de la profesora Marta Mediavilla de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V. La profesora nos propuso el uso de este método de calentamiento, en la extracción de solventes en la producción de oleorresinas. En esta ocasión nos proporcionó una solución de ajo en etanol (solvente extractor de la oleorresina), con un día de maceración.

Para la evaporación del etanol se procedió inicialmente a colocar 15 ml. de la solución en el reactor de teflón con la tapa sobre puesta. La evaporación del etanol debe realizarse a baja temperatura ya que puede descomponer la oleorresina. Tomando en cuenta propiedades del etanol, tales como: constante dieléctrica ($\epsilon' = 6,5$) y punto de ebullición ($78,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), se procedió a realizar 2 experimentos de control de temperatura, para ellos el reactor se dejó con la tapa sobre puesta para lograr mayor evaporación del etanol:

Experimento 1. Curva teórica de calentamiento de 13 minutos, con una rampa rápida que aumenta durante los primeros 3 minutos hasta llegar a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ para luego mantenerse constante los siguientes 10 minutos, ver figura 62.

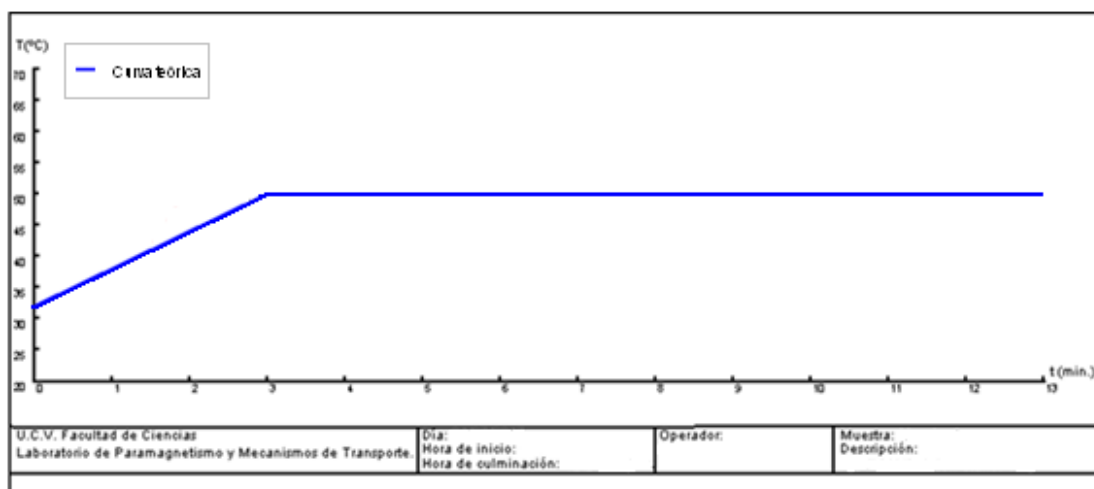


Fig. 62 Curva teórica de calentamiento programada para el experimento1 en el proceso de evaporación.

Experimento 2. Curva teórica de calentamiento de 17 minutos; en ella la temperatura aumenta a 50 °C durante 3 minutos y luego, se mantiene constante en ese valor durante los siguientes 14 minutos como se observa en la figura 63.

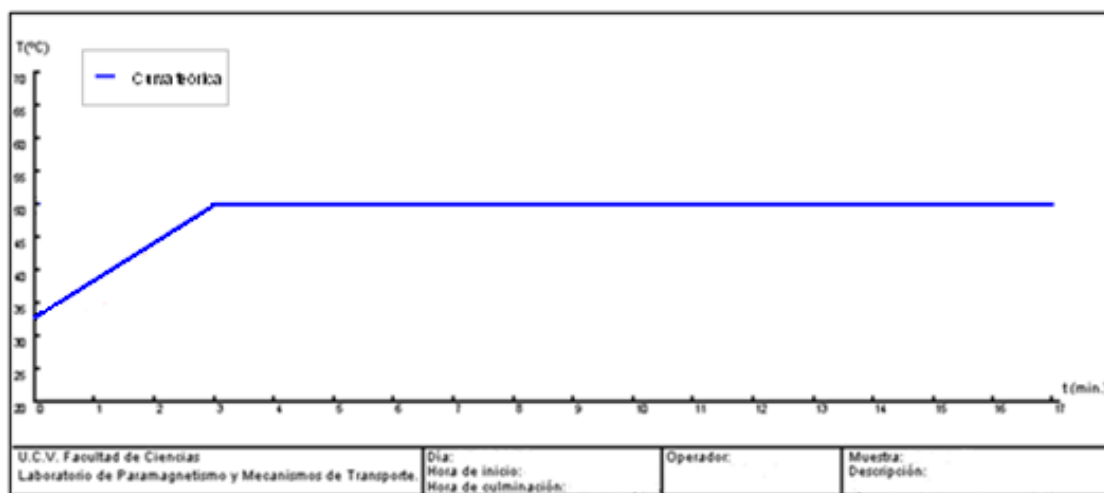


Fig. 63 Curva teórica de calentamiento programada para el experimento2 en el proceso de evaporación.

Al iniciar y finalizar cada uno de los experimentos se pesó la solución de ajo en etanol y se tabulo los siguientes datos: Temperatura deseada (T_d), tiempo de calentamiento (t), volumen inicial (V_i), volumen final (V_f) y diferencia entre volumen inicial y volumen final (ΔV).

Arduino se va retrasando con respecto a la señal de salida del acoplamiento del circuito rectificador.

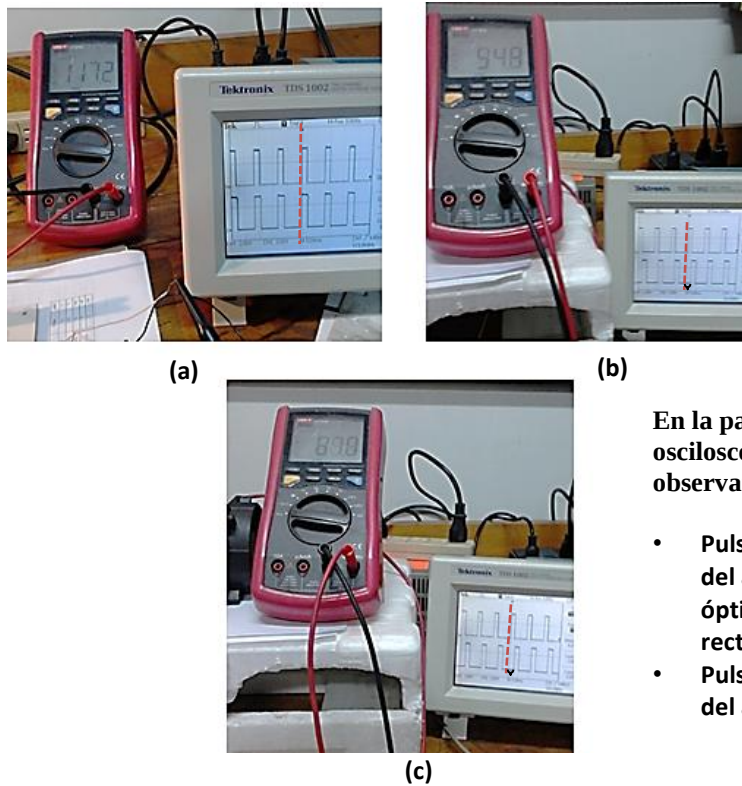


Fig. 65 Potencia de trabajo del horno de microondas y retardo de la señal de salida del Arduino UNO: (a) 100 % de potencia, retardo $t=0$ ms, (b) 89,9 % de potencia, retardo $t=1$ ms y (c) 74 % potencia, retardo $t > 1$ ms.

En el Experimento 4, al conectar el bombillo se observan las variaciones en el valor del voltaje de entrada al transformador, así como la señal de voltaje AC a la salida del circuito controlador de potencia, ver la figura 66. Esta última señal, al disminuir la potencia, se convierte en un pulso simétrico. Al usar como carga un bombillo, observamos en el osciloscopio las siguientes señales con potencia de entrada: 100%, 97%, 90% y 74%.

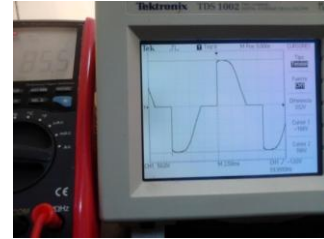
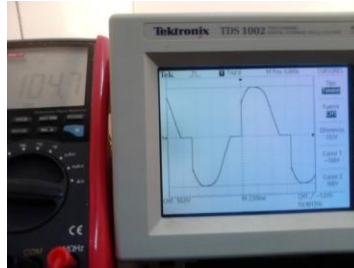
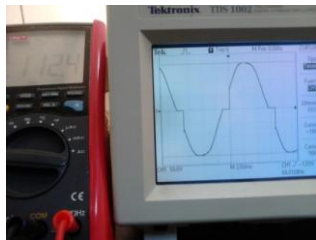
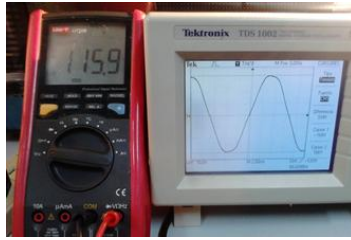


Fig. 66 Señal de voltaje de entrada al transformador de alto voltaje al variar la intensidad de luz de un bombillo:
(a) 100%, (b) 97 %, (c) 90 % y (d) 74 %.

Luego al conectar el sistema de control al horno de microondas, observamos en la figura 67 como la señal de entrada, al variar la potencia de trabajo, se va convirtiendo en una señal pulsada y simétrica. Sin embargo se observa en ellas una perturbación, así como una disminución del voltaje con respecto a la experiencia anterior.



Fig. 67 Señal de voltaje de entrada al transformador de alto voltaje al variar la potencia de trabajo del horno de microondas: (a) 100 %, (b) 93,5 y (c) 76%.

Dispersión de las medidas de equipo.

Al calibrar el sensor de fibra óptica se tomaron datos de las temperaturas medidas con el termómetro de mercurio y del voltaje observado en el sensor, estos fueron graficados, al observar la Fig. 68 se evidencia un comportamiento lineal del voltaje con respecto a la temperatura.

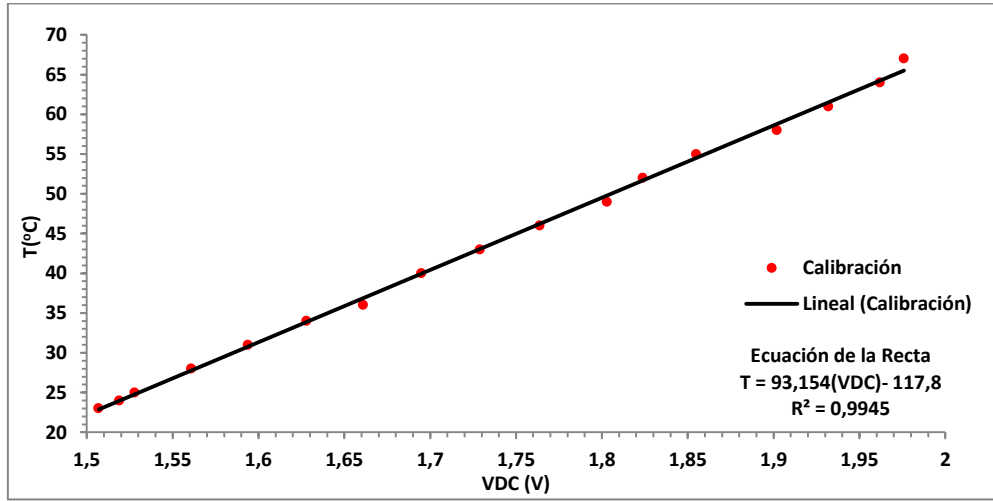


Fig. 68 Gráfica del comportamiento de la salida analógica del sensor de fibra óptica con respecto a la temperatura.

Se tomaron los 17 valores de voltaje dados por el sensor de fibra óptica al medir la temperatura y se calcularon los valores teóricos temperatura usando la ecuación de la recta (Fig. 68), a dichos valores teóricos se les calculó el error absoluto (E_a) con respecto a las temperaturas medidas y finalmente se calculó el promedio ponderado³ de ellos con la ecuación 4.1, dando un valor de 0,3 °C.

$$\overline{E_a} = \frac{\sum_{i=1}^{17} E_{a_i}}{17} \quad (4.1)$$

³ En el Capítulo 4 solo se calcularon promedios ponderados, el cual es una media exacta y se calcula con la siguiente expresión: $\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$; donde X son valores medidos y n el número de ellos.

Teniendo el sensor calibrado se procedió a medir la temperatura de una muestra de agua a temperatura ambiente, se obtuvieron los gráficos en la figura 69 que se muestran a continuación.

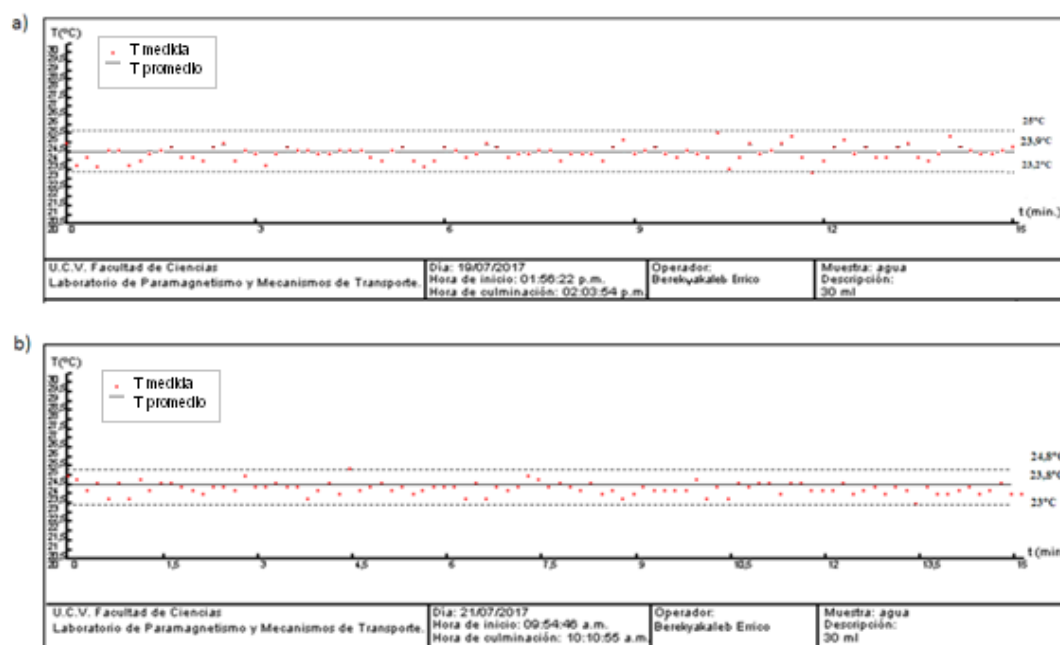


Fig. 69 Gráfica de la temperatura vs el tiempo del agua sin control de potencia: (a) 19/07/17 y (b) 21/07/17.

Se tomaron todos los valores de las temperaturas medidas en ambos casos (Anexo 7, tabla A7-1 y tabla A7-2), se calculó la temperatura promedio $\bar{T}$ y la desviación estándar (σ), así como, la tendencia de dichas medidas, ver figura 70. Los valores obtenidos para el “caso a” son $\bar{T}=23,96$ °C con $\sigma=0,41$ °C, y para el “caso b” $\bar{T}=23,82$ °C y su $\sigma=0,32$ °C.

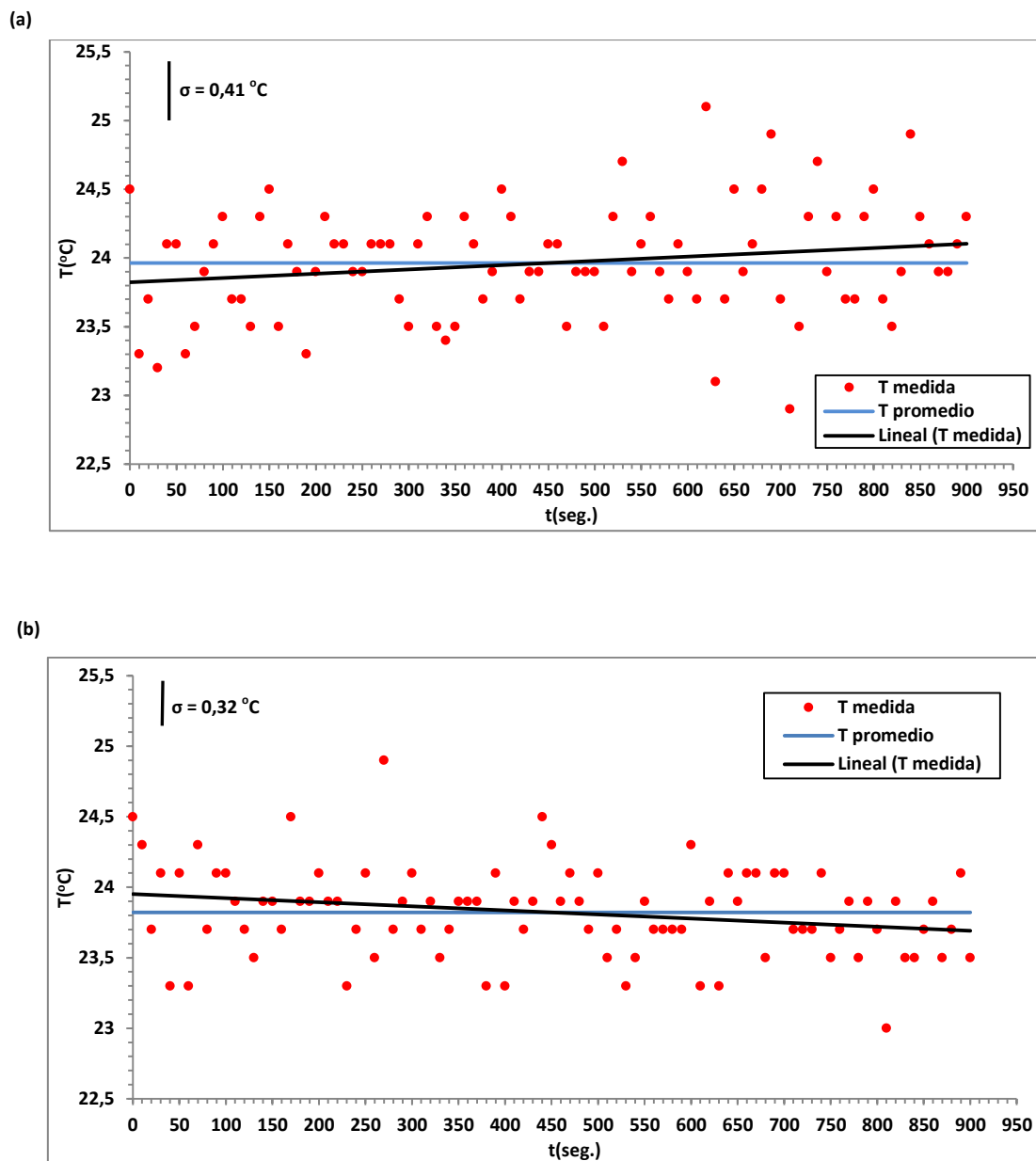
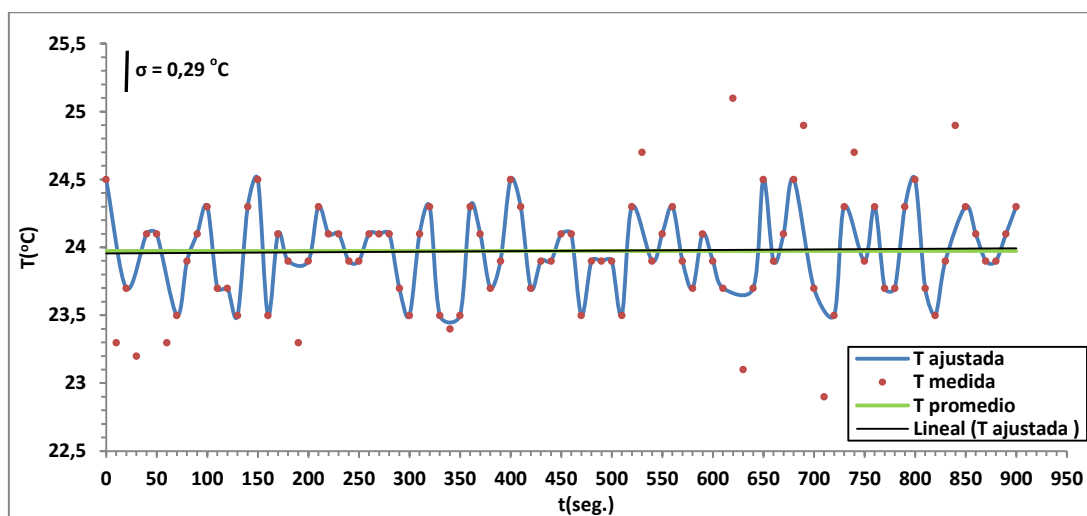


Fig. 70 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la línea de tendencia de las medidas de la temperatura del agua, sin control de potencia del horno: (a) 19/07/17 y (b) 21/07/17.

