

PROTOTIPO PARA EL CALENTAMIENTO DE UN FLUIDO MEDIANTE MICROONDAS EN FLUJO LAMINAR O TURBULENTO

Jeset de Jesús Imbrecht Tafur



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018

**PROTOTIPO PARA EL CALENTAMIENTO DE UN FLUIDO MEDIANTE
MICROONDAS EN FLUJO LAMINAR O TURBULENTO**

Jeset de Jesús Imbrecht Tafur

*Trabajo de investigación presentado como requisito para
optar por el título de Ingeniero Electrónico*

Director:
David Eugenio Forero
M.Sc en Ciencias de la Información y las Comunicaciones

Co-Director:
Rodrigo Correa C.
Ph.D. en Ciencias e Ingeniería de Polímeros

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018

Agradecimientos

Primero que todo quiero darle gracias a Dios, por permitirme terminar esta hermosa carrera, a mi amada madre Mirllan Elid Tafur, que desde mi nacimiento solo recibo de ella, amor y apoyo incondicional sin ella todo esto no hubiese sido posible, a mis hermanos y demás familiares. Quiero agradecerles también a mis amigos Thomas Medina, Miguel Torres, Luis Rada, Jorge Barrios los cuales fueron una buena compañía en esta etapa universitaria, a mi hermosa novia Leydi Arenas, por ser un apoyo en todo lo que hago.

Gracias a mis profesores los cuales me dieron un soporte y estabilidad en la vida académica, en especial a mi director de trabajo de grado David Forero, mi co-directo Rodrigo Correa, Franklim Sepulveda, Jaime Barrero, Carlos Fajardo, Julian Rodriguez, Raul Vila, William Salamanca, William Rasvan Castro.

Muchas gracias a la escuela de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) y a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por encaminarme a ser un buen profesional y brindarme todas las bases necesarias para completar este trabajo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1 APLICACIONES DE LAS MICROONDAS EN LA INGENIERÍA	14
1.1 Radar	14
1.2 Separado de Emulsiones	15
2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	16
2.1 Magnetron	17
2.2 Párametro de Diseño de la Guía de Onda	18
2.2.1 Cálculo de las Dimensiones de la Guía de Onda.	19
2.3 Componentes Adicionales del Modelo Funcional	21
2.3.1 Componentes Electrónicos.	22
3 ETAPAS DE DESARROLLO	25
3.1 Diseño Mecánico y Selección	25
3.2 Fabricación	25
3.3 Montaje y Construcción	25
3.4 Etapa Experimental	26
4 CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES	27
5 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
6 CONCLUSIONES	47
REFERENCIAS	49
BIBLIOGRAPHY	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Relacion entre la viscosidad y temperatura en petróleos.	12
Figura 2	Este esquema muestra el diseño y partes del modelo funcional. . .	16
Figura 3	Esquema de un magnetrón y sus partes.	17
Figura 4	Flujo de electrones que se genera dentro del magnetrón.	18
Figura 5	Sección longitudinal de la guía de onda con sus respectivas medidas.	20
Figura 6	Foto del sensor de referencia GY-906 mlx90614, usado para la medición de temperatura de las muestras dentro de la guía de onda. . . .	23
Figura 7	Foto de multiplexor I2c de referencia TCA9548A, usado para la comunicación simultánea de los sensores.	23
Figura 8	Diagrama de bloques de conexión entre la sensórica con el AR- DUINO UNO.	23
Figura 9	Botón de Encendido digital, usando el software LabVIEW.	24
Figura 10	Matriz EDT. Estructura de descomposición del trabajo para el pre- sente proyecto..	26
Figura 11	Vista translúcida del sistema de refrigeración.	28
Figura 12	Foto guia de onda en PVC con aluminio.	28
Figura 13	Foto guia de onda en aluminio.	29
Figura 14	Foto de serpentín de vidrio.	29
Figura 15	Imagen térmica del fluido a 40 segundos, en tubo PVC con lamina de aluminio.	32
Figura 16	Imagen térmica en 3D, a 40 segundo en tuvo PVC con lamina de aluminio.	32
Figura 17	Temperatura captada por el sensor, a 25 segundos.	33
Figura 18	Imagen térmica del fluido a 25 segundos. usando solo lámina de aluminio.	34

Figura 19	Imagen en 3D solo lámina de aluminio, 25 segundos dentro de la guía.	34
Figura 20	Imagen térmica en botella de vidrio, con 15 segundo dentro de la guía.	35
Figura 21	Imagen en 3D botella de vidrio, con 15 segundo dentro de la guía.	35
Figura 22	Imagen térmica de temperatura del fluido después de fluir por el serpentín de vidrio.	36
Figura 23	Imagen térmica de temperatura del fluido después de fluir por el serpentín de vidrio en 3D.	36
Figura 24	Imagen térmica de temperatura del serpentín después del proceso de circulación.	37
Figura 25	Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado.	38
Figura 26	Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado con magnetita.	38
Figura 27	Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado dentro de la guía.	39
Figura 28	Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado con magnetita dentro de la guía.	40
Figura 29	Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado dentro de la guía.	41
Figura 30	Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo liviano dentro de la guía.	42
Figura 31	Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo liviano con magnetita dentro del horno.	43
Figura 32	Imagen térmica del crudo liviano con magnetita dentro de la guía, con tiempo de 30 segundos.	44
Figura 33	Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo liviano con magnetita dentro del horno.	45
Figura 34	Gráfica de la temperatura del crudo liviano con magnetita dentro de la guía captada por los sensores, con tiempo de 45 segundos de calentamiento, realizada con el software MATLAB.	46
Figura 35	Gráfica de la temperatura del crudo liviano puro dentro de la guía captada por los sensores, con tiempo de 45 segundos de calentamiento, usando el software MATLAB.	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Longitudes de onda y frecuencias de corte en función de diámetro .	19
Tabla 2	Componentes del horno microondas	21
Tabla 3	Temperaturas en distintos tiempos, usando el tubo PVC	31

RESUMEN

Título: Prototipo para el Calentamiento de un Fluido Mediante Microondas en Flujo Laminar o Turbulento¹

Autor: Jeset de Jesús Imbrecht Tafur²

Palabras Clave: Microondas, sensor, temperatura, crudo pesado, frecuencia de corte.

DESCRIPCIÓN:

La implementación de campos electromagnéticos como fuente de calentamiento, es un área de alto interés debido a su versatilidad y bajos costos frente a otros tipos de metodologías, en la siguiente investigación, se mostrará, el diseño y construcción de un modelo funcional, que emplea las microondas, para realizar el calentamiento de fluidos sensibles a este tipo de radiación ó que poseen en su composición materiales que interactúan con el campo magnético.

El modelo funcional planteado en este trabajo está construido a partir de algunos componentes de hornos microondas de uso doméstico, de igual manera otros que se construyeron en talleres locales, hechos a medida de lo que requería el modelo funcional para su buen funcionamiento y ensamble, además de una guía de ondas circular, la cual será de aluminio que al ser un metal ofrecerá un mayor confinamiento de las microondas, dentro de la cual se podrá medir las temperaturas alcanzadas después del calentamiento, dicha temperatura es registrada gracias a un sistema de sensores infrarrojos que envía los datos mediante conexión I2C hacia un computador. Se realizaron las pruebas pertinentes para realizar una optimización del prototipo y garantizar su adecuado funcionamiento, en las cuales se usaron fluidos de distintos tipos y con densidades diferentes.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: David Eugenio Forero, M.Sc.

ABSTRACT

Title: Prototype for the Heating of a Fluid Through Microwave in Flow Laminar or Turbulent¹

Author: Jeset de Jesús Imbrecht Tafur²

Keywords: Microwave, sensor, temperature, heavy crude, cutoff frequency.

DESCRIPTION:

The implementation of electromagnetic fields as a source of heating is an area of high interest due to its versatility and low costs compared to other types of methodologies. The following research will show the design and construction of a functional model that uses microwaves to heat sensitive fluids to this type of radiation or that have materials that interact with the magnetic field.

The functional model proposed in this work is built from some components of microwave ovens for domestic use, as well as others that were built in local workshops, tailored to what the functional model required for proper operation and assembly. In addition to a circular waveguide, which will be made of aluminum that as a metal, it will offer a greater confinement of the microwaves, which the temperatures reached after the heating can be measured. This temperature is registered thanks to a system of sensors infrared that sends the data through I2C connection to a computer. The relevant tests were carried out to optimize the prototype and ensure its proper functioning, in which fluids of different types and with different densities were used.

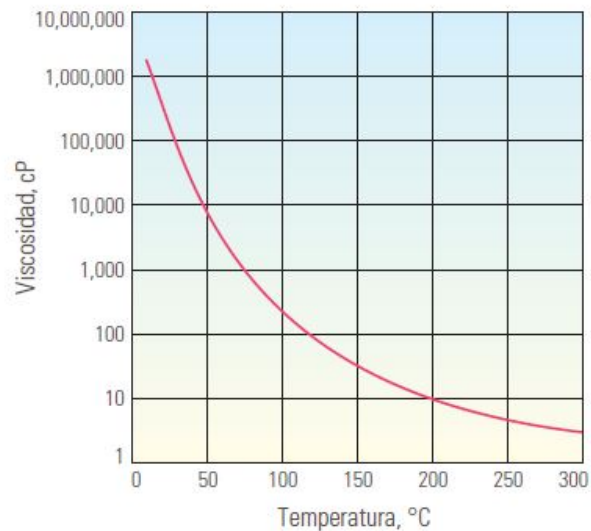
¹ Bachelor Thesis

² Faculty of Physics-Mechanics Engineering. School of Electric, Electronic and Telecommunications Engineering. Advisor: David Eugenio Forero, M.Sc.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en la industria petrolera de nuestro país se está dejando de lado el petróleo pesado como un recurso energético, esto es debido a las dificultades de extracción y los elevados costos que conlleva su producción. Los petróleos densos y viscosos son denominados pesados, los cuales presentan desafíos especiales a la hora de su destilación, pero no es algo insuperable. De las propiedades del petróleo, existe una que puede variar en gran medida con la temperatura, ésta es la viscosidad [1], como se ve en la figura 1, La propiedad del fluido que más afecta la producibilidad y recuperación. Es decir, cuanto mas viscoso es el petróleo, más difícil es producirlo [2].

Figura 1. Relacion entre la viscosidad y temperatura en petróleos.



Tomada de [2]

Por otro lado, con la gran demanda, los altos precios del petróleo, y estando en decli-

nación la producción de la mayoría de los yacimientos de petróleo convencionales, la atención de la industria en muchos lugares del mundo se está desplazando hacia la explotación de petróleo pesado [2]. Por lo tanto, es importante desarrollar equipos que ayuden al calentamiento del crudo y así disminuir la viscosidad, como lo es el modelo funcional que se diseñó en este trabajo de grado.

En Colombia la aplicación de un sistema de calentamiento empleando las microondas es mínima debido a su desconocimiento. Este proyecto pretende ser de apoyo en procesos fisicoquímicos de los petróleos. Haciendo uso de las microondas guiadas, se podrá subir la temperatura a un punto tal que esta reduzca la viscosidad del petróleo y así aumentar la fluidez del mismo, dado a que la viscosidad es un factor relevante para un productor de hidrocarburos [2].

Las microondas son un tipo de ondas electromagnéticas que existen en la naturaleza generalmente entre los 300 MHz y 300 GHz [3], como su nombre lo indica tienen una longitud de onda muy corta, del tamaño de milímetros. Las microondas calientan los fluido gracias a las moléculas polares que están presente en ellos, estas moléculas no poseen simetría de carga, lo cual hace que se comporten como imanes y se orientan dependiendo del campo eléctrico que pase por ellas. Las microondas tienen un campo eléctrico positivo y otro negativo que varían al oscilar ocasionando así vibraciones en dichas moléculas generando calor.

Este proyecto pretende ser un camino hacia la innovación en el uso que se le da a las microondas en el sector petrolero, y así mismo, ser el punto de partida para que en un futuro se utilicen en otros tipos de procesos industriales, y que utilicen las propiedades de las ondas electromagnéticas, como la penetración regulable de la radiación, calentamiento rápido, entre otras, [4], [5].

Capítulo 1

APLICACIONES DE LAS MICROONDAS EN LA INGENIERÍA

El término microondas no está vinculado a un margen de frecuencias con periferia universalmente aceptadas. Las microondas son ondas electromagnéticas comprendidas entre unos 300[MHz] y 300[GHz] [3], en este trabajo se empleará el rango de frecuencia de calentamiento estándar 2,45 [GHz]; Al tener semejanzas con la luz visibles estas ondas pueden experimentar fenómenos como la reflexión, refracción y absorción [6].

Este capítulo mostrará algunas de las aplicaciones más destacadas que han tenido las microondas.

1.1. Radar

Cuando se habla de las aplicaciones de microondas en ingeniería, no se puede dejar de lado el radar, gracias a este se pudo conocer que estas OEM sirven para el calentamiento de muchos objetos. El primer radar se le atribuye a Christian Hülsmeier, quién realizó la patente en 1904 del mismo, usado inicialmente en barcos para ayudar con la navegación y para detectar obstáculos, para así evitar la colisión entre barcos. A lo largo de los años el radar experimentó grandes avances, principalmente en la segunda guerra mundial, cuando era necesario la detección de aviones, barcos o carros de combate, en malas condiciones de visibilidad [3].

1.2. Separado de Emulsiones

Las microondas han sido utilizadas también para el proceso de separación de emulsiones en la industria de los hidrocarburos, aceite de consumo, alimentos, etc [6]. Debido a que el crudo en el momento que se extrae contiene mezclas de agua y aceite, que al momento de pasar por válvulas, pueden formarse emulsiones estables y generan problemas al momento de su transporte [6], ha sido necesario realizar esta clase de procesos de separación en esta industria.