Se calculó que en el “caso a” existe un 13,2 % y en el “caso b” un 9,9 % error instrumental, ya que los valores de las medidas son superior a la desviación estándar y que están fuera de la velocidad de reacción del sistema. Se graficó el comportamiento de la temperatura sin tomar en cuenta dichas medidas, esta curva la llamare temperatura ajustada ($T_{ajustada}$), ver figura 71.

(a)



(b)

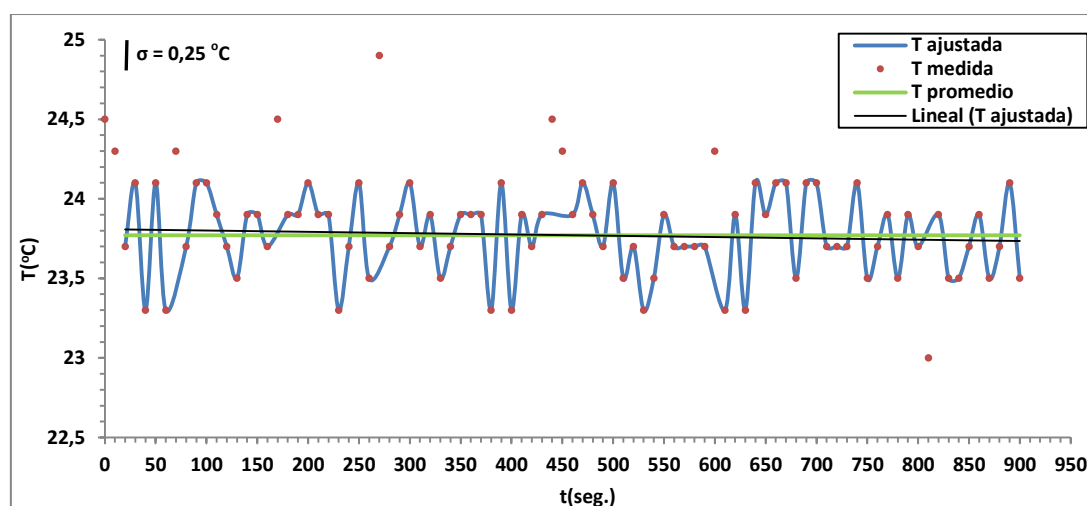


Fig. 71 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura ajustada, la temperatura promedio y la línea de tendencia de las medidas de la temperatura del agua sin control de potencia del horno: (a) 19/07/17 y (b) 21/07/17.

Los dos procedimientos anteriores ayudan a saber si el equipo tiene una exactitud y precisión aceptable y poder verificar el control que ejerce el sistema en las dos muestras propuestas: agua y solución de ajo en etanol.

4.2. Efecto de la variación de la potencia de trabajo del horno de microondas sobre la temperatura.

Caso a. Al trabajar el horno a 100% de su potencia se puede observar en la figura 72 un aumento rápido de la temperatura del agua, en 40 segundos, desde 24,5 °C hasta 92 °C y luego se enfría de manera natural.

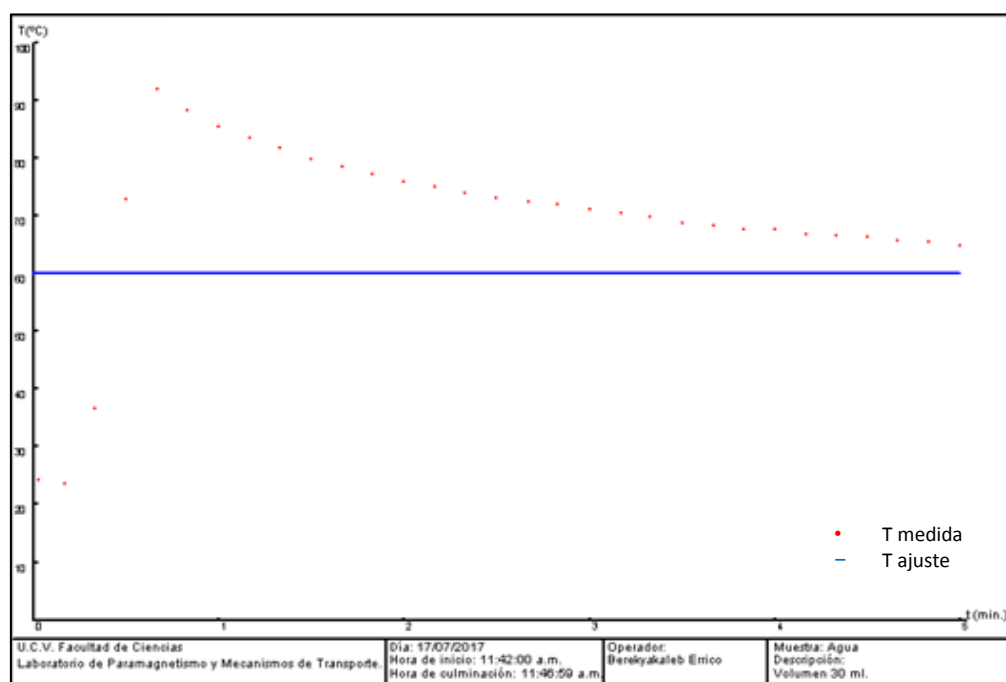


Fig. 72 Gráfica de la temperatura Vs el tiempo del agua con control ON-OFF a 100% de potencia de trabajo del horno de microondas.

Caso b. Al disminuir la potencia de trabajar del horno a 70% se puede observar en la figura 73 una disminución de la velocidad de calentamiento con respecto al caso anterior, hubo un aumento en minuto y diez segundos desde temperatura ambiente a 64,6 °C, luego el enfriamiento es de manera natural creándose sobrepasos con un máximo de temperatura de 64,1 °C.

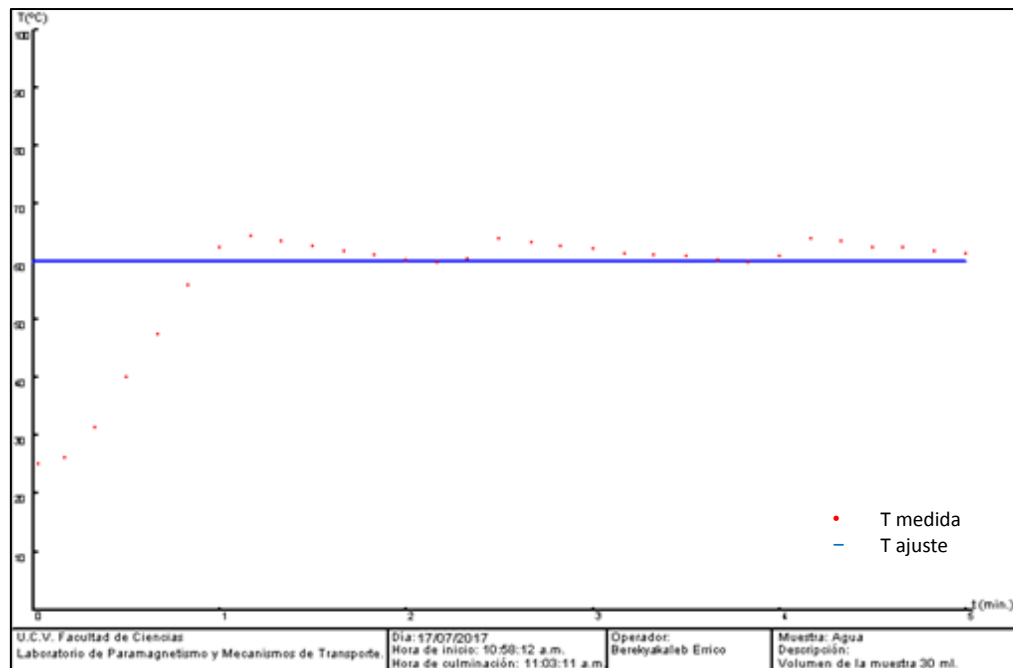


Fig. 73 Gráfica de la temperatura Vs el tiempo del agua con control ON-OFF a 70% de potencia de trabajo del horno de microondas.

Caso c. Al trabajar el horno a 60% de su potencia se puede observar en la figura 74 una mayor disminución de la velocidad de calentamiento del agua, hubo un aumento en tres minutos y diez segundos de temperatura ambiente a 60,8 °C, y se notan dos sobrepasos pequeños de máximo de temperatura de 64,8 °C.

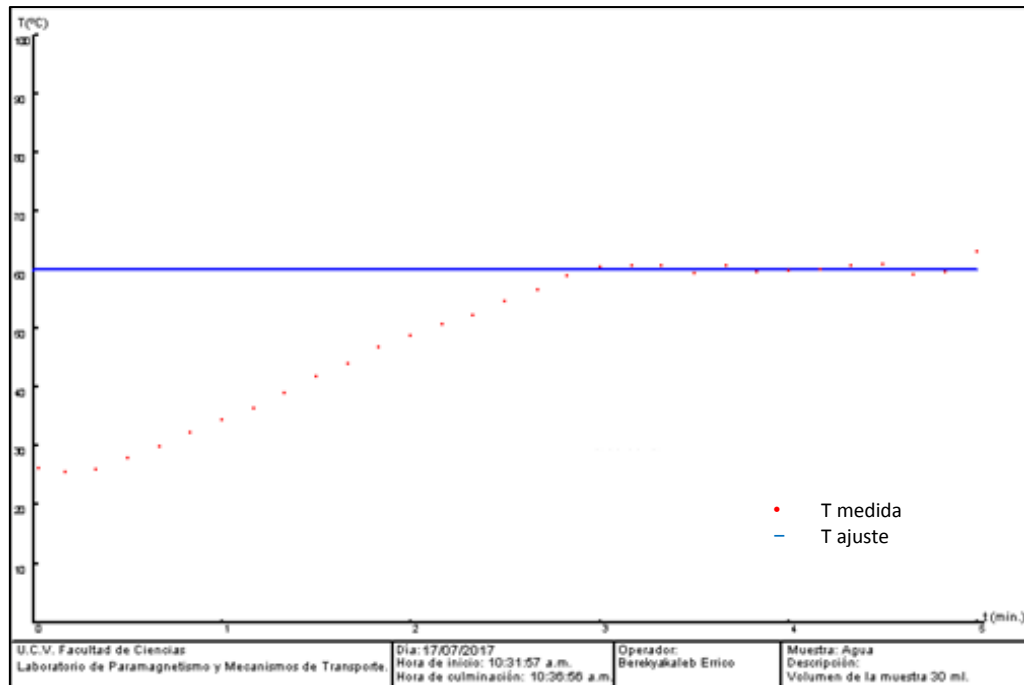


Fig. 74 Gráfica de la temperatura Vs el tiempo del agua con control ON-OFF a 60% de potencia de trabajo del horno de microondas.

De manera unificada se puede observar en la figura 75 que hay una variación en la temperatura con respecto a la potencia de trabajo del horno ya que la disminución de la velocidad de calentamiento disminuye al disminuir la potencia de trabajo.

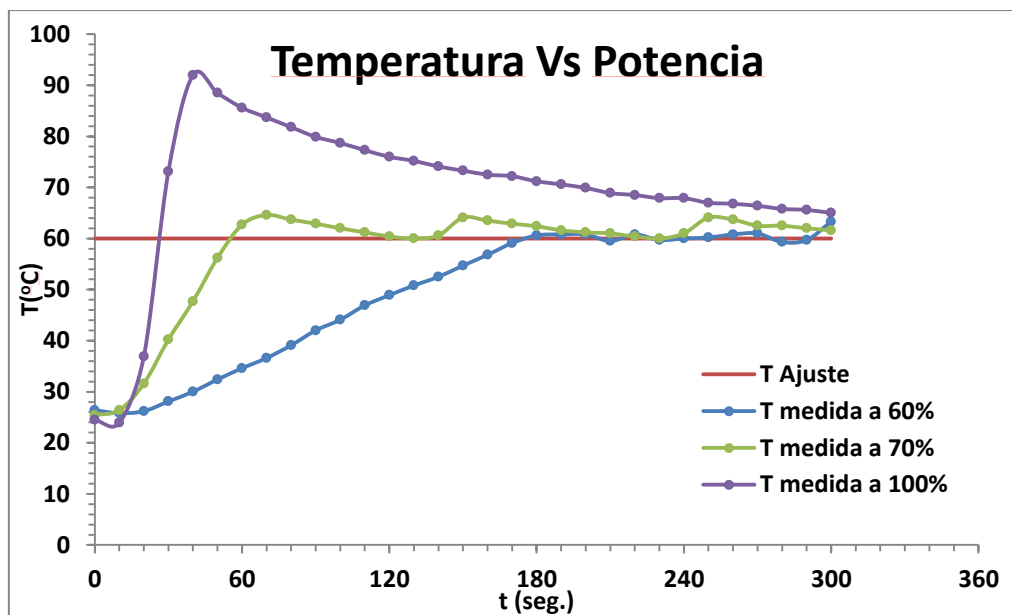


Fig. 75 Gráfica de calentamiento de agua con control ON-OFF a 100%, 70% y 60 % de potencia de trabajo del horno de microondas.

4.3. Funcionamiento del Sistema de Control de Temperatura en el Proceso de Evaporación.

Caso a. Reactor con la tapa sobre puesta.

En este experimento se puede observar, como la el agua aumenta su temperatura hasta 50 °C en 1 minuto aproximadamente y luego, ella se mantiene entre 49 °C y 50,8 °C llegar al minuto 15, ver figura 76.

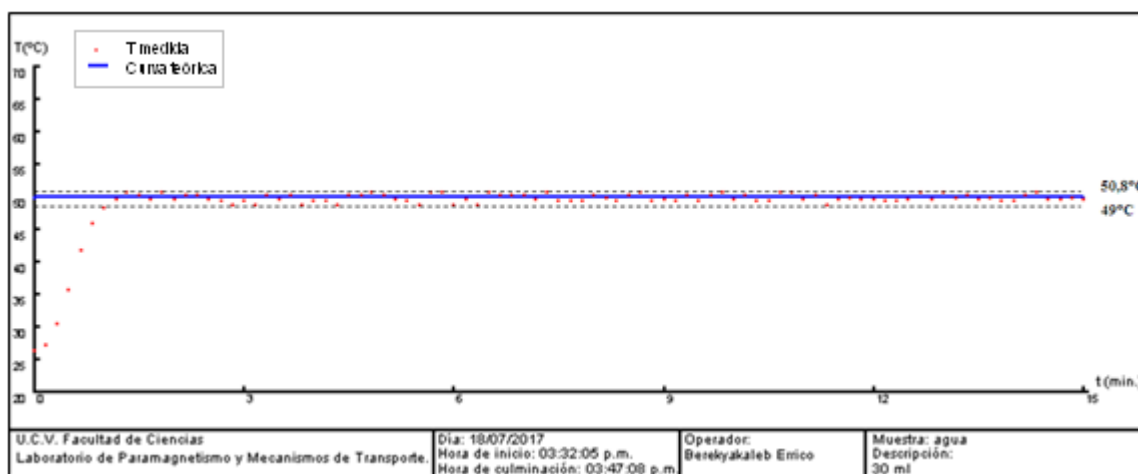


Fig. 76 Gráfica de la temperatura vs tiempo del agua con la tapa del reactor sobre puesta, controlando la potencia del horno. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C.

Se tomaron los valores de las temperaturas medidas desde el punto donde comienza a estabilizarse la temperatura (a partir del minuto diecisiete), ver Anexo 7, tabla A7-3. El cálculo de la temperatura promedio $\bar{T}$ es de 49,95 °C y la desviación estándar (σ) es igual a 0,68 °C. En la figura 77 se muestra gráficamente los valores obtenidos, así como, la tendencia de las medidas.