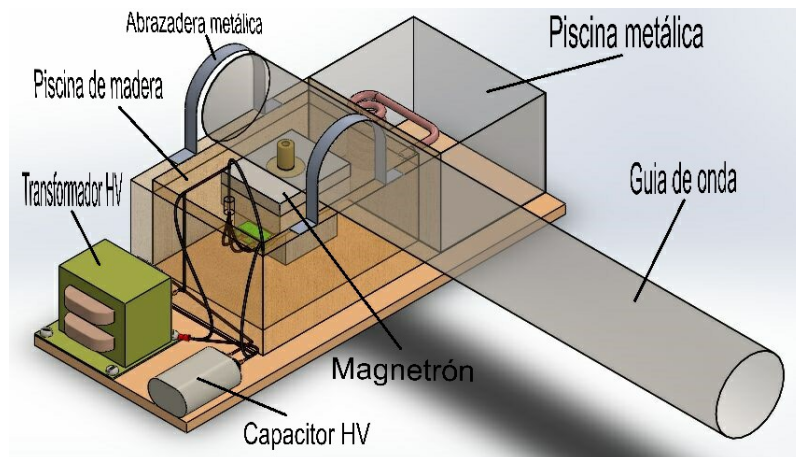
En la actualidad se han realizado investigaciones de este procedimiento, unos de los primeros son las patente de Klaila US.4067683 [7], “Métodos y Aparatos para controlar el flujo de fluidos de hidrocarburos de alta viscosidad” y la realizada por Wolf US.4582629 [8], “Uso de Microondas en la Separación de Emulsiones y Dispersiones de Hidrocarburos y Agua”. Estas realizan un mejoramiento en el momento de la separación de emulsiones y dispersión de aceite en agua [6]. y recientemente la tesis doctoral “Aplicación de Microondas en el Tratamiento de Emulsiones del Tipo Agua en Aceite (w/o) y Aceite en Agua(o/w)” de la doctora Rocio Pérez Páez [6].

Capítulo 2

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En esta sección se describen los componentes que hacen parte del diseño mecánico y electrónico del modelo funcional. Para esto fue necesario utilizar algunos componentes reciclados del horno microondas, dichas partes son: transformador, capacitor, diodo (todo estos de alta potencia) y un magnetrón. Para su funcionamiento, estas partes fueron acopladas sobre una plataforma. El diseño de todas estas partes acopladas se observa en la figura 2.

Figura 2. Este esquema muestra el diseño y partes del modelo funcional.

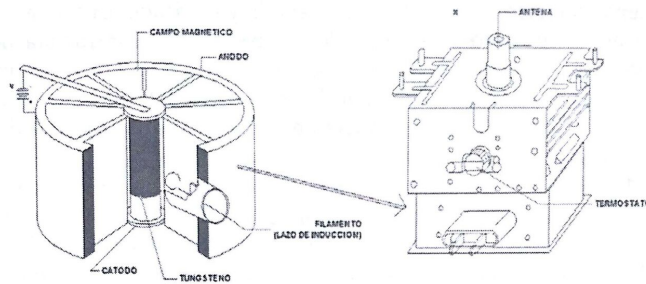


A continuación se describirán diferentes componentes que forman parte de este modelo funcional.

2.1. Magnetron

Este dispositivo es importante dentro del modelo funcional, ya que dentro de este se generan las OEM, tiene la función de transformar energía eléctrica en electromagnética, en el rango de microondas. Los dos componentes principales son su cubierta metálica resonante que actúa como ánodo, en el que hay dispuestas de forma radial una serie de oquedades o cavidades resonadoras, el segundo componente es el cátodo, un filamento que está en el centro de la rueda formada por el ánodo, este último está conectado al polo negativo de una fuente de corriente continua, que emite electrones por efecto termoiónico. El cilindro se conecta al polo positivo y atrae a los electrones. Todo este conjunto se encuentra dispuesto entre los polos de un par de potentes imanes los cuales rodean todo el cilindro metálico. Ver Figura 3.

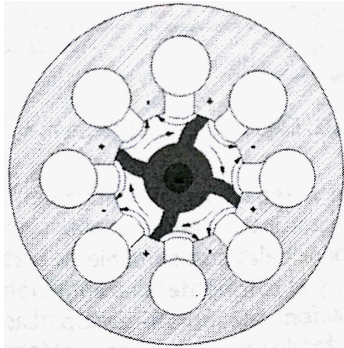
Figura 3. Esquema de un magnetron y sus partes.



Tomada de [4].

Ambos imanes producen un campo magnético, el cual ocasiona que los electrones en lugar de ir en línea recta hacia el cilindro, realicen una trayectoria circular, debido a la forma de las oquedades como se observa en la Figura 4.

Figura 4. Flujo de electrones que se genera dentro del magnetrón.



Tomada de [4].

2.2. Párametro de Diseño de la Guía de Onda

Hay dos clases fundamentales de aplicadores de microondas los cuales son monomodo y multimodo. un modo es una onda electromagnética que se propaga a una frecuencia determinada [4], [5]. En este proyecto se diseña y utiliza un aplicador monomodo de forma circular, ya que esta geometría tiene ventaja en la flexibilidad de su manejo y es de fabricación sencilla [9]. Otro punto a favor es que las paredes permiten propagar tanto vertical como horizontalmente la energía de las microondas, y así calentar los objetos en su interior, de forma rápida y uniforme.

En la etapa del pre-diseño, se definió un modo de propagación con el cual se calcularon las dimensiones de la guía de onda, puesto que cada uno posee una frecuencia de corte que hace posible su propagación dentro de la guía. La frecuencia de la señal que se transmite por la guía de onda debe ser mayor a la frecuencia de corte, de esta manera la energía electromagnética se propagará a través de la guía con la menor atenuación posible [9].

Para este proyecto se escogió el modo de propagación transversal eléctrico 1,1 (TE_{1,1}), debido a que posee la frecuencia de corte mas pequeña, también llamado "modo dominante". En la tabla 1, se puede apreciar una comparación entre los modos mas usados.

Tabla 1. Longitudes de onda y frecuencias de corte en función de diámetro

Modo	Longitud de onda de corte	Frecuencia de corte
$TE_{1,1}$	$\lambda_c = 1,71 * D$	$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3*10^8[\frac{m}{s}]}{1,71*D}$
$TM_{0,1}$	$\lambda_c = 1,31 * D$	$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3*10^8[\frac{m}{s}]}{1,31*D}$
$TE_{2,1}$	$\lambda_c = 1,03 * D$	$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3*10^8[\frac{m}{s}]}{1,03*D}$

2.2.1 Cálculo de las Dimensiones de la Guía de Onda. para el calculo de las dimensiones es necesario conocer la frecuencia del magnetron 2,45[GHz], la cual se usara como frecuencia central para hallar la longitud de onda en el entorno (aire), en la ecuación (2.1) se presenta el calculo. [10] [11]

Las dimensiones de la guía de onda se hallaron con base en las formulas y normas que implica el modo de propagación TE1,1.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8[\frac{m}{s}]}{2,450[GHz]} = 0,1224[m] = 12,24[cm], \quad (2.1)$$

donde:

- ❖ λ_0 : longitud de onda en el aire.
- ❖ c : Velocidad de la luz en el aire.
- ❖ f : Frecuencia central del sistema, en este caso la frecuencia a la que trabaja el magnetron.

Los valores del diámetro de la guía según Satellite Experimenter's Handbook [12], deben ser 3/5 y 3/4 de la longitud de onda en el aire como diámetro mínimo y máximo respectivamente, ó en su defecto ser lo más próximo a estos dos valores.

$$D_{min} = \frac{3}{5} * \lambda_0 = 0,6 * 12,24[cm] = 7,34[cm]. \quad (2.2)$$

$$D_{max} = \frac{3}{4} * \lambda_0 = 0,75 * 12,24[cm] = 9,18[cm]. \quad (2.3)$$

El diámetro escogido para este prototipo fue de 8,92 [cm] debido a las opciones en el mercado y fabricación de la guía de onda, como se evidencia éste es un valor muy próximo al diámetro máximo.

Siguiendo con los cálculos se debe determinar la longitud de onda estacionaria dentro de la guía de onda, esta se calcula en la ecuación (2.4) de la siguiente manera:

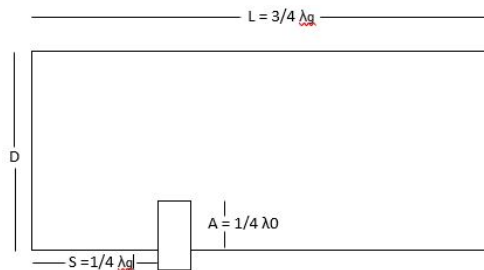
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{c1,1}}\right)^2}} = \frac{12,24[cm]}{\sqrt{1 - \left(\frac{12,24[cm]}{1,707*8,9[cm]}\right)^2}} = 20,663[cm], \quad (2.4)$$

donde:

- ❖ $\lambda_{c1,1}$: longitud de onda de corte del modo transversal eléctrico TE_{1,1}. como se observa en la tabla 1.

Teniendo estos datos, se procede a calcular las dimensiones de la guía de onda, empleando las ecuaciones (2.5), (2.6), (2.7) y (2.8). Los resultados obtenidos se pueden ver en la figura 5.

Figura 5. Sección longitudinal de la guía de onda con sus respectivas medidas.



$$S = \frac{1}{4} * 20,663 = 5,17[cm] \quad (2.5)$$

$$L = \frac{3}{4} * 20,663 = 15,5[cm] \quad (2.6)$$

$$A = \frac{1}{4} * 12,24 = 3,06[cm] \quad (2.7)$$

$$D = 8,92[cm], \quad (2.8)$$

donde:

- ❖ S: Distancia entre la base de la guía de onda y la antena.
- ❖ L: Longitud de la guía.
- ❖ A: Medida de la antena de microondas dentro de la guía.
- ❖ D: Diámetro de la guía de onda.

2.3. Componentes Adicionales del Modelo Funcional

En esta sección se mencionarán otros componentes que se emplearon para el diseño y funcionamiento del modelo funcional, empezamos por los elementos de alto voltaje (HV) de un horno microondas, que se usaron en este modelo funcional, los cuales son, los observados en la tabla 2. El diodo, transformador de corriente alterna a corriente continua y capacitor, este último realiza la función de multiplicador de tensión, alcanzando los 4000 [V] que alimentan al magnetrón. Todo el montaje se puede observar en la Figura 2

Tabla 2. Componentes del horno microondas

Componente	Voltaje [V]	Capacitancia [uF]	Voltaje de ruptura[V]
Transformador HV	2100		
Capacitor HV	2100	0,91	
Diodo HVr-1x 3			11

Para el sistema de refrigeración del magnetrón se optó por diseñar dos carcasas, la primera para depositar aceite dieléctrico en ella, al lado de esta se encuentra la segunda carcasa para refrigerar el aceite. Ambas unidas por un tubo de cobre en forma de serpentín.

Para ubicar y acoplar todos los componentes del modelo funcional mencionados anteriormente, se utilizó una base de formica con dimensiones 60*30[cm].

Para pruebas preliminares se usó como guía de ondas tubos PVC rodeados de laminas de aluminio, debido a su bajo costo. Como fluido se utilizó en las pruebas una mezcla de agua con magnetita de dimensiones nanométricas, esta mezcla es llamada ferro-fluido.

Para circular el ferro-fluido dentro de la guía de onda se diseñó un tubo con forma de serpentín, por el cual estará circulando el fluido mientras es calentado. En las pruebas se usó una cámara térmica de marca Fluke modelo Tis-50, para observar el calentamiento del ferro-fluido.

2.3.1 Componentes Electrónicos. La electrónica del modelo funcional se usaron 6 sensores infrarrojos de temperatura, referencia GY-906 mlx90614 (ver figura 6), los cuales poseen conexión I2C. Los pines de este sensor son: Vin, GND, SCL, SDA. Al tener la misma dirección los sensores no era posible la conexión simultanea entre estos. Este problema fue solucionado, y para lograr que todos los sensores funcionen al tiempo, se necesitó un multiplexor I2C, referencia TCA9548A (ver figura 7). La conexión de todos los sensores al multiplexor y el sistema embebido de control, se puede observar en el diagrama de bloques de la figura 8. Esta sensórica registra la temperatura del fluido dentro de la guía de onda.

Figura 6. Foto del sensor de referencia GY-906 mlx90614, usado para la medición de temperatura de las muestras dentro de la guía de onda.



Figura 7. Foto de multiplexor I2c de referencia TCA9548A, usado para la comunicación simultánea de los sensores.