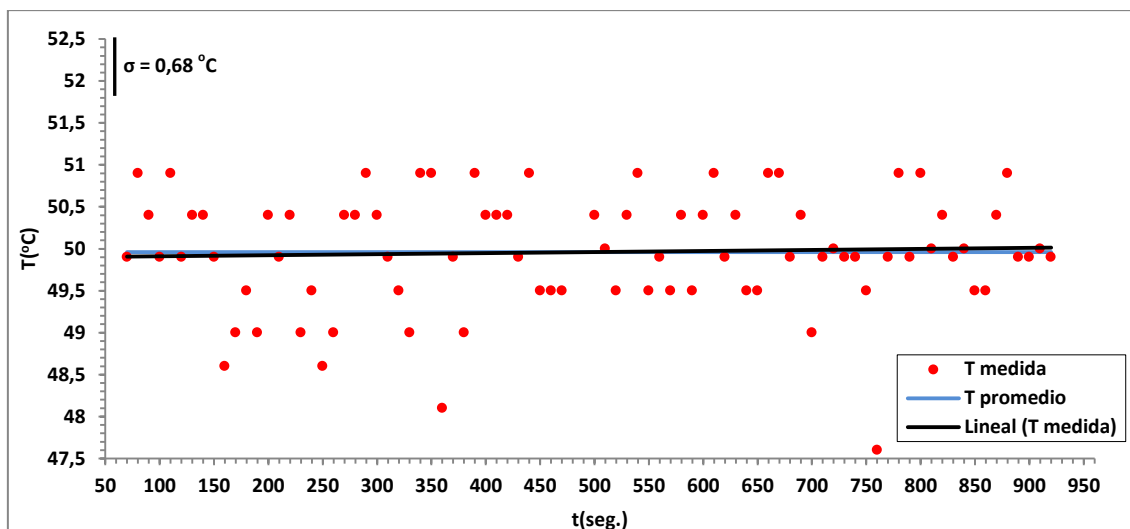


Fig. 77 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia de las medidas de la temperatura del agua con control de potencia del horno, con la tapa de reactor sobre puesta. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C

En este experimento, el porcentaje de error instrumental es 4,7 %. En la figura 78 se puede observar, la temperatura medida y la curva de la temperatura ajustada, así como, la tendencia de la temperatura.

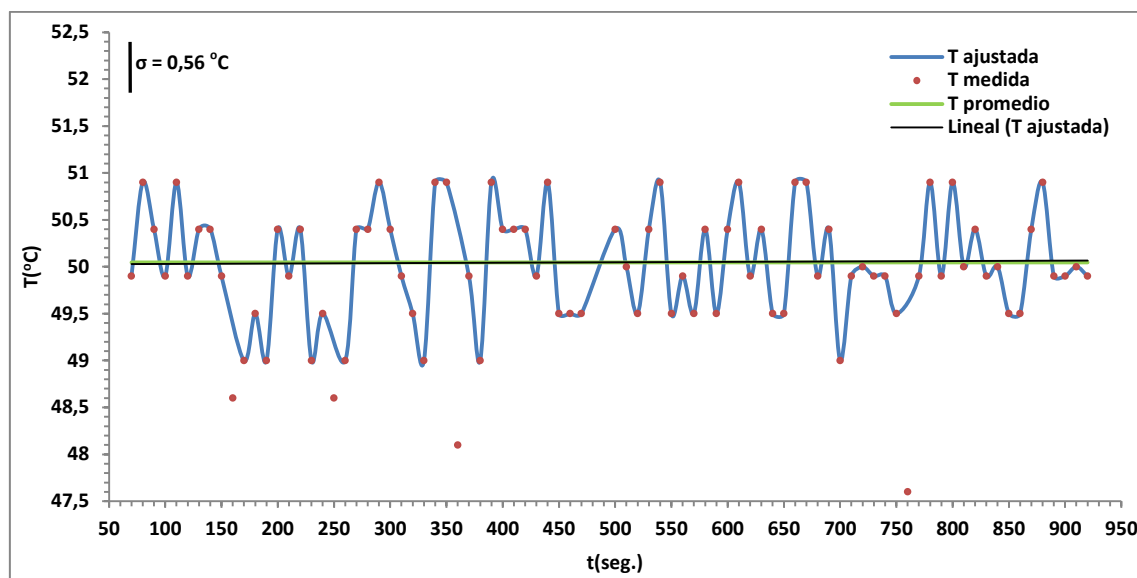


Fig. 78 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura ajustada, la temperatura promedio y la tendencia de las medidas de la temperatura del agua con control de potencia del horno con la tapa de reactor sobre puesta. La curva teórica de calentamiento es constante a 50°C .

Caso b. Reactor con la tapa cerrada.

Experimento 1. La curva teórica de calentamiento programada es constante a 50°C durante 15 minutos. Se puede observar en la figura 79, como el agua aumenta su temperatura hasta $52,5^{\circ}\text{C}$ en 1 minuto con 19 segundos, luego baja manteniéndose entre $48,9^{\circ}\text{C}$ y $50,7^{\circ}\text{C}$ hasta completar los 15 minutos. Se notar que hay medidas de hasta $0,7^{\circ}\text{C}$ por encima y $1,1^{\circ}\text{C}$ por abajo del valor de control.

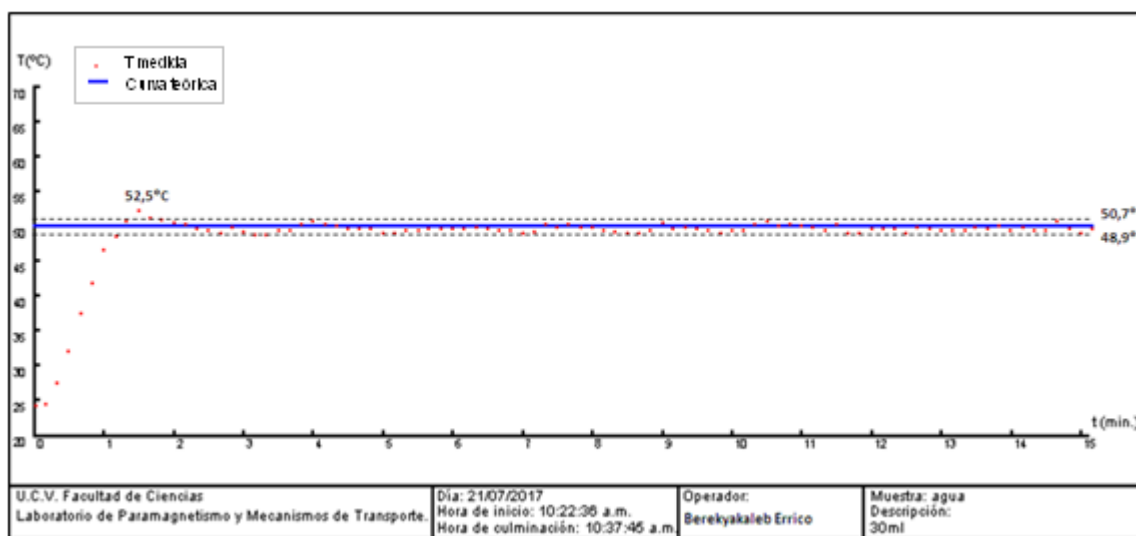


Fig. 79 Gráfica de la temperatura vs tiempo del agua con la tapa del reactor cerrada, controlando la potencia del horno. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C.

Tomando todos los valores de las temperaturas medidas a partir de los 3 minutos (Anexo 7, tabla A7-4) se calculó $\bar{T}=49,78$ °C y $\sigma=0,47$ °C. De manera gráfica, se muestran dichos cálculos en la figura 80.

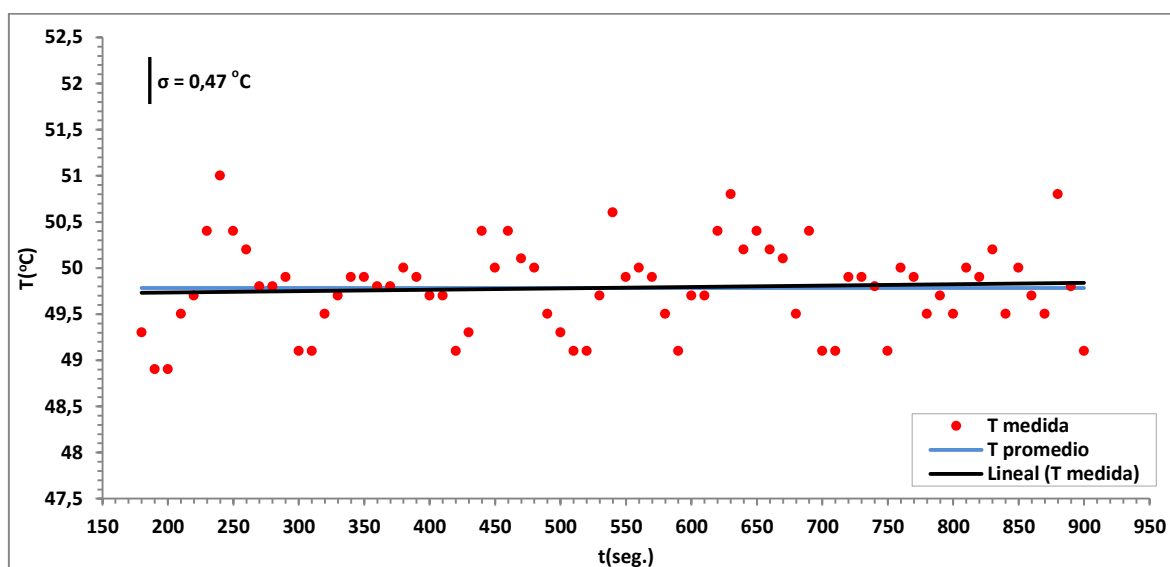


Fig. 80 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura del agua con control de potencia del horno, con la tapa del reactor cerrada. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C.

El porcentaje de error instrumental es de 8,2%. Se muestra en la figura 81, la temperatura medida y la curva de temperatura ajustada, así como, la tendencia de la temperatura.

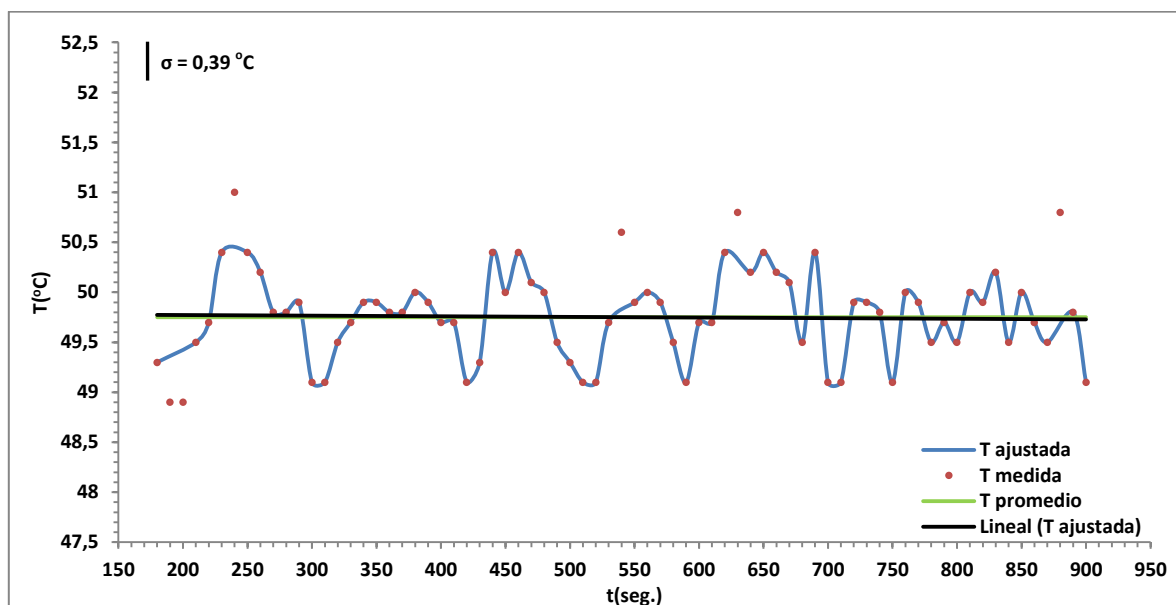


Fig. 81 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura ajustada, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura del agua con control de potencia del horno, con la tapa de reactor cerrada. La curva teórica de calentamiento es constante a 50 °C.

Experimento 2. La curva teórica de calentamiento programada aumenta durante 10 minutos hasta llegar a 50 °C y se mantiene constante hasta llegar al minuto 20. Se puede observar en la figura 82, como el agua aumenta de manera controlada su temperatura hasta 50,4 °C siguiendo la curva teórica con oscilaciones de poca amplitud y luego, mantiene una temperatura entre 48,9 °C y 50,4 °C durante 10 minutos. Las mediciones tienen valores de 0,4 °C por encima y 1,1 °C por debajo a la temperatura deseda.

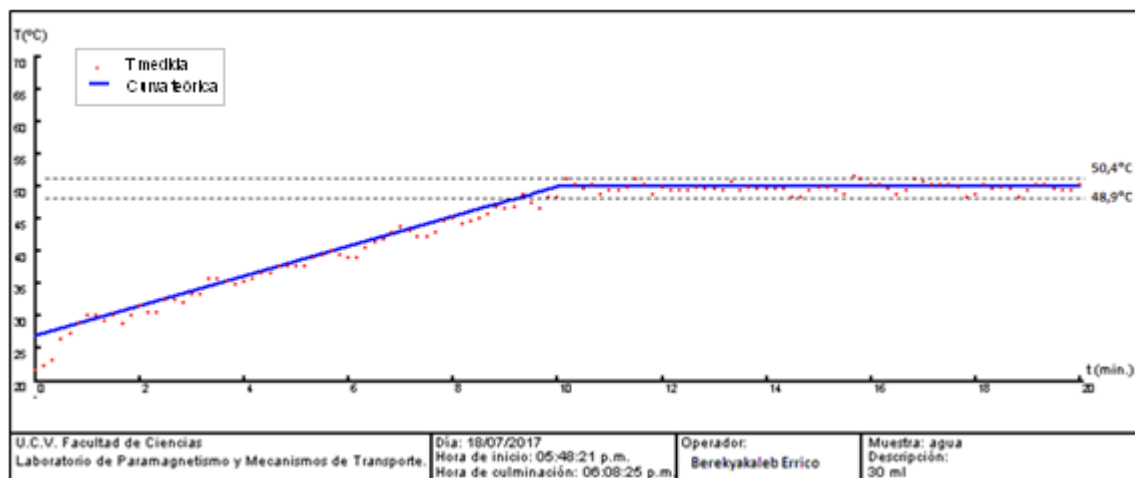


Fig. 82 Gráfica de la temperatura vs tiempo del agua, con la tapa del reactor cerrada controlando la potencia del horno. La curva teórica de calentamiento aumenta durante 10 minutos hasta 50 °C y luego permanece constante a esa temperatura durante 10 minutos

Para analizar los datos obtenidos, se tomaron los valores de las temperaturas medidas a partir de los 10 minutos, ver anexo 7, tabla A7-5. Los cálculos de la temperatura media $\bar{T}$ y la desviación estándar (σ) tiene un valor de $\bar{T}=49,87$ °C y $\sigma=0,80$ °C, los cuales fueron graficados, ver la figura 83.

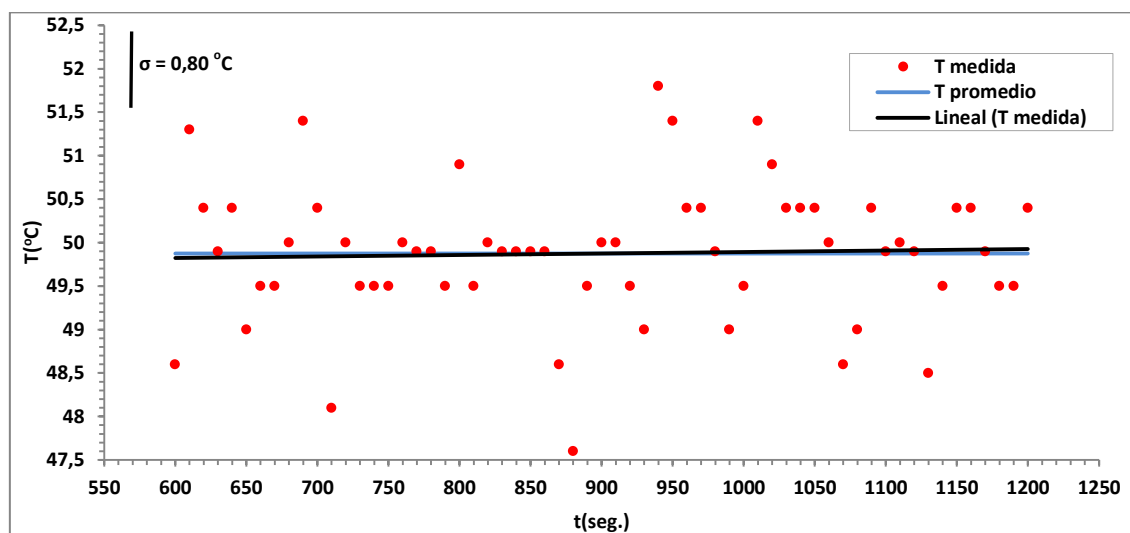


Fig. 83 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura del agua, con la tapa del reactor cerrada controlando la potencia del horno. La curva teórica de calentamiento aumenta durante 10 minutos hasta 50 °C y luego permanece constante a esa temperatura durante 10 minutos.

Al cambiar la el agua por una solución de ajo en etanol para la exacción del etanol, se obtuvo:

Experimento 1. La curva teórica de calentamiento programada aumenta desde temperatura ambiente durante 3 minutos, hasta llegar a 50 °C y se mantiene constante hasta llegar al minuto 13. En la figura 82, se muestra el comportamiento de la temperatura, al evaluar los valores medidos se observó un aumento a 51,4 °C a los 2 minutos con 19 segundos, el cual es el valor máximo de temperatura medido durante el experimento; también se observan oscilaciones de gran amplitud alrededor de la rampa de calentamiento durante los 3 primeros minutos. Luego, las temperaturas se mantienen entre 49,1 °C y 50,9 °C. Al comparar la Fig. 82 y la Fig. 84, nos damos cuenta que las oscilaciones presentes en las rampas de calentamiento varían su amplitud debido a la inercia térmica y la velocidad del sistema para responder a dicho calentamiento en el tiempo propuesto en la curva teórica.

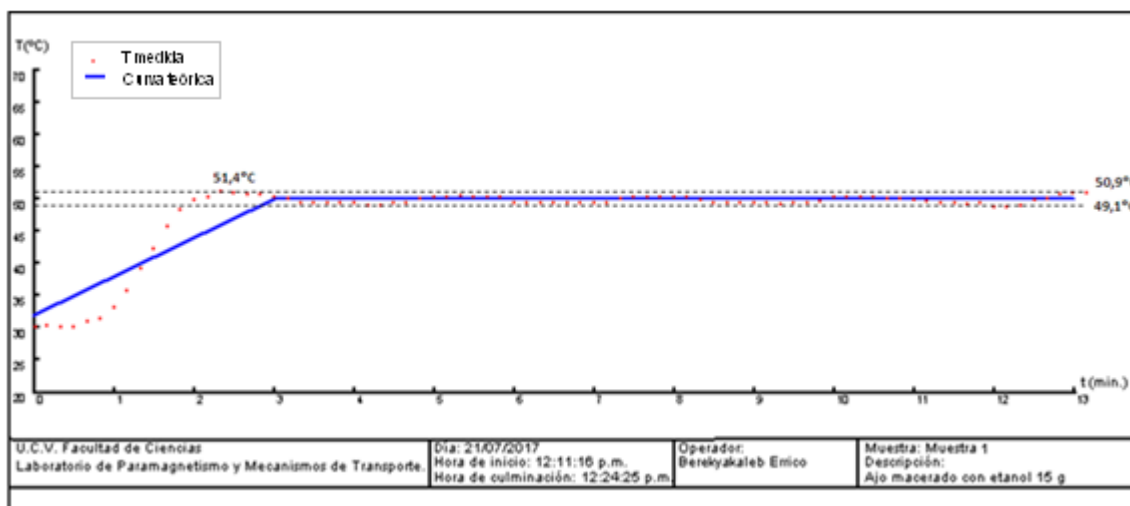


Fig. 84 Gráfica de la temperatura vs tiempo, experimento 1 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.

Se tomaron todos los valores de las temperaturas medidas del segmento de la curva teórica donde la temperatura empieza a estabilizarse (Anexo 7, tabla A7-6), esto ocurre a partir del minuto 3 y se calculó el promedio $\bar{T}$ y la desviación estándar (σ), obteniendo un valor $\bar{T}=49,85$ °C y $\sigma=0,54$ °C, ver la figura 85.

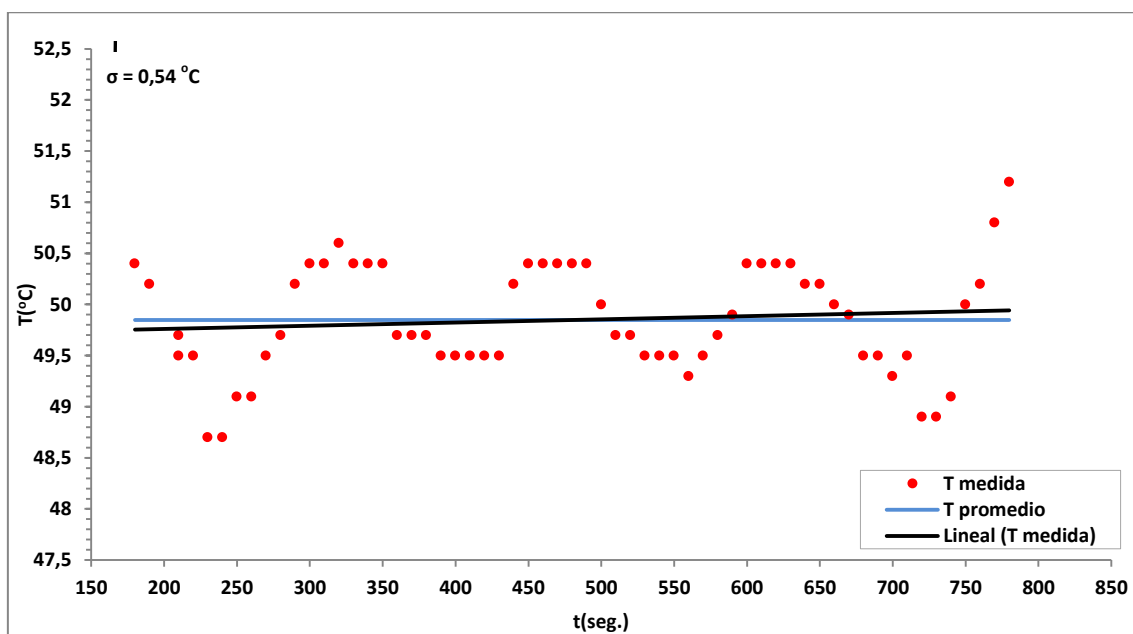


Fig. 85 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura, experimento 1 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.

En este experimento el porcentaje de error instrumental es de 14,7%. Se muestra en la figura 86 las temperaturas medidas, la temperatura promedio y la curva de temperatura ajustada, así como su tendencia.

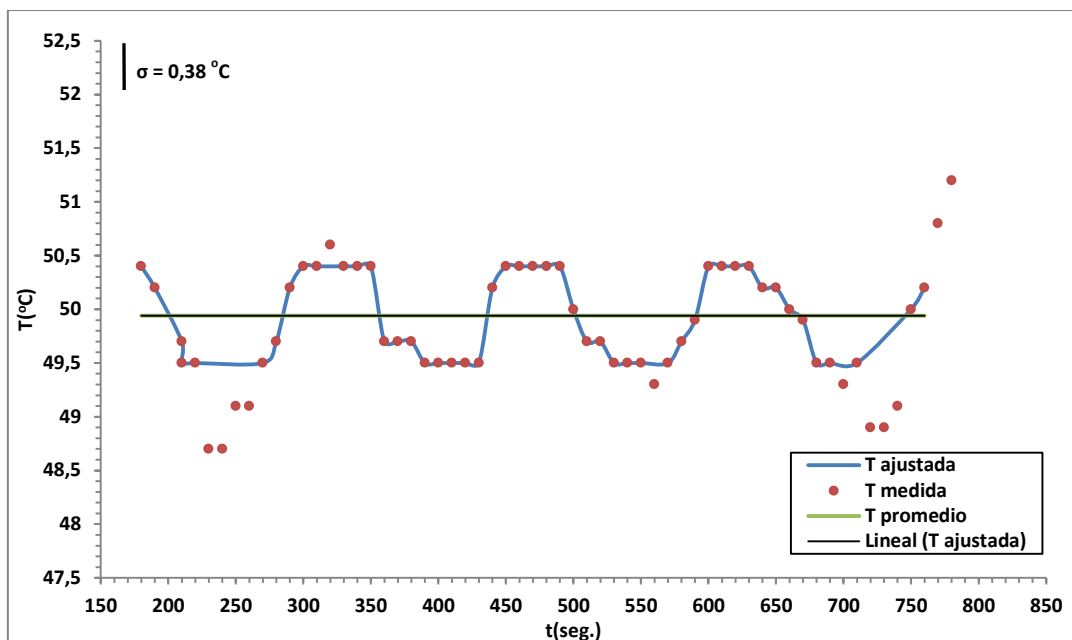


Fig. 86 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura ajustada, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura, experimento 1 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.

Experimento 2. La curva de calentamiento teórico programada aumenta durante 10 minutos hasta llegar a 50°C y se mantiene constante hasta llegar al minuto 17. Se observa en la figura 87, oscilaciones de menor amplitud que en la figura 82 y 84 alrededor del segmento de la curva de durante los primeros 3 minutos, donde la solución aumenta su temperatura a un máximo de $52,7^{\circ}\text{C}$, para luego oscilar entre $49,3^{\circ}\text{C}$ y $50,8^{\circ}\text{C}$.

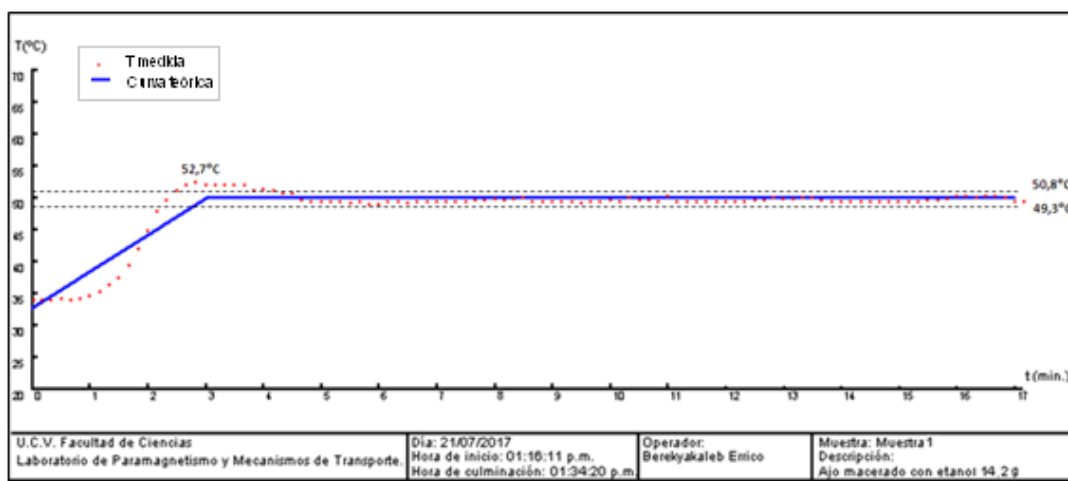


Fig. 87 Gráfica de la temperatura vs tiempo, experimento 2 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.

Se tomaron todos los valores de las temperaturas medidas a partir de los 5 minutos (Anexo 7, tabla A7-7), tiempo aproximado en el cual la temperatura comienza a estabilizarse para el cálculo de la temperatura promedio $\bar{T}$ y la desviación estándar en ambos casos (σ), dando un valor de $T=49,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\sigma=0,32\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dichos valores se observan gráficamente en la figura 88, así como la tendencia de la temperatura.

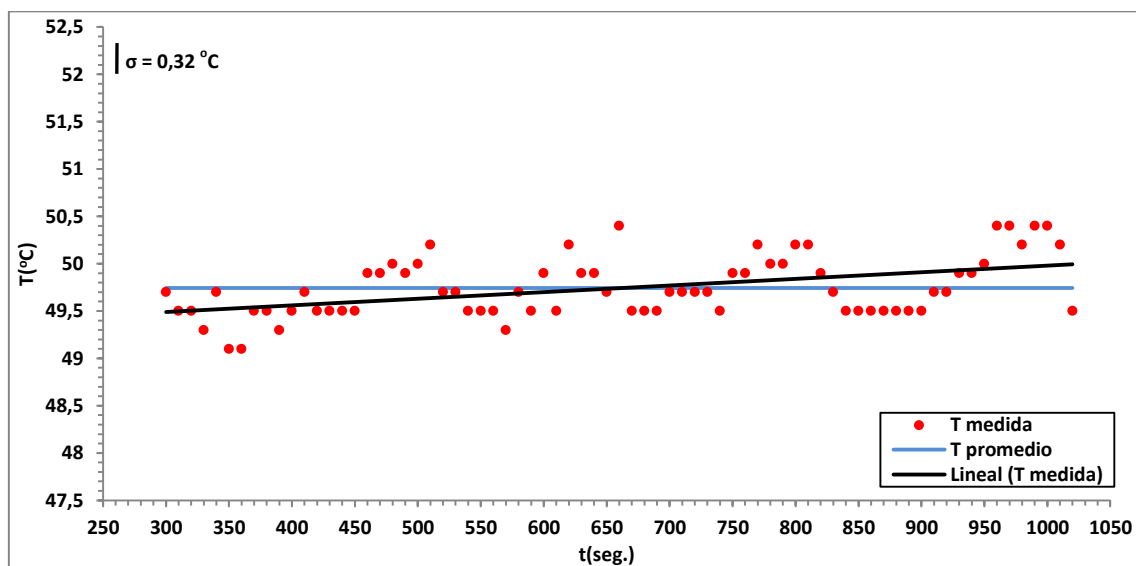


Fig. 88 Gráfica de la temperatura medida, la temperatura promedio y la tendencia de la temperatura, experimento 2 con una solución de ajo en etanol controlando la potencia del horno.

Las medidas del peso de la solución de ajo en etanol al iniciar y finalizar cada calentamiento se tabularon, ver tabla 7. Los cálculos realizados indican que en 30 minutos logro evaporar 2,1 g del contenido de ajo en etanol.

Caso	$T_d (^{\circ}\text{C})$	$t (\text{min.})$	$V_i (\text{g.})$	$V_f (\text{g.})$	$\Delta V (\text{g.})$
a	50	13	15	14,2	0,8
b	50	17	14,2	12,9	1,3

Tabla 7 Volumen de contenido de ajo en etanol en los experimento del proceso de evaporación.

4.3. Discusión de resultados.

Al variar el voltaje de entrada al transformador del horno de microondas, se controla la potencia de trabajo sin afectar el funcionamiento del mismo, esto se aprecia en el resultado del Experimento 1. Al realizar estos cambios de voltaje, se generan cambios en la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo del magnetrón, estableciéndose una relación entre el voltaje de entrada y la diferencia de potencial. Esto genera un menor calentamiento de las muestras cuando el voltaje de entrada es menor, por lo tanto la velocidad de calentamiento varía proporcionalmente a la variación de la potencia de trabajo del horno (ver en la figura 75 del capítulo 4, sección 4.2). En la siguiente prueba realizada (Experimento 2), al no haber un desfase entre la línea de la calle y la señal de disparo del TRIAC, permite la correcta activación del él, sin causar daños al circuito ni al horno.

Estas dos pruebas realizadas al manejador de potencia nos indican que está listo para ser conectado a una carga. Al conectar a dos tipos de carga resistivas que trabajan a diferente potencia (Experimento 3), demostrándose así, que el diseño de manejador de potencia es capaz de trabajar correctamente a diferentes potencias. Seguidamente se conectó al horno de microondas y se probó el comportamiento con una carga inductiva de alta potencia, ya que el horno funciona como tal carga. Se observa en el Experimento 4 de manejo de potencia, que el voltaje de entrada al transformador del horno tiene una caída de voltaje según el tipo de carga al cual se conecte el circuito.

El siguiente paso que consistió en fijar un rango de potencia de trabajo del horno de microondas, donde se eligió entre 58 % y 77 %, debido a que por debajo de él, el magnetrón no calienta y por encima la velocidad de calentamiento es demasiada, evitando el correcto control de la temperatura.

Una vez llegado a este punto, se experimentó con dos muestras de diferente composición química, una de agua y otra formada por una solución de ajo en etanol. Donde se evidencia (figuras 76 y 79) un comportamiento del control de temperatura de tipo PID, la temperatura

medida se ajusta a la temperatura deseada de manera predictiva, rápida y sin sobrepasos excesivos.

Otra característica de interés observada en las figuras 82, 84 y 87 son oscilaciones de la temperatura con relación a la rampa teórica. de calentamiento Estas tienen diferentes amplitudes y frecuencias en cada uno de los tres experimentos mencionados, lo cual se debe a que son muestras de diferente composición química y su respuesta al calentamiento, además de la respectiva inercia térmica, no son las mismas; por lo tanto, las oscilaciones pueden ser amortiguadas ya que la capacidad del sistema de control de ajustar la temperatura a las curvas teóricas depende de dos factores: el rango de valores propuestos de potencia de trabajo y la tasa de calentamiento propia de la muestra.

Con respecto a la sensibilidad y apreciación del equipo, en primer lugar se calculó la desviación estándar para cada experimento, tanto con el agua como con la solución de ajo en etanol, dándonos un valor promedio $\bar{\sigma}$ de la misma de 0,5 °C. Por otra parte, la apreciación del equipo es de 0,1 °C, lo cual se hace notable gráficamente en las figuras 74, 80 y 83.

Con los valores obtenidos en los cálculos de la desviación estándar y la apreciación del equipo, así como, la velocidad reacción del sistema, se puede decir que existe un porcentaje de error instrumental, que no se deben al diseño del circuito electrónico y que son causados por la resolución del conversor analógico - digital del Arduino UNO, así como a la diferencia entre el tiempo de muestreo y el tiempo de reacción del mismo. Al graficar la temperatura en función del tiempo sin error instrumental, se puede observar en las figuras 71, 78, 81 y 86 que la temperatura en el tiempo tiende a ser constante y cercana al valor del setpoint, así como, la disminución del valor de la desviación estándar, dando confiabilidad a la medida tomada.

Para fines de conocer la viabilidad de este método en la producción de oleorresina al evaporar el solvente, se tomó nota de las cantidades de solución de ajo en etanol (tabla 7), obtenida al principio y al final de cada experimentos realizados con esa muestra, indicando que hubo evaporación de 14 % del volumen inicial para un tiempo de calentamiento de 30 minutos.

Conclusiones

- Se cumplió el objetivo general al lograr la automatización total del sistema, así como, el control de temperatura al diseñar, tanto el *hardware* como el *software*.
- El control diseñado permite variar la potencia de trabajo del horno de microondas, y ejercer sobre la temperatura un control PID, reduciendo valores altos de dispersión en las medidas tomadas.
- El sistema de control automático de temperatura tiene una apreciación de 0,1 °C y una desviación estándar promedio de 0,5 °C, lo cual permite un mayor control de la temperatura y mejora la reproducción de los resultados.
- Se disminuyó de 1,5 °C a 0,5 °C la desviación estándar promedio del sistema automático de control de temperatura, con respecto al diseño anterior el cual ejercía con control ON-OFF sobre el horno.
- Las características propias de las muestras tales como: la velocidad de calentamiento e inercia térmica, son factores que influyen en el correcto ajuste del sistema a las curvas teóricas de calentamiento.
- El rango propuesto de potencias de trabajo del horno de microondas entre 58 % y 77% permitió un buen control sobre la temperatura, tanto para el agua como para una muestra de ajo en etanol.
- Los errores de medición causados por el equipo (error instrumental) no ocasionan un gran efecto en la precisión y exactitud del control de la temperatura, ya que la dispersión de dichas medidas no está muy por encima de la desviación estándar.
- Al no tomar en consideración el error instrumental, el valor de la temperatura media $\bar{T}$ se aproxima al valor de la temperatura a la cual se quiere controlar y disminuye la

desviación estándar. Al actuar de esta forma, se evidencia la máxima precisión en las medidas realizadas por el sistema automático de control de temperatura.

- La cantidad del volumen evaporado de la solución de ajo en etanol en 30 minutos, con un setpoint en 50 °C, muestra que el sistema puede ser usado para acelerar este proceso en la producción de oleorresinas.
- El volumen de solución evaporada, depende de tres factores: El setpoint, velocidad de calentamiento por adsorción de microondas y el tiempo de exposición a la radiación

Recomendaciones

- Diseñar una aplicación para teléfonos inteligentes y/o tabletas electrónicas que permitan el control del equipo de manera remota mediante el uso del módulo bluetooth con el que cuenta la placa Arduino UNO, permitiendo así simplificar el equipo y mayor comodidad al transportar el sistema de control de temperatura de un lugar a otro.
- Diseñar un módulo de adaptación para señal de la sonda de fibra óptica, de manera sustituir el módulo comercial y reducir gastos en la compra ya que es un equipo importado.
- Las curvas de teóricas calentamiento, deben ser diseñadas tomando en cuenta la velocidad de calentamiento e inercia térmica de las muestras expuestas a la radiación, de esta manera se logra un mejor ajuste a las rampas de calentamiento de las mismas.
- Comparar los resultados obtenidos con el sistema automático de control de temperatura con respecto a otro existente en el mercado.
- Para futuras investigaciones sobre la producción de oleorresinas, se propone:
 - a) Realizar experimentos que determinen cual es la temperatura más adecuada para que el proceso de evaporación se realice en un tiempo óptimo.
 - b) Realizar análisis físico-químicos para saber con exactitud qué porcentaje de etanol y agua se evapora en el proceso de calentamiento durante los tiempos establecidos en los experimentos, así, comprobar la pureza del producto obtenido.
 - c) Comparar la eficiencia de este método con respecto a otros.