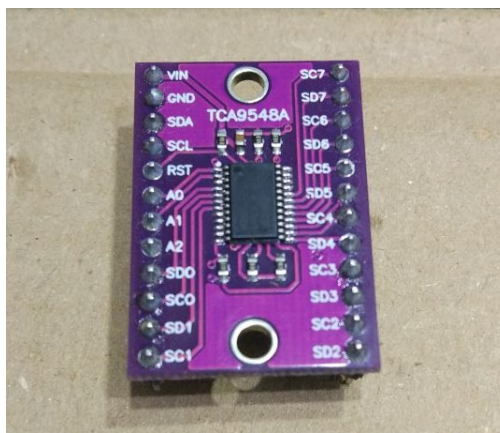
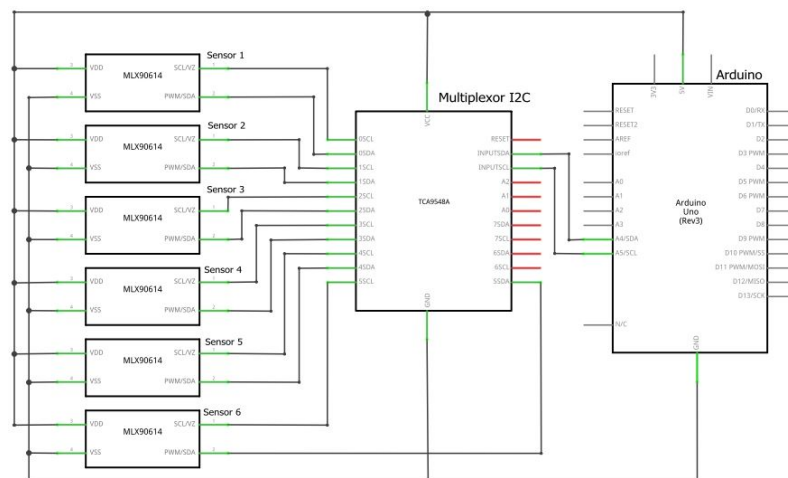
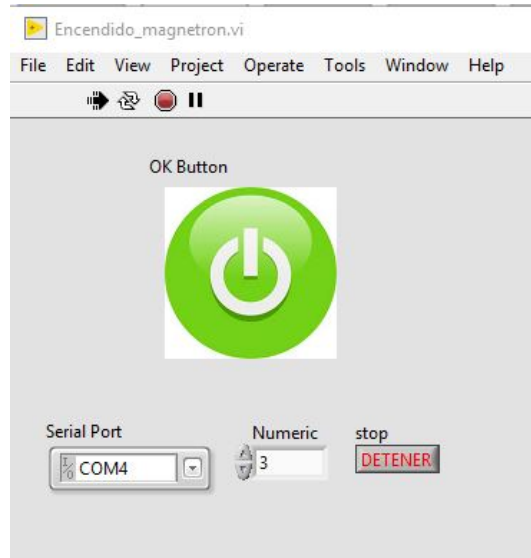


Figura 8. Diagrama de bloques de conexión entre la sensórica con el ARDUINO UNO.



Para el encendido y apagado del modelo funcional se optó por dejarlo de dos maneras; una manual, que consiste en un switch o interruptor; la otra forma es por medio de un computador, la cual consiste en usar un modulo relé compatible con ARDUINO UNO funcionando como switch, y mediante el software LabVIEW hacer la comunicación. Este encendido digital se puede observar en la figura 9

Figura 9. Botón de Encendido digital, usando el software LabVIEW.



El micro-controlador de toda la parte electrónica empleado es una tarjeta Arduino UNO, por motivos de bajo costo y que cumple con los requerimientos necesarios para la conexión de todos los componentes electrónicos.

Capítulo 3

ETAPAS DE DESARROLLO

El desarrollo de este proyecto se dividió en 4 fases, que encaminaron a su construcción final y funcional.

3.1. Diseño Mecánico y Selección

Esta fase corresponde al diseño, dibujado y dimensionado del prototipo y sus componentes. Para esto se usó el software de diseño asistido por computadora (CAD) SolidWorks 2018, tal como se observa en la figura 2. Paralelo a esto se realizó la selección de componentes electrónicos.

3.2. Fabricación

En esta etapa se usaron los talleres necesarios para la fabricación de algunos componentes diseñados en la fase anterior. Los talleres debían cumplir con las especificaciones de diseño para cada pieza.

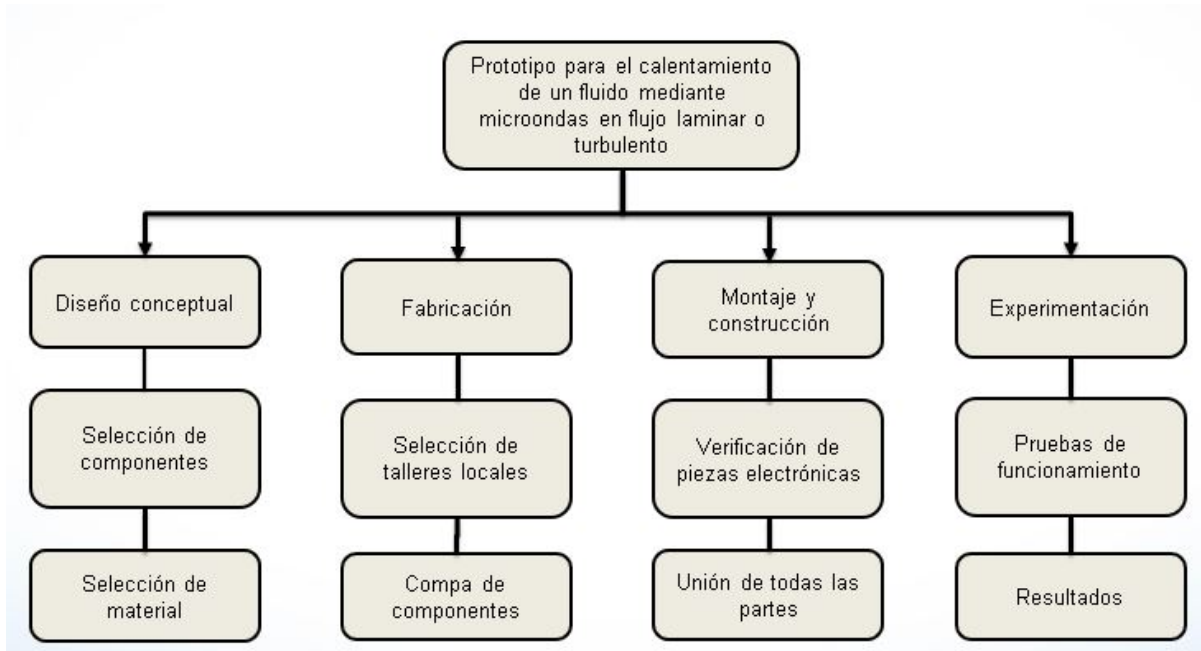
3.3. Montaje y Construcción

Una vez terminada la etapa anterior y verificación de las piezas mecánicas y electrónicas, se procedió a realizar el montaje y construcción del modelo funcional.

3.4. Etapa Experimental

Esta etapa consistió en realizar las pruebas necesarias para validar el buen funcionamiento del modelo funcional, sus partes y los objetivos.

Figura 10. Matriz EDT. Estructura de descomposición del trabajo para el presente proyecto..



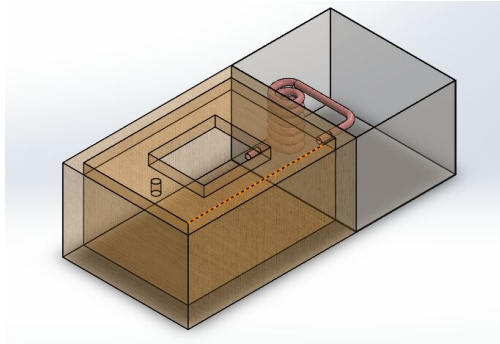
Capítulo 4

CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES

Como se ha mencionado anteriormente, algunos componentes son prefabricados, pero también hubo algunos que se construyeron desde cero. El primer elemento construido fueron las carcasas de protección y refrigeración del magnetrón, las cuales cuentan con un serpentín encargado de transportar el aceite dieléctrico de una parte superior a la inferior de la carcasa para lograr el mismo efecto térmico que ocurre en los transformadores de potencia, llamado termosifón. Este fenómeno se produce en los fluidos, cuando estos se calientan su densidad disminuye y se dilatan, es decir, que el aceite caliente sube y empieza a circular por el serpentín hacia el punto inferior de la carcasa. Para esta carcasa se requirió colocar un aislante en sus paredes inferiores, ya que el alto voltaje producido por el magnetrón podría generar arcos sobre las laminas, evento que lo dañaría.