- d) Diseñar un sistema adaptable a hornos de microondas para la recolección del solvente evaporado al momento del calentamiento, de esta manera se evita grandes pérdidas de material y exposición de gases al medio ambiente, también reduciría gastos en el laboratorio y a nivel industrial.

Anexos

Anexo 1. Propiedades de las zeolitas según su aplicación en la industria.

Se puede encontrar en la tabla A1-1 tres propiedades importantes en las zeolitas, estas dependen de la finalidad del uso al momento de trabajar con ellas [25].

ADSORCIÓN	
Purificación	Separación
Endulzamiento de gas (eliminación del azufre del gas natural). Purificación de gases industriales (adsorción de CO ₂ y agua). Anticontaminante ambientales (adsorción del NO ₂ y SO ₄ provenientes de la combustión de la gasolina).	Parafinas lineales y ramificadas. Xilenos. Olefinas.
INTERCAMBIO IÓNICO	
Ablandamiento de aguas industriales y domésticas (remoción de Ca ⁺² y Mg ⁺²). Eliminación de iones NH ₄ ⁺ de aguas servidas. Soporte de fertilizantes y drogas medicinales. Recolección de desechos radiactivos (Cs ⁺ y Sr ²⁺).	
CATALIZADORES Y SOPORTE DE CATALIZADORES	
Craqueo catalítico, hidrocraqueo o hidroisomerización. Transformación de metanol en gasolina. Alquilación, isomerización de aromáticos C8 y polimerización. Síntesis orgánica y química inorgánica.	

Tabla A1-1 Propiedades de las zeolitas y su aplicación industrial.

Anexo 2. Sistema de control de temperatura ON-OFF en lazo cerrado.

El sistema automatizado de control de temperatura consta de: un horno de microondas comercial, un sensor de fibra óptica con su módulo acondicionador de señales, un módulo de control y una computadora, ver la figura A2-1.

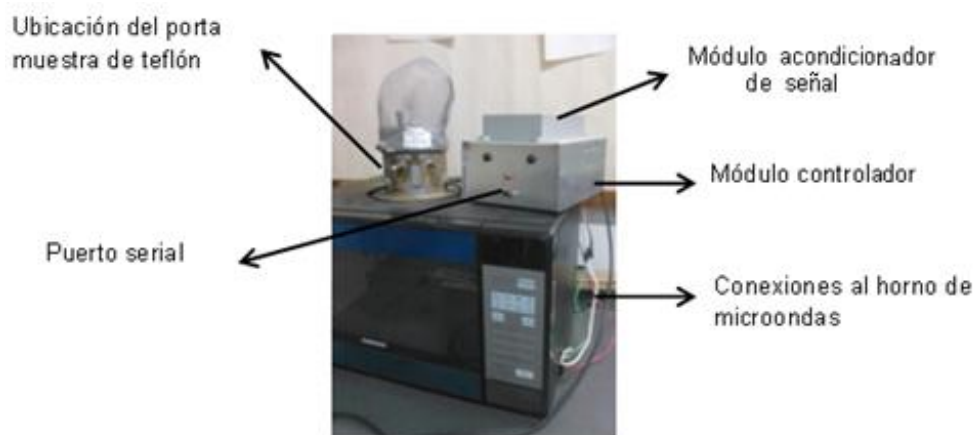


Fig. A2-1 Sistema automatizado de control de temperatura ON-OFF en lazo cerrado.

El módulo controlador se comunica a la PC vía puerto serial para la transmisión de datos y a su vez al horno de microondas, mediante un relé de estado sólido que está directamente conectado al transformador de alto voltaje que se encuentran en el horno, de esta manera se controla el paso de corriente hacia el magnetrón y así poder activarlo y desactivarlo, según sea la necesidad. El encendido y apagado del magnetrón se produce al enviarle el módulo de control trenes de pulsos cuadrados de 60 Hz, estos pueden variar el ancho de pulso de encendido entre 1 seg. y 6 seg. (Fig. A2-2), el apagado es constante de 6 seg. El proceso de encendido y apagado se repite por cada pulso generado, durante el tiempo establecido por el usuario.

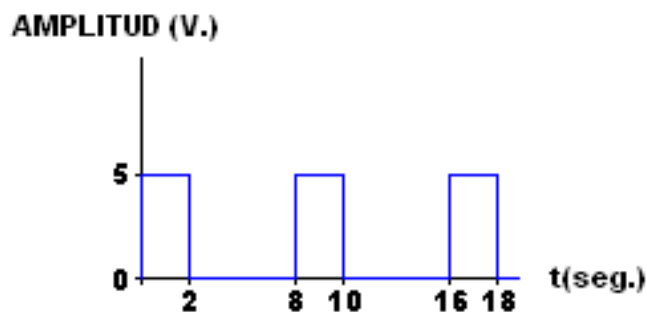


Fig. A2-2 Tren de pulsos cuadrados enviados por el sistema de control para el encendido y apagado del horno microondas.

Como se puede observar en la figura A2-3, el componente principal encargado del control, es un microcontrolador PIC16F87A, programado para que el sistema tenga dos estados: uno, donde actúa solo como un sensor y sólo puede medir la temperatura de las muestras y el otro, donde mide y controla la temperatura.

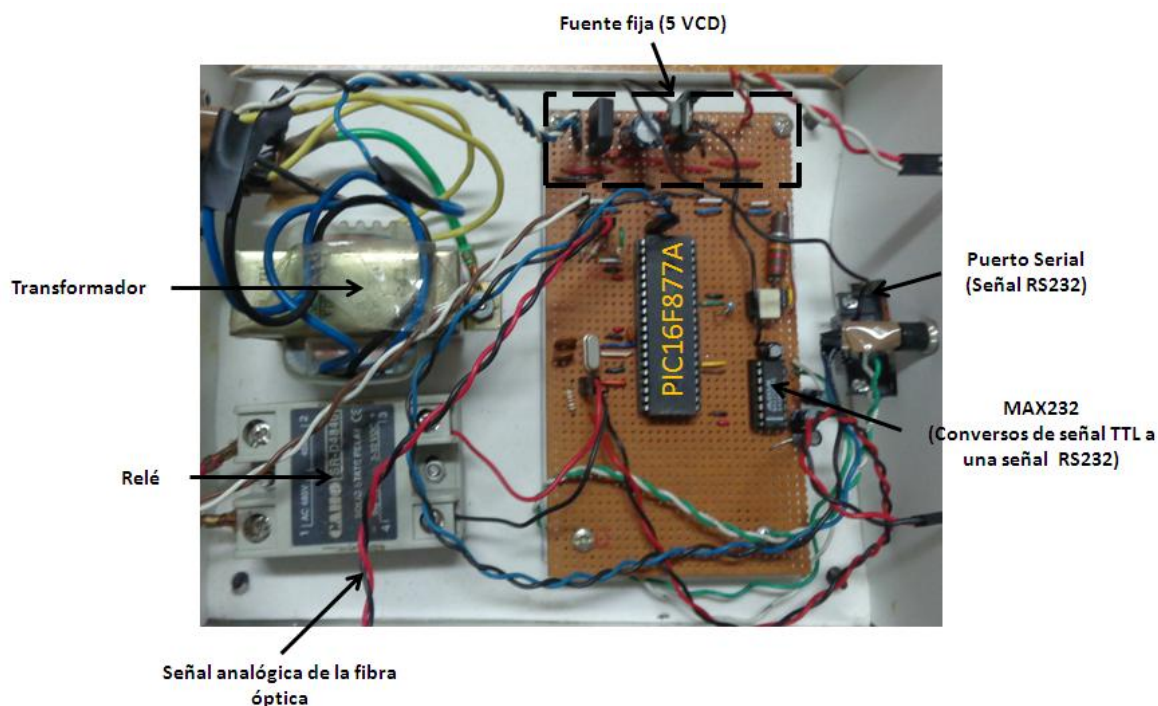


Fig. A2-3 Parte interna del módulo controlador ON-OFF en lazo cerrado.

El sensor de temperatura usado, es de fibra óptica con su respectivo módulo de adaptación de señal. Se tomó la salida analógica del módulo y se incorporó al módulo de control diseñado. El valor medido del voltaje en la salida analógica del sensor es superior a los 5V, se conectó a un divisor de tensión antes de conectarlo al microcontrolador, ya que el voltaje máximo de entrada que soportan estos dispositivos es 5V. Todos los datos obtenidos de la temperatura medida, son graficados en función del tiempo durante todo el proceso de calentamiento, los dato de las temperaturas medidas son registrados en un archivo .txt que genera el programa diseñado en Visual Basic 6.0.

Anexo 3. Pruebas realizadas al sistema automatizado de control de temperatura ON-OFF en lazo cerrado.

1. Estudio del error de medición del equipo.

Caso a. Sin control de temperatura.

Para estas pruebas se llenó el porta muestra con 30 ml. Agua a temperatura ambiente y se colocó en el horno de microondas, se midió la temperatura en diferentes momentos sin calentar el agua, el equipo se puso a funcionar en el modo donde solo mide temperatura.

Experimento 1. Se muestra en la figura A3-1 que la desviación estándar calculada es de 1,2 °C, la cota máxima de temperatura medida es de 24,6 °C y la mínima es 22,2 °C.



Fig. A3-1 Grafica de la temperatura versus el tiempo del agua sin control ON-OFF en lazo cerrado, duración 4 minutos y medios.

Experimento 2. En este caso el valor de la cota máxima de temperatura medida es de 26,8 °C y la mínima es de 23,8 °C, el valor de la desviación estándar es de 1,5 °C, ver la figura A3-2.

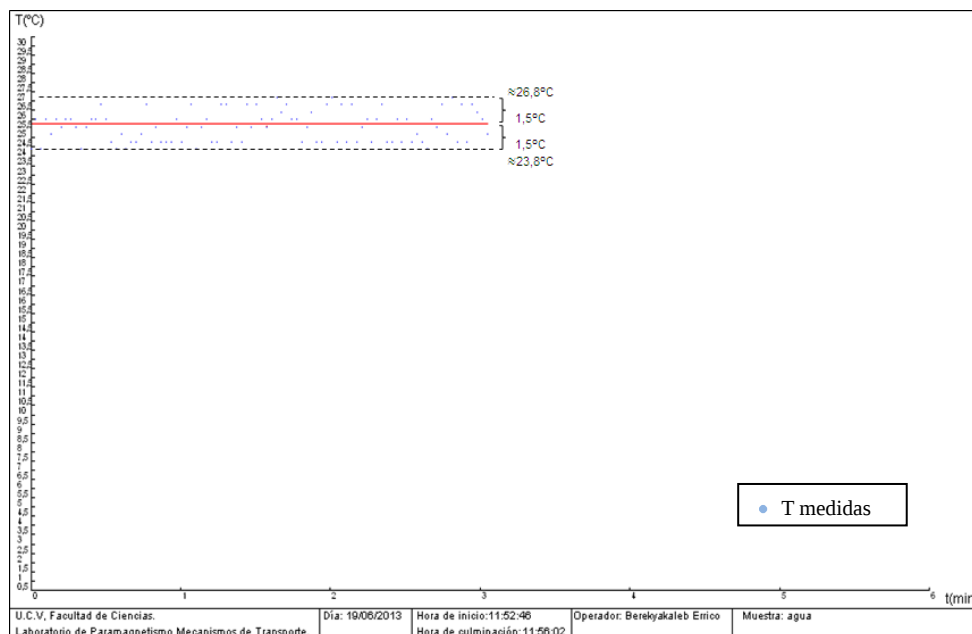


Fig. A3-2 Grafica de la temperatura versus el tiempo del agua sin control ON-OFF en lazo cerrado, duración 3 minutos.

Caso b. Con Control de temperatura

En ésta prueba se colocó 30 ml. de agua en el porta muestra y se calentó con un patrón constante de calentamiento de 60 °C (Fig. A3-3). Se midió la temperatura durante el proceso de control. Se tomaron medidas de temperaturas máximas de 61 °C y mínimas de 58 °C con desviación estándar de 1,5 °C

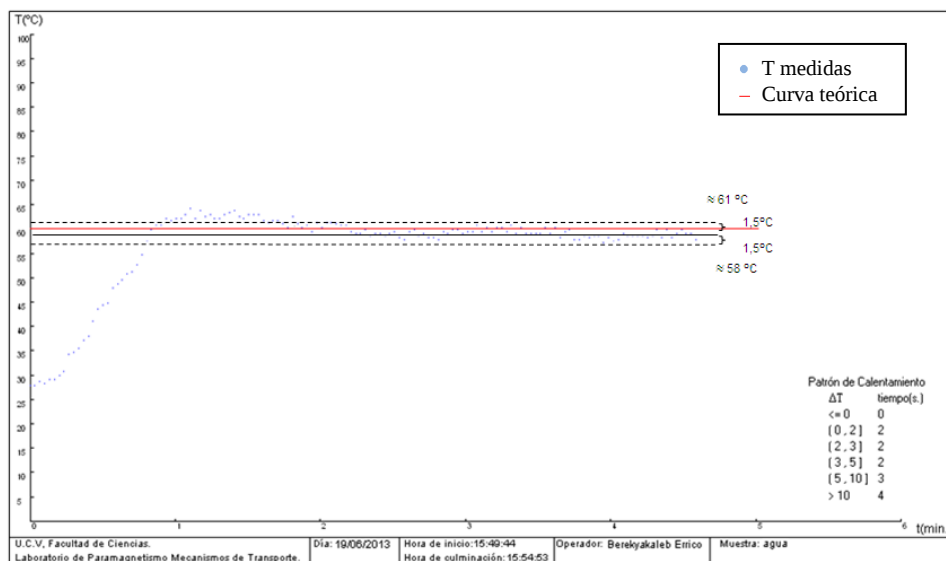


Fig. A3-3 Grafica de la temperatura versus el tiempo del agua con control ON-OFF en lazo cerrado, temperatura deseada 60 °C, duración 5 minutos.

2. Verificación del funcionamiento del equipo, mediante la síntesis de zeolita.

Para estas pruebas se colocó en el porta muestra un volumen de 20 ml. Un gel precursor de zeolita y se calentó siguiendo un patrón “*ad-hoc*”.

a) Experimento 1. Partiendo de temperatura ambiente, al llegar a la temperatura deseada, se mantuvo un patrón constante de calentamiento de 120 °C durante 12 minutos, ver la figura A3-4.

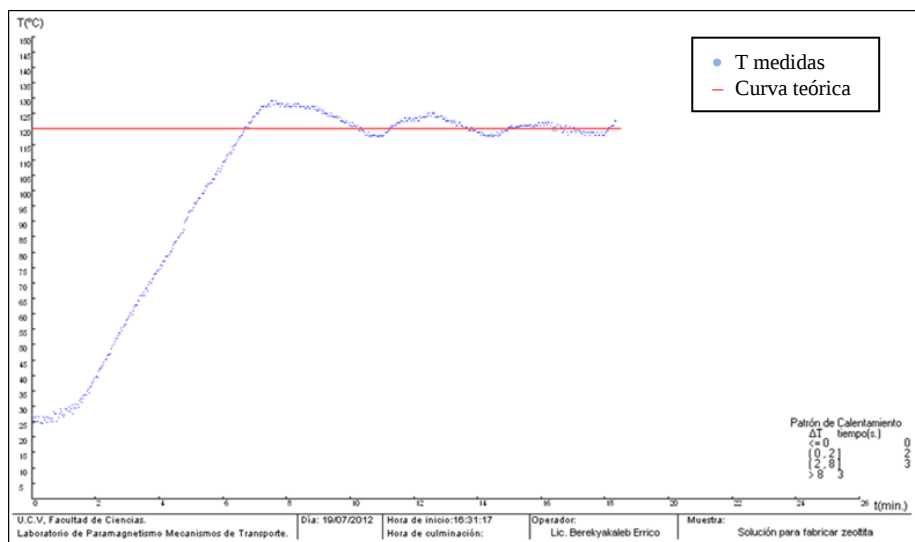


Fig. A3-4 Grafica de la temperatura versus el tiempo del agua con control ON-OFF en lazo cerrado, temperatura deseada 60 °C, duración total 18 minutos.

b)Experimento 2. El patrón de calentamiento propuesto fue de 5 minutos a temperatura constante de 120 °C (Fig. A3-5), dejando enfriar 1 minuto y por ultimo 1 hora a temperatura constante de 100 °C. Como se partió desde temperatura ambiente, el resultado obtenido fue el siguiente:

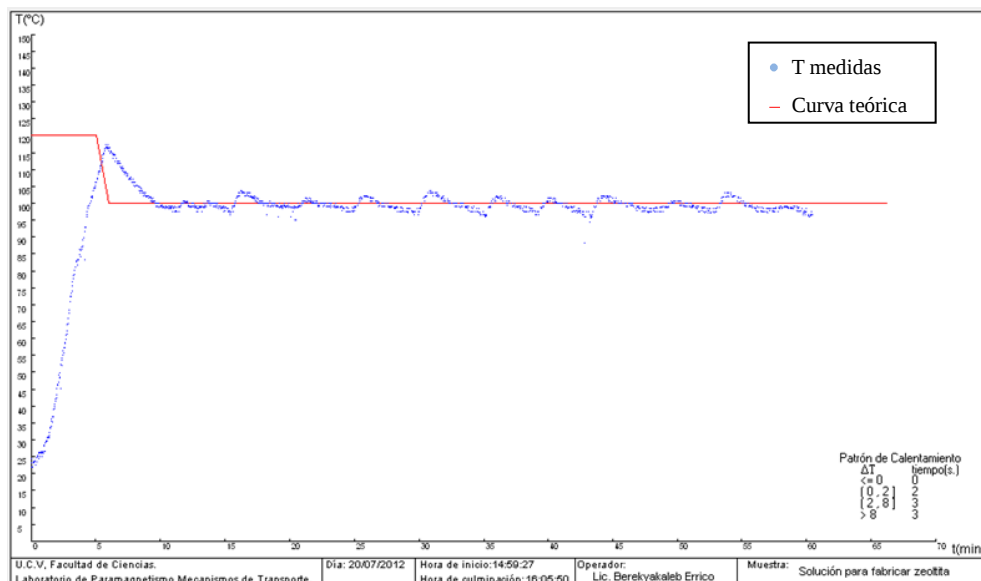


Fig. A3-5 Grafica de la temperatura versus el tiempo del agua con control ON-OFF en lazo cerrado. La curva teórica de calentamiento se mantiene a 120 °C durante 5 minutos, luego en 1 minuto disminuye la temperatura a 100 °C para mantenerse durante 1 hora.

3. Caracterización por medio de infrarrojo de las muestras obtenidas en la verificación del funcionamiento del equipo.

Al producto obtenido se le realizó caracterización mediante espectroscopia de infrarrojo⁴. Se comparó los espectros de las muestras sintetizadas (Fig. A3-7 y A3-8), con un patrón de zeolita tipo Y (Fig. A3-6), se presume que lo que se obtuvo fue una composición de zeolita tipo P y analcime [3].

Muestra Patrón

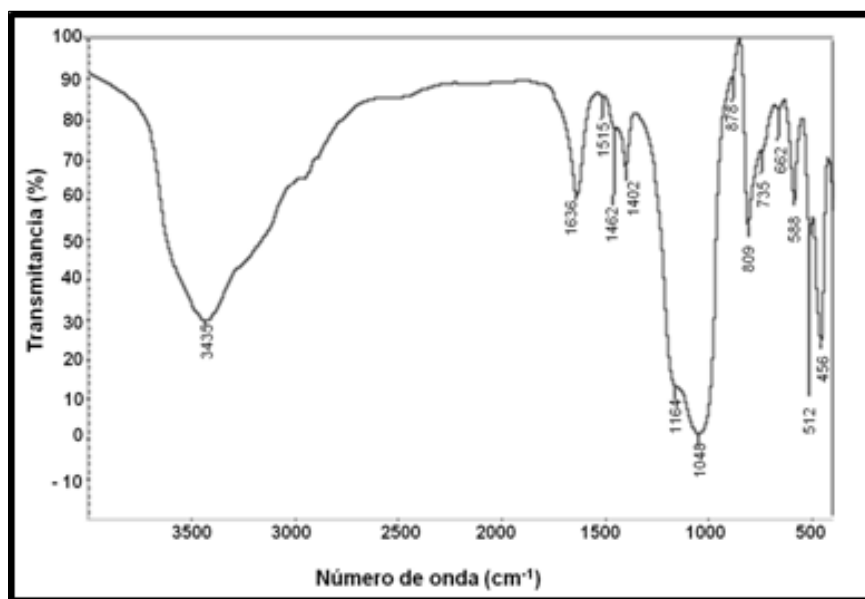


Fig. A3-6 Espectro infrarrojo de una muestra patrón de zeolita tipo Y

⁴ Espectros de Infrarrojo, colaboración de la profesora Marta Mediavilla, de la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, UCV.

Experimento 1

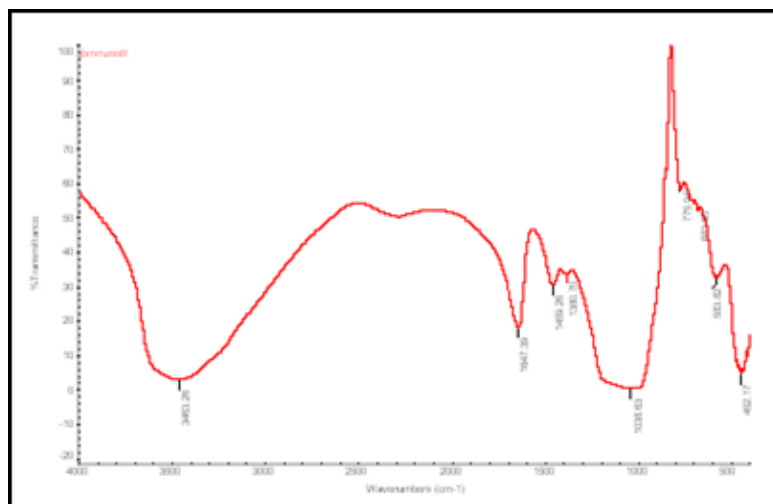


Fig. A3-7 Espectro infrarrojo de la muestra “a”

Experimento 2

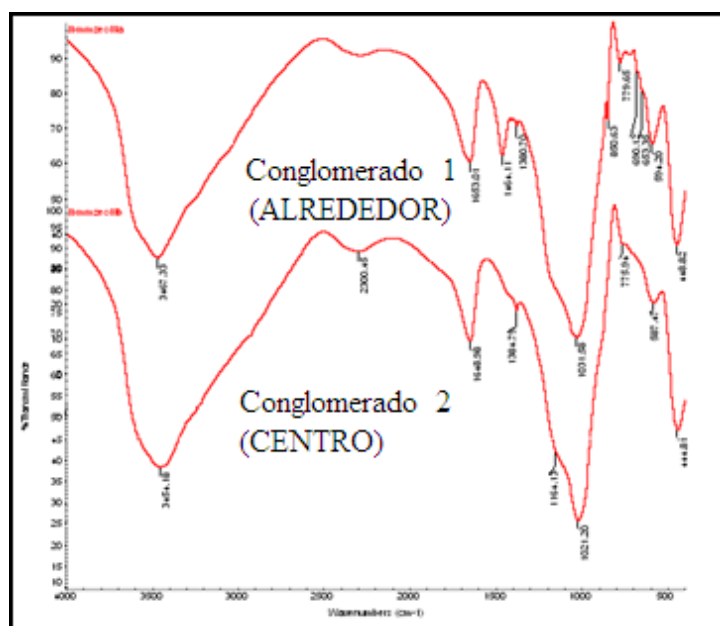


Fig. A3-8 Espectro infrarrojo de la muestra “b”

Anexo 4. Comparación entre los métodos de calentamiento convencional y por radiación microondas.

La tabla A4-1 nos presenta las diferencias entre los métodos de calentamiento convencional y radiación microondas.

Calentamiento Convencional	Calentamiento por Radiación Microondas	Beneficios
Calentamiento por conducción.	Calentamiento por movimiento inducido sobre partículas eléctricamente cargadas.	Se obtiene un calentamiento selectivo
Necesita estar en contacto con la fuente de calor	Las microondas excitan directamente las moléculas.	Calentamiento desde el interior al exterior de la muestra, lo cual lo hace más homogéneo y volumétrico.
Velocidad de calentamiento menor	Velocidad de calentamiento mayor	Tiempo de reacción menor
Consumo mayor de energía eléctrica	Consumo menor de energía eléctrica	Ahorro energético
La Temperatura máx. está limitada	Puede haber sobrecalentamiento (desventaja)	

Tabla A4- 1 Cuadro comparativo de métodos de calentamiento.

Anexo 5. Aplicaciones en diversas áreas científicas de los hornos de microondas.

- Industria.

Su mayor uso es en el secado de diferentes materiales, por ejemplo, piezas cerámicas y forraje como se observa en los artículos a los cuales se hace referencia en la figura A5-1.



Fig. A5-1 Artículos sobre el secado de materiales en el área de la industria.

- Medicina

En la industria farmacéutica, el uso de las microondas como método de calentamiento, ha tenido aplicación en procesos de secado y aceleración del proceso de polimerización en la producción de prótesis dentales y oculares. También se han realizado síntesis de elementos químicos para su uso como anticancerígenos, así como en la recuperación de antígenos en tejidos (Fig. A5-2) y síntesis de nano partículas de plata y oro para la producción de bactericidas.

Síntesis de Piridazin-3(2H)-onas asistida por Microondas en Condiciones Libre de Disolvente

Silvia Cruz, Diego Cifuentes, Nelson Hurtado y Maritza Román
Universidad de Nariño, Departamento de Química, Grupo de Investigación en Productos de Importancia Biológica (GPIB), Calle 18 Carrera 55, Campos Torobajo, San Juan de Pasto, Nariño - Colombia
(e-mail: scruz@uninar.edu.co, marquez_silvia@hotmail.com; hurtado@uninar.edu.co; nelson.hurtado@gmail.com)

Recibido Ene. 8, 2016; Aceptado Mar. 15, 2016; Versión final May. 4, 2016; Publicado Oct. 2016

Resumen

Se describe la síntesis de una serie de piridazin-3(2H)-onas y piridazin-3,5-dionas a través de la reacción entre acetofenonas p-sustituidas o dimedona con ácido glicólico e hidrato de hidroxina bajo irradiación con microondas y en condiciones libre de disolvente. Las piridazinonas son sistemas heterocíclicos biogénicos de procedencia sintética que han sido estudiados sistemáticamente debido a su prometedora actividad biológica y farmacológica. La elucidación estructural de los productos de reacción se realizó mediante análisis de RMN ¹H, ¹³C, experimentos bidimensionales de HMQC, HMBC y espectrometría de masas. La metodología propuesta produce buenos rendimientos en tiempos cortos de reacción. Esto es de especial interés desde el punto de vista ambiental.

Palabras clave: piridazinona; cinoxina; reacciones inducidas; irradiación con microondas; reacciones one-pot



Fig. A5-2 Artículos sobre síntesis de nanoestructuras en el área de la medicina.

• Electrónica

Algunos de sus aplicaciones en esta área son: la síntesis de nanotubos de carbono para el diseño de biosensores y nano partículas de óxido de níquel II (NiO) para la formación de superconductores, ver la figura A5-3.



Fig. A5-3 Artículos sobre síntesis de nanoestructuras en el área de la electrónica.

- Química

A tenido auge en la síntesis de nanopartículas de diversos compuestos, por ejemplo, fabricación de zeolita de diversos tipos, estas son usadas en procesos industriales como es la adsorción, el intercambio iónico y craqueo catalítico, ver la figura A5-4.

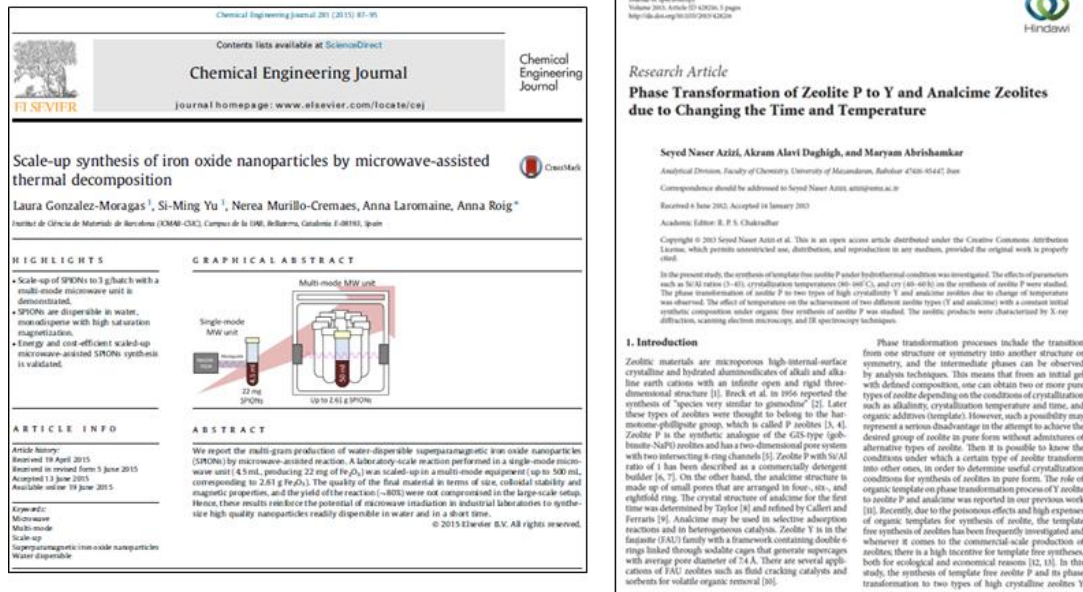


Fig. A5-4 Artículos sobre investigaciones en el área de química.

- Tecnología de Alimentos

Es muy aplicado para el control de los microorganismos patógenos y los virus, sin que los alimentos pierdan sus propiedades. Otro uso en esta área es en la deshidratación de alimentos o evaporación de solventes en la fabricación de oleorresinas de diversos orígenes, ver figura A5-5.



Fig. A5-5 Artículos sobre síntesis de nanoestructuras en el área de tecnología de alimentos.

Anexo 6. Otros principios físicos que se pueden aplicar en el diseño de sensores que utilicen fibras ópticas.

En la referencia [17] se hace mención de los siguientes principios físicos que se aplican en los diseños de sensores de fibras ópticas:

1. Red de Bragg en Fibra Óptica (FBG, Fiber Bragg Grating)

En un pequeño segmento de fibra óptica, se ha generado mediante exposición a luz ultravioleta, una perturbación o variación periódica del índice de refracción a lo largo de su núcleo. Esta perturbación refleja longitudes de onda particulares (longitud de onda de Bragg (λ_B)) perteneciente a la radiación incidente y transmite todas las demás. Esta respuesta depende de dos factores: el período de la perturbación (Λ) y el índice de refracción efectivo de la fibra (n_{eff}), cualquier cambio en alguno o ambos parámetros, modifica el espectro reflejado. Estos cambios dependen a su vez de la temperatura y la tensión, al ser sometida la fibra a estos esfuerzos se produce un fenómeno llamado birrefringencia.

Debido a la dependencia de las FBG con respecto a la temperatura y la tensión, se pueden fabricar una amplia variedad de sensores de fibra óptica. **Sensores de temperatura, tensión, presión, desplazamiento, inclinación y acelerómetros entre otros.** Salvo en el caso de los sensores de temperatura, todos los demás están basados en variar las propiedades de tensión del FBG. Este principio permite integrar más de un sensor en la misma fibra óptica, creando así **“sensores cuasi-distribuidos, puntual y distribuido de temperatura”** a precios competitivos, sin duda, una de las más sobresalientes en cuanto a los sensores de fibra óptica de temperatura se refiere, esta ofrecen las siguientes ventajas:

- Capacidad de multiplexar varios transductores para compartir un mismo equipo terminal costoso y reducir la cantidad de cableado.
- Instalación embebida, integrada, adherida sobre la superficie o soldada sobre ella.
- Codificación de longitudes de onda.
- Producción en masa a costo razonable.

- Resistentes a altas deformaciones.
- Resistentes a altas y bajas temperaturas ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), dependiendo del recubrimiento de la fibra.
- Posibilidad de lograr largas distancias entre los sensores y los dispositivos de adquisición de datos.

2. Dispersión Raman o Scattering de Raman

Al transmitir un pulso de luz por una fibra óptica, se producen diferentes dispersiones de él, debido a impurezas y defectos estructurales. Estas dispersiones se reflejan parcialmente, y una de ellas es la dispersión Raman, que es inelástica y varía en función de la temperatura. Debido a la relación entre la variación de la dispersión con la temperatura y el tiempo que ha viajado el pulso permite determinar la temperatura en un punto dado, con este principio se han creado **“sensores distribuido de temperatura”**.

3. Scattering de Rayleigh

Se han creado **sensores de temperatura o de tensión distribuidos**, conociendo el nivel de dispersión elástica de Rayleigh de la luz en la fibra, éste es el factor que permite medir temperatura y tensión. A veces se manipula el recubrimiento de la fibra óptica para aumentar su atenuación, aumentando así su nivel de back-scatter de Rayleigh. Esto se puede realizar con cubiertas que provocan a la fibra micro curvaturas o con cubiertas hidrófilas que atraen el agua, para que la fibra óptica esté más presionada y sea más sensible.

4. Scattering de Brillouin

La dispersión de Brillouin ocurre debido a vibraciones acústicas estimuladas en la fibra óptica debido a un pulso de luz. Ocurre un salto de frecuencia entre el pulso transmitido y la dispersión ocurrida, la señal generada se llama Scattering de Brillouin, que en general es de 10 GHz, haciendo que se cumpla el principio de conservación de energía. Los saltos de frecuencia son sensibles a la temperatura y a la tensión. Este principio es ideal para construir

“**sensores distribuidos de temperatura o tensión**”. Una de las ventajas principales de la aplicación del principio de Scattering de Brillouin es que permiten utilizar fibra monomodo estándar de telecomunicaciones para realizar las medidas. Esto abarata el costo e incluso permite utilizar tendidos de fibras ya existentes.

5. Interferometría Fabry-Perot

El principio de funcionamiento de los sensores que utilizan la interferometría es la medición de la diferencia de camino (que se traduce en una diferencia de fase) entre un haz transmitido y el reflejado. Como la instrumentación de sensores de fibra óptica no acostumbra a utilizar detectores coherentes, esta diferencia de fase se traduce en una variación de la intensidad. En el caso de los sensores basados en Fabry-Perot, la diferencia de camino depende de la longitud de la cavidad resonante (2 espejos paralelos altamente reflectantes) y de la reflectancia de los espejos.

Este tipo de sensores son “**sensores puntuales**” y están compuestos de un acondicionador de señal y una sonda, el primero es el que se encarga de emitir un haz de luz y analizar la señal reflejada, mientras que la sonda está compuesta por un cable de fibra óptica, adecuadamente recubierta según la aplicación, y una cavidad Fabry-Perot en el extremo. El funcionamiento de estos sensores se basa en modificar las propiedades de la cavidad Fabry-Perot (FPI), en la figura A6-1 podemos observar que la modificación de la cavidad se hace dependiente de la magnitud a medir:

- En el caso de los **sensores de temperatura** los espejos están fabricados de un material cuya reflectancia varía en función de la temperatura.
- Para los **sensores de presión** un diafragma modifica la longitud de la cavidad.
- En los **sensores de tensión** la cavidad también se modifica.

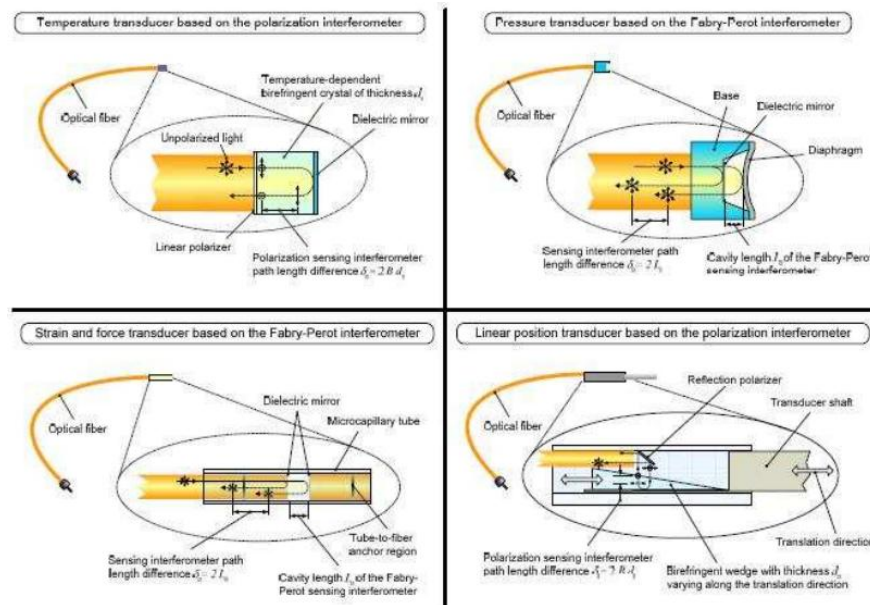


Fig. A6-1 Esquema de la relación entre cavidad y magnitud.

6. Fluorescencia óptica

Un sensor basado en fluorescencia óptica tiene una fuente emisora de luz, ya sea LED o ultravioleta. Ésta emite un haz de luz a través de una fibra óptica para iluminar la superficie fluorescente. La intensidad de la radiación emitida por fluorescencia debe ser función del parámetro que se quiere medir. Se pueden crear “**sensores puntuales de temperatura, nivel de oxígeno u otro compuesto químico**”. La superficie fluorescente se puede colocar cerca del objeto que se desea medir, lo que permitiría medidas sin contacto, o en el final de la sonda, lo que permitiría medidas con contacto de cualquier objeto. La aplicación fundamental de estos sensores es para medir la temperatura en transformadores eléctricos de alta potencia y tiene también aplicaciones médicas y bio-médicas.