La segunda carcasa adyacente a la del magnetrón, esta se construyó con laminas de metal galvanizado para depositar los elementos refrigerantes, para este caso se utilizó hielo con el fin de disipar mas rápido las temperaturas altas. Dentro de esta hay depositada agua con hielo para mantenerse fría; esta se une en dos puntos (uno en la parte superior de la caja de madera y otro en la parte inferior), con la otra piscina mediante un tubo delgado de cobre con forma de serpentín, por donde estará fluyendo el aceite caliente, esta forma permite que el flujo del aceite tome algún tiempo en circular del punto superior al inferior y logre refrescarse. El flujo del aceite por el tubo de cobre es posible gracias al efecto termosifón mencionado anteriormente. Todo esto se puede apreciar mejor en la figura 11.

Figura 11. Vista translúcida del sistema de refrigeración.



Los materiales de la guía de ondas de prueba fueron 2: PVC (policloruro de vinilo) de 3 pulgadas cubierto por lamina de aluminio calibre 5 (ver figura 12), para hacer pruebas preliminares, y el aluminio calibre 14 como material final. La guía de onda se construyó con una longitud de 70[cm], ya que permitirá tener más fluido circulando dentro de la guía. en los cálculos se obtuvo una longitud de 15,5[cm], a pesar de extender la longitud no se detectaron perdidas ni atenuación perceptibles de las microondas.

Figura 12. Foto guia de onda en PVC con aluminio.



Se usó el aluminio como material debido a que es un metal y estos reflejan las ondas electromagnéticas, manteniendo a las microondas confinadas dentro de su interior, evitando así escape alguno hacia el exterior de la guía, esto garantizaría un aprovechamiento máximo de las ondas. Esta guía se puede apreciar en la figura 13.

Figura 13. Foto guia de onda en aluminio.



Para la construcción del serpentín por el cual estará circulando el fluido a calentar, se utilizo como material el vidrio borosilicatado, más conocido comercialmente como duran, pyrex o kimax. Se escogió este material debido a que resiste temperaturas cerca de los 530 grados centígrados, temperatura suficiente para el uso que tendrá dentro del modelo funcional. Este serpentín se puede observar en la figura 14.

Figura 14. Foto de serpentín de vidrio.



Capítulo 5

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se explicaran cada una de las pruebas que se realizaron, la evolución y contribución que éstas tuvieron para ir modificando y optimizando el sistema. En un inicio de las pruebas se usaba como refrigeración del magnetrón, el ventilador de un horno microondas, pero a medida transcurrieron las pruebas se notaba mucho calentamiento por parte del magnetrón alcanzado este mas de $100^{\circ}C$, en solo 40 segundos de funcionamiento, suceso por el que se tuvo que deducir y replantear un sistema nuevo de refrigeración del magnetrón, inicialmente se decidió usar un segundo ventilador, pero eso solo ocasionaría más consumo de energía eléctrica en el modelo funcional, y no fue vista como una solución muy óptima en temas de relación consumo/efectividad. este problema se solucionó diseñando las 2 carcassas que se mencionaron con anterioridad en el capítulo 3.

En un inicio se notaban arcos eléctricos entre la guía de onda y el magnetrón, lo que dio lugar a tener que diseñar una superficie que evitara este contacto, se uso como material el politetrafluoroetileno (PTFE), conocido comercialmente como teflon, debido a que resiste altas temperaturas. Al continuar las pruebas, ya no se notaban arcos eléctricos pero el fluido dentro de la guía de onda no lograba calentarse, esto fue de mucha preocupación, debido a que el modelo funcional debía calentar y no lo estaba cumpliendo.

Después de varias pruebas, y de usar una lámpara fluorescente para rectificar que no existían fugas de las microondas, se descubrió, que las ondas no estaban siendo conducidas hacia la guía de onda, por el contrario estaban siendo regresadas por medio de la antena del magnetrón, esto creaba la posibilidad de ocasionar deterioro y daño permanente del magnetrón, afortunadamente se detectó esta anomalía a tiempo. Este

problema condujo a conocer que la unión entre magnetrón y guía de onda no era ideal, esto se debía a que la zona de acople entre estas dos superficies (conocido como el *gasket*) no hacía contacto entre ellos. Esta solución de aparente complejidad (debido a que en las bases de datos como la web o libros, no se encontraba mucha información al respecto) fue el principio del buen funcionamiento del modelo funcional.

Después de todos estos imprevistos, que normalmente ocurren cuando se está diseñando y probando un modelo funcional, se continuó con las pruebas. En las preliminares que se hicieron, se midió y tomó el tiempo en que alcanzaba diferentes temperaturas. En estas pruebas, como guía de ondas se usó un tubo redondo 3 pulgadas de PVC de 30[cm], rodeado de la lámina de aluminio. Se usaron estos materiales por fácil obtención y bajo costo, para comparar más adelante con el material final.

A medida que se realizaban pruebas, se registraban las temperaturas en 40, 60, 90 y 120 segundos, teniendo como resultado lo que se aprecia en la tabla 3 y que se puede evidenciar en la figura 15, podemos observar el gráfico infrarrojo en 3D, figura 16.

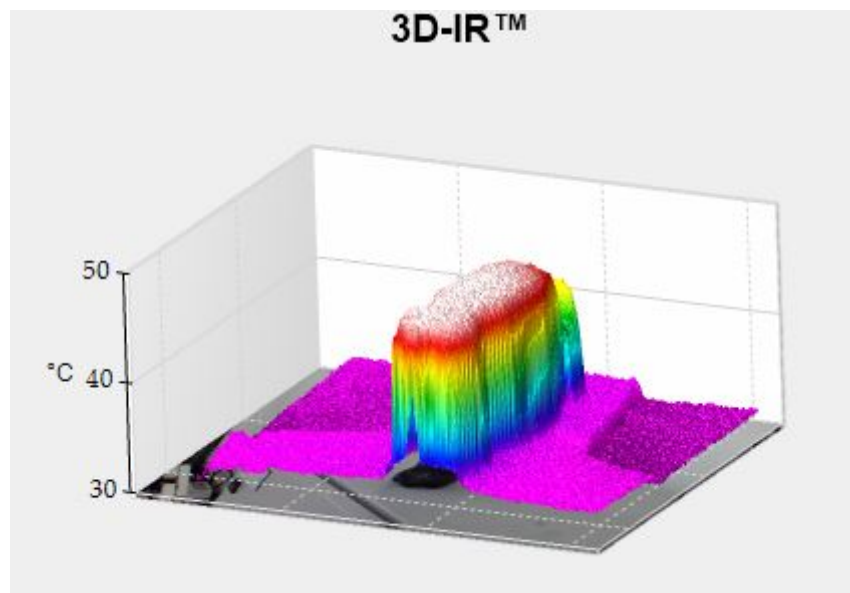
Tabla 3. Temperaturas en distintos tiempos, usando el tubo PVC.