7. Termometría infrarroja

Este tipo de “**sensores de temperatura**” miden sin contacto, utilizando la propiedad que tienen todos los materiales de emitir una onda electromagnética en el rango del infrarrojo, esta radiación depende de la temperatura del objeto. En general, la longitud de onda donde un cuerpo emite el máximo de radiación es inversamente proporcional a la temperatura de éste

(Ley de Wien). Para medir la **temperatura** se ilumina el objeto con una fuente blanca de espectro plano y se analiza con un transductor la radiación reflejada, obteniendo el coeficiente de emisividad y a partir de él la temperatura.

Anexo 7. Datos de las temperatura medidas en las pruebas de exactitud, precisión y funcionamiento del sistema de control de temperatura.

Las tablas que se presentan en este anexo son extraídas de la información guardados por el software diseñado en Visual Basic 6.0, en ellas se reportan lo siguientes dato de cada experimento realizado en el capítulo 4, sección 4.2: número de mediciones reportadas (N), tiempo de la medición en segundo (t), temperatura medida cada 10 segundos (T_M), dispersión y desviación calculada de 10 mediciones.

Dispersión de las Mediciones del Equipo (Capitulo 4, sección 4.1).

Caso a

U.C.V. Facultad de Ciencias

Laboratorio de Paramagnetismo y Mecanismos de Transporte.

Día: 19/07/2017

Operador: Licda. Berekyakaleb Errico

Muestra: agua

Descripción de la Muestra: 30 ml

Equipo: Microondas Samsung

Modelo: MW1050STC

Potencia: 1 -1.05 kW

Hora de inicio: 01:56:22 p.m.

Hora de culminación: 02:03:54 p.m.

DATOS EXPERIMENTALES

N	t (seg.)	T_M(°C)	Dispersión	Desviación
0	0	24,5	0	0
1	10	23,3	3,99999999999999E-02	0,7
2	20	23,7	7,105427357601E-16	0,4
3	30	23,2	-3,99999999999984E-02	1,2
4	40	24,1	1,99999999999989E-02	1
5	50	24,1	-1,4210854715202E-15	0,8
6	60	23,3	3,99999999999991E-02	1,4
7	70	23,5	2,00000000000003E-02	0,6
8	80	23,9	2,00000000000017E-02	0,8
9	90	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
10	100	24,3	-7,105427357601E-16	0,7

11	110	23,7	0,0200000000000001	1
12	120	23,7	0,0200000000000001	0,7
13	130	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
14	140	24,3	-7,105427357601E-16	0,7
15	150	24,5	0	0,6
16	160	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
17	170	24,1	-1,4210854715202E-15	0,8
18	180	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
19	190	23,3	3,99999999999999E-02	0,7
20	200	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
21	210	24,3	1,99999999999989E-02	2,1
22	220	24,1	1,99999999999989E-02	1
23	230	24,1	-1,4210854715202E-15	0,8
24	240	23,9	2,000000000000017E-02	1,2
25	250	23,9	2,000000000000017E-02	0,8
26	260	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
27	270	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
28	280	24,1	1,99999999999989E-02	1
29	290	23,7	0,0200000000000001	0,7
30	300	23,5	4,000000000000006E-02	0,9
31	310	24,1	1,99999999999989E-02	1
32	320	24,3	-7,105427357601E-16	0,4
33	330	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
34	340	23,4	-1,99999999999982E-02	1,6
35	350	23,5	4,000000000000006E-02	1,1
36	360	24,3	-7,105427357601E-16	0,7
37	370	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
38	380	23,7	0,0200000000000001	0,7
39	390	23,9	2,000000000000017E-02	0,8
40	400	24,5	-2,000000000000003E-02	1,1
41	410	24,3	-7,105427357601E-16	0,7
42	420	23,7	0,0200000000000001	0,7
43	430	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
44	440	23,9	2,000000000000017E-02	0,8
45	450	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
46	460	24,1	1,99999999999989E-02	1,3
47	470	23,5	2,000000000000003E-02	1,1
48	480	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
49	490	23,9	2,000000000000017E-02	0,8
50	500	23,9	0,0400000000000002	1,2
51	510	23,5	2,000000000000003E-02	1,2
52	520	24,3	-7,105427357601E-16	0,7
53	530	24,7	-1,99999999999996E-02	0,9

54	540	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
55	550	24,1	1,99999999999989E-02	1
56	560	24,3	-0,0200000000000001	1,1
57	570	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
58	580	23,7	7,105427357601E-16	0,4
59	590	24,1	1,99999999999989E-02	1,3
60	600	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
61	610	23,7	0,0200000000000001	0,7
62	620	25,1	-2,000000000000017E-02	1
63	630	23,1	3,99999999999991E-02	0,4
64	640	23,7	7,105427357601E-16	0,4
65	650	24,5	0	0,6
66	660	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
67	670	24,1	1,99999999999989E-02	1
68	680	24,5	0	0,6
69	690	24,9	-1,99999999999989E-02	1,3
70	700	23,7	7,105427357601E-16	0,4
71	710	22,9	4,000000000000013E-02	1,1
72	720	23,5	4,000000000000006E-02	0,9
73	730	24,3	-7,105427357601E-16	1,3
74	740	24,7	-1,99999999999996E-02	0,9
75	750	23,9	2,000000000000017E-02	1,3
76	760	24,3	-7,105427357601E-16	0,4
77	770	23,7	7,105427357601E-16	0,4
78	780	23,7	0,0200000000000001	0,7
79	790	24,3	-7,105427357601E-16	0,4
80	800	24,5	-2,000000000000003E-02	1,5
81	810	23,7	4,000000000000013E-02	1,1
82	820	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
83	830	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
84	840	24,9	1,4210854715202E-15	0,5
85	850	24,3	-7,105427357601E-16	0,7
86	860	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
87	870	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
88	880	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
89	890	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
90	900	24,3	-7,105427357601E-16	0,4

Tabla A7- 1 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso a” del agua sin control.

Caso b

U.C.V. Facultad de Ciencias

Laboratorio de Paramagnetismo y Mecanismos de Transporte.

Día: 21/07/2017

Operador: Licda. Berekykaleb Errico

Muestra: agua

Descripción de la Muestra: 30 ml

Equipo: Microondas Samsung

Modelo: MW1050STC

Potencia: 1 -1.05 KW

Hora de inicio: 09:54:46 a.m.

Hora de culminación: 10:10:55 a.m.

DATOS EXPERIMENTALES

N	t(seg.)	T _M (°C)	Dispersión	Desviación
0	0	24,5	0	0
1	10	24,3	-7,105427357601E-16	0,4
2	20	23,7	0,0200000000000001	0,7
3	30	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
4	40	23,3	1,99999999999996E-02	0,4
5	50	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
6	60	23,3	1,99999999999996E-02	0,4
7	70	24,3	-7,105427357601E-16	0,7
8	80	23,7	0,0200000000000001	0,7
9	90	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
10	100	24,1	-1,4210854715202E-15	0,8
11	110	23,9	2,00000000000017E-02	0,8
12	120	23,7	7,105427357601E-16	0,4
13	130	23,5	0	0
14	140	23,9	1,4210854715202E-15	0,8
15	150	23,9	1,4210854715202E-15	0,8
16	160	23,7	0,0200000000000001	0,7
17	170	24,5	0	1,2
18	180	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
19	190	23,9	2,00000000000017E-02	0,8
20	200	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
21	210	23,9	2,00000000000017E-02	1
22	220	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
23	230	23,3	1,99999999999996E-02	0,4
24	240	23,7	4,00000000000013E-02	0,9
25	250	24,1	1,99999999999989E-02	0,8

26	260	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
27	270	24,9	1,4210854715202E-15	0,8
28	280	23,7	7,105427357601E-16	0,4
29	290	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
30	300	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
31	310	23,7	4,00000000000013E-02	0,9
32	320	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
33	330	23,5	0	0
34	340	23,7	0,020000000000001	1
35	350	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
36	360	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
37	370	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
38	380	23,3	1,99999999999996E-02	0,9
39	390	24,1	-1,4210854715202E-15	0,8
40	400	23,3	1,99999999999996E-02	0,4
41	410	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
42	420	23,7	0,020000000000001	0,7
43	430	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
44	440	24,5	0	0,6
45	450	24,3	-7,105427357601E-16	0,4
46	460	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
47	470	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
48	480	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
49	490	23,7	7,105427357601E-16	0,4
50	500	24,1	1,99999999999989E-02	1
51	510	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
52	520	23,7	7,105427357601E-16	0,4
53	530	23,3	1,99999999999996E-02	0,4
54	540	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
55	550	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
56	560	23,7	7,105427357601E-16	0,4
57	570	23,7	7,105427357601E-16	0,4
58	580	23,7	7,105427357601E-16	0,4
59	590	23,7	7,105427357601E-16	0,4
60	600	24,3	-7,105427357601E-16	0,7
61	610	23,3	1,99999999999996E-02	0,4
62	620	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
63	630	23,3	1,99999999999996E-02	0,9
64	640	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
65	650	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
66	660	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
67	670	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
68	680	23,5	2,000000000000003E-02	0,6

69	690	24,1	1,99999999999989E-02	1
70	700	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
71	710	23,7	0,0200000000000001	0,7
72	720	23,7	0,0200000000000001	0,7
73	730	23,7	7,105427357601E-16	0,4
74	740	24,1	-1,4210854715202E-15	0,5
75	750	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
76	760	23,7	7,105427357601E-16	0,4
77	770	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
78	780	23,5	0	0
79	790	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
80	800	23,7	7,105427357601E-16	0,4
81	810	23	-3,99999999999991E-02	0,4
82	820	23,9	1,4210854715202E-15	0,5
83	830	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
84	840	23,5	0	0
85	850	23,7	7,105427357601E-16	0,4
86	860	23,9	1,4210854715202E-15	0,8
87	870	23,5	2,000000000000003E-02	0,6
88	880	23,7	7,105427357601E-16	0,4
89	890	24,1	-1,4210854715202E-15	0,8
90	900	23,5	2,000000000000003E-02	0,6

Tabla A7- 2 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso b” del agua sin control.

Funcionamiento del Sistema de Control de Temperatura en el Proceso de Evaporación (Capítulo 4, Sección 4.2).

Muestra 1. Uso del control de temperatura utilizando agua como muestra.

Caso a. Reactor con Tapa Sobre Puesta.

Experimento 1.

U.C.V. Facultad de Ciencias

Laboratorio de Paramagnetismo y Mecanismos de Transporte.

Día: 18/07/2017

Operador: Licda. Berekyalakeb Errico

Muestra: agua

Descripción de la Muestra: 30 ml

Equipo: Microondas Samsung

Modelo: MW1050STC

Potencia: 1 -1.05 KW

Hora de inicio: 03:32:05 p.m.

Hora de culminación: 03:47:08 p.m.

DATOS TEÓRICO

T(°C)	t(minutos)
50	0
50	15

DATOS EXPERIMENTALES

N	t(seg.)	T _M (°C)	Dispersión	Desviación
0	0	26,6	0	0
1	10	27,5	0	0,3
2	20	30,8	0	0,2
3	30	35,9	0	0
4	40	42	0	0,2
5	50	46,2	0	0
6	60	48,6	-5,000000000000007E-02	0,2
7	70	49,9	0	0
8	80	50,9	0	0
9	90	50,4	0	0,5
10	100	49,9	0	0
11	110	50,9	0	0
12	120	49,9	0	0

13	130	50,4	0	0,2
14	140	50,4	0	0,2
15	150	49,9	0	0
16	160	48,6	-5,00000000000007E-02	0,2
17	170	49	0	0
18	180	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
19	190	49	0	0
20	200	50,4	0	0,2
21	210	49,9	0	0
22	220	50,4	0	0,5
23	230	49	0	0
24	240	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
25	250	48,6	-5,00000000000007E-02	0,2
26	260	49	0	0,3
27	270	50,4	0	0,2
28	280	50,4	0	0,2
29	290	50,9	0	0
30	300	50,4	0	0,2
31	310	49,9	0	0
32	320	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
33	330	49	0	0
34	340	50,9	0	0
35	350	50,9	0	0
36	360	48,1	-5,00000000000007E-02	0,3
37	370	49,9	0	0
38	380	49	0	0,3
39	390	50,9	0	0
40	400	50,4	0	0,2
41	410	50,4	0	0,2
42	420	50,4	0	0,5
43	430	49,9	0	0
44	440	50,9	-5,00000000000007E-02	0,3
45	450	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
46	460	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
47	470	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
48	500	50,4	0	0,2
49	510	50	-5,00000000000007E-02	0,3
50	520	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
51	530	50,4	0	0,2
52	540	50,9	0	0
53	550	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
54	560	49,9	0	0
55	570	49,5	0	0,5

56	580	50,4	0	0,2
57	590	49,5	0	0,5
58	600	50,4	0	0,2
59	610	50,9	0	0
60	620	49,9	0	0
61	630	50,4	0	0,2
62	640	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
63	650	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
64	660	50,9	0	0
65	670	50,9	0	0
66	680	49,9	0	0
67	690	50,4	0	0,2
68	700	49	0	0
69	710	49,9	0	0
70	720	50	-5,00000000000007E-02	0,3
71	730	49,9	0	0
72	740	49,9	0	0
73	750	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
74	760	47,6	0	0,2
75	770	49,9	0	0
76	780	50,9	0	0
77	790	49,9	0	0
78	800	50,9	0	0
79	810	50	-5,00000000000007E-02	0,3
80	820	50,4	0	0,2
81	830	49,9	0	0
82	840	50	-5,00000000000007E-02	0,3
83	850	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
84	860	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
85	870	50,4	0	0,2
86	880	50,9	0	0
87	890	49,9	0	0
88	900	49,9	0	0
89	910	50	-5,00000000000007E-02	0,3
90	920	49,9	0	0

Tabla A7- 3 Datos tomados por el sistema de control de temperatura del control con agua con la tapa del reactor sobre puesta.

Caso b. Reactor con la tapa sobre puesta.

Experimento 1.

U.C.V. Facultad de Ciencias

Laboratorio de Paramagnetismo y Mecanismos de Transporte.

Día: 21/07/2017

Operador: Licda. Berekyakaleb Errico

Muestra: agua

Descripción de la Muestra: 30ml

Equipo: Microondas Samsung

Modelo: MW1050STC

Potencia: 1 -1.05 KW

Hora de inicio: 10:22:36 a.m.

Hora de culminación: 10:37:45 a.m.

DATOS TEÓRICOS

T(°C)	t(minutos)
50	0
50	15

DATOS EXPERIMENTALES

N	seg.	T_M(°C)	Dispersión	Desviación
0	0	24,5	0	0
1	10	24,7	-3,999999999999999E-02	0,7
2	20	27,7	0,0200000000000001	1,9
3	30	32,2	-2,000000000000017E-02	1,8
4	40	37,7	3,99999999999963E-02	1,1
5	50	42	-4,000000000000006E-02	1,3
6	60	46,8	-3,99999999999963E-02	1,4
7	70	48,7	-2,8421709430404E-15	0,7
8	80	51	-1,4210854715202E-15	0,5
9	90	52,5	1,99999999999974E-02	0,7
10	100	51,4	-2,000000000000003E-02	0,6
11	110	51,2	-2,000000000000045E-02	0,7
12	120	50,6	3,99999999999977E-02	0,9
13	130	50,4	0	0
14	140	49,8	0,0400000000000002	0,8
15	150	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
16	160	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
17	170	50	3,99999999999991E-02	1,3
18	180	49,3	-1,99999999999974E-02	0,7
19	190	48,9	-1,99999999999989E-02	1

20	200	48,9	1,4210854715202E-15	0,5
21	210	49,5	0	0
22	220	49,7	-2,00000000000031E-02	0,9
23	230	50,4	2,00000000000003E-02	1,1
24	240	51	-2,00000000000017E-02	0,8
25	250	50,4	2,00000000000003E-02	0,6
26	260	50,2	0,019999999999996	0,4
27	270	49,8	0,040000000000002	0,8
28	280	49,8	0,040000000000002	0,8
29	290	49,9	-1,99999999999989E-02	0,8
30	300	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
31	310	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
32	320	49,5	-2,00000000000003E-02	0,6
33	330	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
34	340	49,9	-1,99999999999989E-02	0,8
35	350	49,9	-3,9999999999991E-02	0,4
36	360	49,8	0,040000000000002	0,8
37	370	49,8	0,040000000000002	0,8
38	380	50	3,9999999999991E-02	0,4
39	390	49,9	-1,99999999999989E-02	0,8
40	400	49,7	-4,00000000000034E-02	0,7
41	410	49,7	-4,00000000000034E-02	0,7
42	420	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
43	430	49,3	-1,99999999999974E-02	0,7
44	440	50,4	2,00000000000003E-02	0,6
45	450	50	3,9999999999991E-02	0,4
46	460	50,4	0	0
47	470	50,1	-0,040000000000002	0,8
48	480	50	3,9999999999991E-02	0,4
49	490	49,5	-4,00000000000006E-02	1,1
50	500	49,3	-1,99999999999974E-02	0,7
51	510	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
52	520	49,1	-2,00000000000017E-02	0,8
53	530	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
54	540	50,6	-2,8421709430404E-15	0,4
55	550	49,9	-3,9999999999991E-02	0,4
56	560	50	3,9999999999991E-02	1
57	570	49,9	-1,99999999999989E-02	0,8
58	580	49,5	-2,00000000000003E-02	0,6
59	590	49,1	-2,00000000000017E-02	1
60	600	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
61	610	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
62	620	50,4	2,00000000000003E-02	0,6

63	630	50,8	2,000000000000017E-02	0,8
64	640	50,2	3,99999999999963E-02	0,7
65	650	50,4	0	0
66	660	50,2	0,019999999999996	0,4
67	670	50,1	-0,040000000000002	1,1
68	680	49,5	-2,00000000000003E-02	1,1
69	690	50,4	0	0
70	700	49,1	-2,000000000000017E-02	0,8
71	710	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
72	720	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
73	730	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
74	740	49,8	0,040000000000002	0,8
75	750	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
76	760	50	3,99999999999991E-02	0,4
77	770	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
78	780	49,5	-4,00000000000006E-02	1,1
79	790	49,7	-4,000000000000034E-02	0,7
80	800	49,5	-4,00000000000006E-02	1,4
81	810	50	3,99999999999991E-02	1
82	820	49,9	-3,99999999999991E-02	1
83	830	50,2	0,019999999999996	0,4
84	840	49,5	-2,00000000000003E-02	0,6
85	850	50	3,99999999999991E-02	1
86	860	49,7	-4,000000000000034E-02	0,7
87	870	49,5	-2,00000000000003E-02	0,6
88	880	50,8	1,4210854715202E-15	0,5
89	890	49,8	0,040000000000002	1,6
90	900	49,1	-2,000000000000017E-02	1

Tabla A7- 4 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso a” control con agua con la tapa del reactor cerrada.