Temperatura [$^{\circ}C$]	Tiempo [s]
48	40
67	60
84	90
94	120

Figura 15. Imagen térmica del fluido a 40 segundos, en tubo PVC con lamina de aluminio.



Figura 16. Imagen térmica en 3D, a 40 segundo en tubo PVC con lamina de aluminio.



Todo esto usando aproximadamente 230[mL] del ferro-fluido como la muestra a calentar dentro de una botella plástica de 250[mL], cabe resaltar, que la temperatura del ferro-fluido no variaba en gran medida dependiendo de la posición o distancia que la botella se encontrase de la antena del magnetrón. Estas mismas pruebas se realizaron en un horno microondas convencional, y en éste se registraron temperaturas más elevadas en

los mismos tiempos, de nuevo otro resultado que fue causa de preocupación debido a que nuestro modelo funcional debía calentar el fluido a los mismos tiempos o incluso menores, por el confinamiento de las microondas en la guía de onda.

Todo conducía que el poco calentamiento del fluido era debido a alguna atenuación de las microondas dentro de la guía, pero para estar seguro de esto se debía probar otra guía de onda, fue cuando se decidió no utilizar el tubo PVC, para usar solo la lámina de aluminio que lo recubría. este importante cambio en la guía tuvo resultados bastantes positivos, debido a que se alcanzó entre 95 y $101^{\circ}C$ en tan solo 25 segundos, estaríamos hablando de evaporar agua en ese tiempo tan pequeño, resultado que sería óptimo para el uso del prototipo. Estos resultados se captaron con uno de los sensores tanto con la cámara térmica, los cuales se pueden apreciar en la figura 17, 18 y 19 respectivamente.

Figura 17. Temperatura captada por el sensor, a 25 segundos.

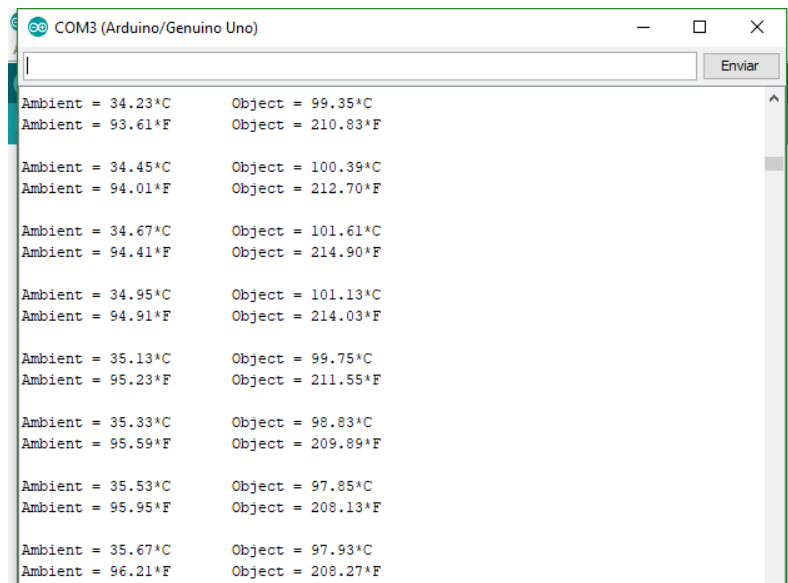


Figura 18. Imagen térmica del fluido a 25 segundos. usando solo lámina de aluminio.

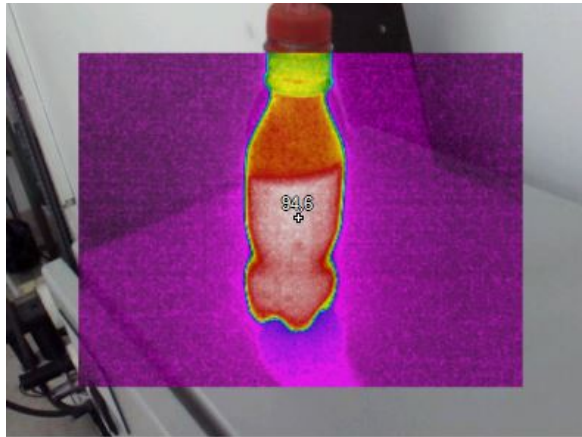
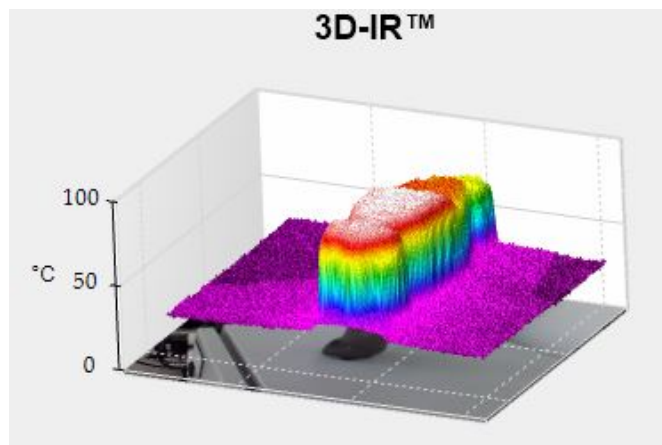


Figura 19. Imagen en 3D solo lámina de aluminio, 25 segundos dentro de la guía.



Esta prueba sirvió para concluir, que el PVC absorbía gran cantidad de las microondas que se propagaban dentro de la guía, ocasionando así que el fluido demorase mucho más tiempo en calentarse. Además de la botellas de plástico se vertió el fluido en pequeñas botellas de vidrio de aproximadamente 15[mL], estas alcanzaban temperaturas de $98^{\circ}C$, en alrededor 15 segundos. estas pruebas se pueden apreciar en la figura 20 y 21.

Figura 20. Imagen térmica en botella de vidrio, con 15 segundo dentro de la guía.