Experimento 2

U.C.V. Facultad de Ciencias

Laboratorio de Paramagnetismo y Mecanismos de Transporte.

Día: 18/07/2017

Operador: Licda. Berekyakaleb Errico

Muestra: agua

Descripción de la Muestra: 30 ml

Equipo: Microondas Samsung

Modelo: MW1050STC

Potencia: 1 -1.05 KW

Hora de inicio: 05:48:21 p.m.

Hora de culminación: 06:08:25 p.m.

DATOS TEÓRICOS

T(°C)	t(minutos)
27	0
50	10
50	20

DATOS EXPERIMENTALES

N	t(seg.)	T _M (°C)	Dispersión	Desviación
0	0	21,9	0	0
1	10	22,4	-4,99999999999989E-02	0,2
2	20	23,3	-1,77635683940025E-15	0,5
3	30	26,6	0	0
4	40	27,5	0	0,3
5	50	28,9	0	0,2
6	60	30,3	0	0
7	70	30,4	-4,99999999999989E-02	0,3
8	80	29,4	0	0
9	90	30,4	-4,99999999999989E-02	0,3
10	100	28,9	0	0,2
11	110	30,3	0	0
12	120	31,8	-4,99999999999989E-02	0,2
13	130	30,8	0	0,2
14	140	30,8	0	0,2
15	150	32,7	-5,00000000000007E-02	0,2
16	160	32,7	-5,00000000000007E-02	0,2
17	170	32,2	0	0
18	180	33,6	0	0,2
19	190	33,6	0	0,2
20	200	36	-5,00000000000007E-02	0,3
21	210	35,9	0	0

22	220	35,5	-5,000000000000007E-02	0,2
23	230	35	0	0
24	240	35,5	-5,000000000000007E-02	0,2
25	250	35,9	0	0
26	260	36,9	-5,000000000000007E-02	0,3
27	270	36,9	0	0
28	280	37,8	3,5527136788005E-15	0,3
29	290	37,8	0	0
30	300	37,8	0	0
31	310	37,8	3,5527136788005E-15	0,3
32	320	39,2	0	0,2
33	330	39,7	0	0
34	340	40,2	-5,000000000000007E-02	0,2
35	350	39,7	0	0
36	360	39,2	0	0,2
37	370	39,2	0	0,2
38	380	40,6	0	0
39	390	41,5	0	0
40	400	42	0	0,2
41	410	43	-5,000000000000007E-02	0,2
42	420	43,9	-5,000000000000007E-02	0,2
43	430	43,4	0	0
44	440	42,5	-5,000000000000007E-02	0,3
45	450	42,5	0	0
46	460	43	-5,000000000000007E-02	0,2
47	470	44,8	0	0,2
48	480	45,3	0	0
49	490	44,3	0	0
50	500	44,8	0	0,2
51	510	45,3	0	0
52	520	45,8	-4,99999999999972E-02	0,2
53	530	47,1	0	0
54	540	46,7	-5,000000000000007E-02	0,2
55	550	47,1	0	0
56	560	49	0	0,3
57	570	47,6	0	0,2
58	580	46,7	-3,5527136788005E-15	0,5
59	590	48,6	-5,000000000000007E-02	0,2
60	600	48,6	-5,000000000000007E-02	0,2
61	610	51,3	3,5527136788005E-15	0,5
62	620	50,4	0	0,2
63	630	49,9	0	0
64	640	50,4	0	0,2

65	650	49	0	0,3
66	660	49,5	0	0,5
67	670	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
68	680	50	-5,00000000000007E-02	0,3
69	690	51,4	-5,00000000000007E-02	0,2
70	700	50,4	0	0,5
71	710	48,1	0	0
72	720	50	-5,00000000000007E-02	0,3
73	730	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
74	740	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
75	750	49,5	0	0,5
76	760	50	-5,00000000000007E-02	0,3
77	770	49,9	0	0
78	780	49,9	0	0
79	790	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
80	800	50,9	-5,00000000000007E-02	0,3
81	810	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
82	820	50	-5,00000000000007E-02	0,3
83	830	49,9	0	0
84	840	49,9	0	0
85	850	49,9	0	0
86	860	49,9	0	0
87	870	48,6	-5,00000000000007E-02	0,2
88	880	47,6	0	0,5
89	890	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
90	900	50	-5,00000000000007E-02	0,3
91	910	50	-5,00000000000007E-02	0,3
92	920	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
93	930	49	0	0
94	940	51,8	3,5527136788005E-15	0,3
95	950	51,4	-5,00000000000007E-02	0,2
96	960	50,4	0	0,2
97	970	50,4	0	0,2
98	980	49,9	0	0
99	990	49	0	0,3
100	1000	49,5	-5,00000000000007E-02	0,2
101	1010	51,4	-5,00000000000007E-02	0,2
102	1020	50,9	0	0
103	1030	50,4	0	0,2
104	1040	50,4	0	0,2
105	1050	50,4	0	0,2
106	1060	50	-5,00000000000007E-02	0,3
107	1070	48,6	-5,00000000000007E-02	0,2

108	1080	49	0	0,3
109	1090	50,4	0	0,2
110	1100	49,9	0	0
111	1110	50	-5,000000000000007E-02	0,3
112	1120	49,9	0	0
113	1130	48,5	0	0,5
114	1140	49,5	-5,000000000000007E-02	0,2
115	1150	50,4	0	0,2
116	1160	50,4	0	0,2
117	1170	49,9	0	0
118	1180	49,5	-5,000000000000007E-02	0,2
119	1190	49,5	-5,000000000000007E-02	0,2
120	1200	50,4	0	0,2

Tabla A7- 5 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso b” control con agua con la tapa del reactor cerrada.

Muestra 2. Uso del control de temperatura en la evaporación de etanol, en la producción de oleorresina de ajo.

Experimento 1.

U.C.V. Facultad de Ciencias

Laboratorio de Paramagnetismo y Mecanismos de Transporte.

Día: 21/07/2017

Operador: Licda. Berekyakaleb Errico

Muestra: Muestra 2

Descripción de la Muestra: Ajo macerado con etanol (15 g.)

Equipo: Microondas Samsung

Modelo: MW1050STC

Potencia: 1 -1.05 KW

Hora de inicio: 12:11:16 p.m.

Hora de culminación: 12:24:25 p.m.

DATOS TEÓRICOS

T (°C)	t(min.)
32	0
50	3
50	13

DATOS EXPERIMENTALES

N	t(seg.)	T_M(°C)	Dispersión	Desviación
0	0	30,2	0	0
1	10	30,6	-2,1316282072803E-15	0,5
2	20	30,4	7,105427357601E-16	0,4
3	30	30,4	7,105427357601E-16	0,4
4	40	31,2	0	0
5	50	31,6	-7,105427357601E-16	0,5
6	60	33,3	4,2632564145606E-15	0,4
7	70	36	0	0,9
8	80	39,3	-3,99999999999991E-02	1
9	90	42,5	4,00000000000006E-02	1,1
10	100	46	1,4210854715202E-15	1
11	110	48,5	0	0,6
12	120	50	3,99999999999991E-02	0,4
13	130	50,4	0	0
14	140	51,4	0	0
15	150	51,2	-4,2632564145606E-15	0,4
16	160	51	-2,00000000000017E-02	0,8

17	170	50,8	1,4210854715202E-15	0,5
18	180	50,4	0	0
19	190	50,2	0,0199999999999996	0,4
20	210	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
21	210	49,5	0	0
22	220	49,5	0	0
23	230	48,7	-2,8421709430404E-15	0,4
24	240	48,7	-2,8421709430404E-15	0,4
25	250	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
26	260	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
27	270	49,5	0	0
28	280	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
29	290	50,2	0,0199999999999996	0,4
30	300	50,4	0	0
31	310	50,4	0	0
32	320	50,6	-2,8421709430404E-15	0,4
33	330	50,4	0	0
34	340	50,4	0	0
35	350	50,4	0	0
36	360	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
37	370	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
38	380	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
39	390	49,5	0	0
40	400	49,5	0	0
41	410	49,5	0	0
42	420	49,5	0	0
43	430	49,5	0	0
44	440	50,2	0,0199999999999996	0,4
45	450	50,4	2,000000000000003E-02	0,6
46	460	50,4	0	0
47	470	50,4	0	0
48	480	50,4	0	0
49	490	50,4	0	0
50	500	50	3,99999999999991E-02	0,4
51	510	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
52	520	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
53	530	49,5	0	0
54	540	49,5	0	0
55	550	49,5	0	0
56	560	49,3	2,8421709430404E-15	0,4
57	570	49,5	-2,000000000000003E-02	0,6
58	580	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
59	590	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4

60	600	50,4	0	0
61	610	50,4	0	0
62	620	50,4	0	0
63	630	50,4	0	0
64	640	50,2	0,0199999999999996	0,4
65	650	50,2	0,0199999999999996	0,4
66	660	50	3,999999999999991E-02	0,4
67	670	49,9	-3,999999999999991E-02	0,4
68	680	49,5	0	0
69	690	49,5	0	0
70	700	49,3	2,8421709430404E-15	0,4
71	710	49,5	0	0
72	720	48,9	1,4210854715202E-15	0,5
73	730	48,9	1,4210854715202E-15	0,5
74	740	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
75	750	50	3,999999999999991E-02	0,4
76	760	50,2	0,0199999999999996	0,4
77	770	50,8	1,4210854715202E-15	0,5
78	780	51,2	-4,2632564145606E-15	0,4

Tabla A7- 6 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso a” control con ajo en etanol

Experimento 2.

U.C.V. Facultad de Ciencias

Laboratorio de Paramagnetismo y Mecanismos de Transporte.

Día: 21/07/2017

Operador: Licda. Berekyakaleb Errico

Muestra: Muestra 4

Descripción de la Muestra: Ajo macerado con etanol (14,2 g.)

Equipo: Microondas Samsung

Modelo: MW1050STC

Potencia: 1 -1.05 KW

Hora de inicio: 01:16:11 p.m.

Hora de culminación: 01:34:20 p.m.

DATOS TEÓRICOS

T(°C)	t(min)
33	0
50	3
50	17

DATOS EXPERIMENTALES

N	t(seg.)	T _M (°C)	Dispersión	Desviación
0	0	34,1	0	0
1	10	34,1	0	0
2	20	34,1	0	0
3	30	34,5	-3,999999999999991E-02	0,4
4	40	34,3	-0,0199999999999996	0,4
5	50	34,5	-3,999999999999991E-02	0,4
6	60	34,8	2,000000000000031E-02	0,4
7	70	35,4	1,4210854715202E-15	0,5
8	80	36,6	-1,4210854715202E-15	0,5
9	90	37,7	3,999999999999963E-02	0,7
10	100	39,6	3,999999999999963E-02	0,7
11	110	42,2	-4,000000000000034E-02	1
12	120	45	0,0400000000000002	0,8
13	130	48,1	-1,4210854715202E-15	0,8
14	140	49,8	0,0400000000000002	0,8
15	150	51,4	0	0
16	160	52,3	0	0
17	170	52,7	-5,6843418860808E-15	0,5
18	180	52,3	0	0
19	190	52,9	-1,4210854715202E-15	0,5

20	200	52,3	0	0
21	210	52,3	0	0
22	220	52,1	0,0199999999999996	0,4
23	230	51,4	0	0
24	240	51,6	-2,000000000000031E-02	0,4
25	250	51,4	0	0
26	260	51	-1,4210854715202E-15	0,5
27	270	50,8	1,4210854715202E-15	0,5
28	280	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
29	290	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
30	300	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
31	310	49,5	0	0
32	320	49,5	0	0
33	330	49,3	2,8421709430404E-15	0,4
34	340	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
35	350	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
36	360	49,1	-1,4210854715202E-15	0,5
37	370	49,5	0	0
38	380	49,5	0	0
39	390	49,3	2,8421709430404E-15	0,4
40	400	49,5	0	0
41	410	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
42	420	49,5	0	0
43	430	49,5	0	0
44	440	49,5	0	0
45	450	49,5	0	0
46	460	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
47	470	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
48	480	50	3,99999999999991E-02	0,4
49	490	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
50	500	50	3,99999999999991E-02	0,4
51	510	50,2	0,0199999999999996	0,4
52	520	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
53	530	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
54	540	49,5	0	0
55	550	49,5	0	0
56	560	49,5	0	0
57	570	49,3	2,8421709430404E-15	0,4
58	580	49,7	-2,000000000000031E-02	0,4
59	590	49,5	0	0
60	600	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
61	610	49,5	0	0
62	620	50,2	0,0199999999999996	0,4

63	630	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
64	640	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
65	650	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
66	660	50,4	0	0
67	670	49,5	0	0
68	680	49,5	0	0
69	690	49,5	0	0
70	700	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
71	710	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
72	720	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
73	730	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
74	740	49,5	0	0
75	750	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
76	760	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
77	770	50,2	0,019999999999996	0,4
78	780	50	3,99999999999991E-02	0,4
79	790	50	3,99999999999991E-02	0,4
80	800	50,2	0,019999999999996	0,4
81	810	50,2	0,019999999999996	0,4
82	820	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
83	830	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
84	840	49,5	0	0
85	850	49,5	0	0
86	860	49,5	0	0
87	870	49,5	0	0
88	880	49,5	0	0
89	890	49,5	0	0
90	900	49,5	0	0
91	910	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
92	920	49,7	-2,00000000000031E-02	0,4
93	930	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
94	940	49,9	-3,99999999999991E-02	0,4
95	950	50	3,99999999999991E-02	0,4
96	960	50,4	0	0
97	970	50,4	0	0
98	980	50,2	0,019999999999996	0,4
99	990	50,4	0	0
100	1000	50,4	0	0
101	1010	50,2	0,019999999999996	0,4
102	1020	49,5	0	0

Tabla A7- 7 Datos tomados por el sistema de control de temperatura “caso b” control con ajo en etanol.

Bibliografía

1. Industries, L. R. (s.f.). Recuperado el 15 de Julio de 2017, de <http://www.laddresearch.com/microwave-oven-lbp125>
2. Chemists, M. H. (s.f.). Recuperado el 15 de Julio de 2017, de <http://www.milestonesrl.com/>
3. *Curso de Postgrado de Control Automático de Procesos*. (s.f.). Recuperado el 28 de Marzo de 2017, de http://www.iim.unsj.edu.ar/control/curso/B1_gral/concp_basicos_1.htm
4. Kuo, B. (1996). *Sistemas de control Automáticos*. México: 7ma edición
5. *Sistema Automático de control*. Recuperado el 28 de Febrero de 2017, de http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~23005153/d_tecnologia/bajables/2%20bachillerato/SISTEMAS%20AUTOMATICOS%20DE%20CONTROL.pdf.
6. Moncada, L. (02 de 06 de 2012). *Controles de Procesos; Capítulo 1: Conceptos y Definiciones Básicas*. Recuperado el 14 de Febrero de 2017, de http://plantscontrol.blogspot.com/2012/02/capitulo-1-conceptos-y-definiciones_06.html
7. Ogata, K. (2006). *Ingniería de Control Moderna*. Madrid: 4ta edición.
8. Errico, B. (2011). *Automatización de un Sistema de Control de Temperatura para Hornos de Microondas*. Caracas-Venezuela: Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias,U.C.V.
9. *El Horno de Microondas;Su funcionamiento, fallas, pruebas y reparación - Parte 1*. (s.f.). Recuperado el 28 de Marzo de 2015, de <http://www.comunidadelectronicos.com/articulos/microondas-1.htm>
10. Parra, L. (1995). *Reparaciones de Hornos de Microondas; Serie Teeoría y Servicio Electronico*.
11. Pozar, D. (2007). *Microwave Engineerin*. New York.
12. Arias-Carbajal, A. (21 de 02 de 2005). *Síntesis Inorgánica*. Recuperado el 25 de Mayo de 2015, de http://www.fq.uh.cu/postgrado/cursos/sintesis_inor/conf_9.htm

13. Martínez, H. (11 de 2013). *Fibra Óptica*. Recuperado el 06 de Junio de 2015, de <http://www.monografias.com/trabajos99/principios-fibra-optica/principios-fibra-optica.shtml>
14. *Fibra de Óptica: Uso, Ventajas y Desventajas*. (s.f.). Recuperado el 09 de Junio de 2015, de <http://teleprocesamiento-unesr-sancarlos.blogspot.com/2011/02/fibra-de-optica-uso-ventajas-y.html>
15. Rodríguez, A. *Fibra Óptica, qué es y cómo funciona*. Recuperado el 18 de Junio de 2015, de <http://www.fibraopticahoy.com/fibra-optica-que-es-y-como-funciona/>
16. Urieta, D. D. (02 de Junio de 2015). *Tipos de Fibra Óptica*. Recuperado el 18 de Junio de 2015, de <http://www.tipos.co/tipos-de-fibra-optica/#ixzz3cVTUwhI3>
17. González, A. V., & Pertusa, D. B. (2011). *SENSORES DE FIBRA ÓPTICA: Fundamentos de medida y análisis de la oferta comercial*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2016, de <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/3871/577502.pdf?...1>
18. Neoptix. (20 de Abril de 2015). *T1 Fiber Optic Temperature Probe*. Recuperado el 28 de Marzo de 2015, de <http://www.neoptix.com/t1-sensor.asp>
19. QUALITROL *T Guard Link (RevB) Optical hot spot module*. Recuperado el 28 de Marzo de 2015, de <http://www.qualitrolcorp.com/Products/>
20. *Manual de Programación de Arduino*. (s.f.). Recuperado el 10 de Mayo de 2015, de http://dfists.ua.es/~jpomares/Arduino/page_02.htm
21. Arduino. (2015). *Arduino UNO & Genuino UNO*. Recuperado el 08 de Abril de 2017, de <https://www.Arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
22. *Señales Analógicas de Salida en Arduino (PWM)*. Recuperado el 08 de Abril de 2017, de <http://playground.Arduino.cc/ArduinoNotebookTraduccion/Appendix3>
23. Rashid, M. H. (1995). *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. (2 da ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Seyed Naser.
24. Capítulo 1. *Introducción a los Sistema Eléctricos de Potencia*. Recuperado el 20 de Marzo de 2017, de http://www.fglongatt.org/Archivos/Archivos/SP_I/PPT-IntroSP.pdf.

25. Capítulo 1. *Sistemas Electrónicos de Potencia*. Recuperado el 28 de Marzo de 2017, de <http://elec.itmorelia.edu.mx/02%20CAP01.pdf>.
26. Yuncosa, R. (2008). *Síntesis y Caracterización de Zeolita Y Mediante Calentamiento por Micoondas*. Trabajo Especial de Grado: Facultad de Ingeniería U.C.V, Caracas-Venezuela.