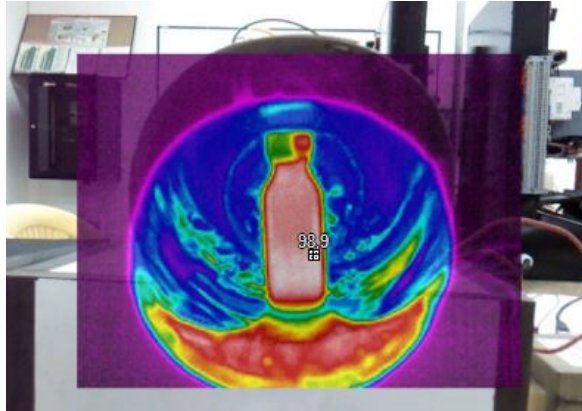
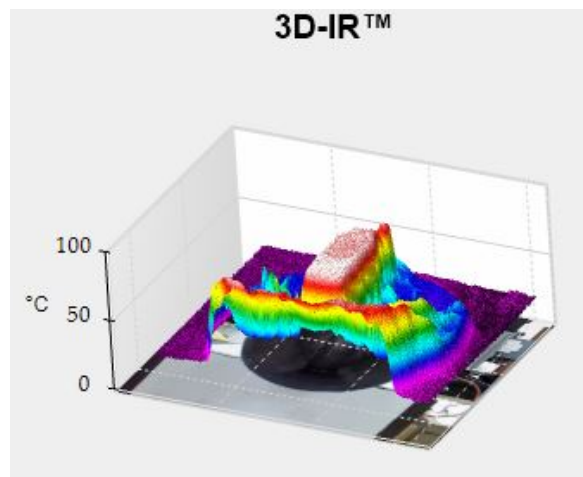


Figura 21. Imagen en 3D botella de vidrio, con 15 segundo dentro de la guía.



Al alcanzar estas temperaturas tan altas en tan poco tiempo se da por hecho el buen funcionamiento del modelo funcional. Las siguientes pruebas que se realizaron, consistieron en hacer circular el fluido por el serpentín de vidrio dentro de la guía de onda, esto con ayuda de unas mangueras por donde se vertió el fluido de manera manual, a medida que este se calentaba dentro del serpentín, comenzaba a fluir buscando una salida por efecto de presión, el tiempo total del fluido dentro de la guía de onda fue de 20 segundos, la temperatura captada en estas pruebas fue de $85^{\circ}C$ estas pruebas se pueden ver en las figuras 22 y 23 .

Figura 22. Imagen térmica de temperatura del fluido después de fluir por el serpentín de vidrio.

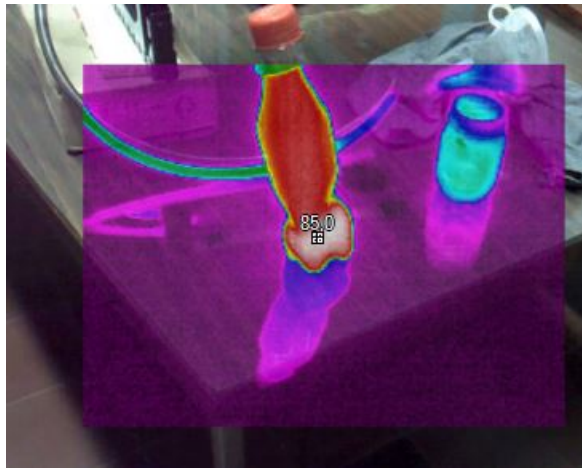
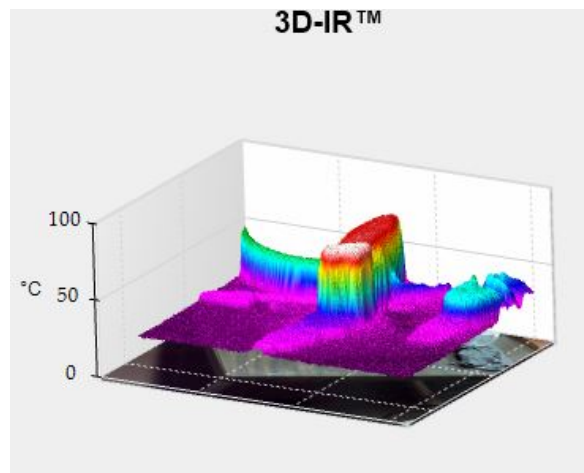
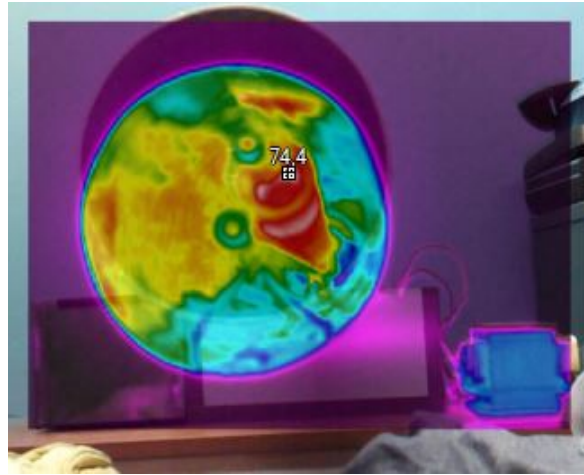


Figura 23. Imagen térmica de temperatura del fluido después de fluir por el serpentín de vidrio en 3D.



La temperatura en el serpentín fue de $74^{\circ}C$ (ver figura 24), debido a que la foto se podía tomar después del proceso de fluido y dejando un poco de fluido dentro de este.

Figura 24. Imagen térmica de temperatura del serpentín después del proceso de circulación.



Las temperaturas registradas por los sensores, no varían con respecto a las capas por la cámara Fluke.

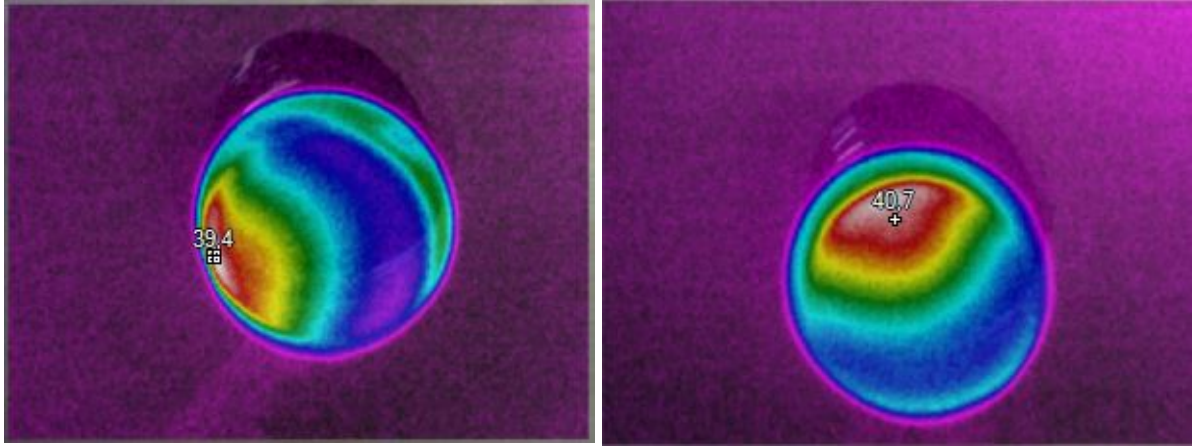
Otra de las pruebas fue comparar la guía de onda con un horno microondas casero y se observó dentro de la guía que la geometría es importante cuando un objeto es expuesto a microondas. Las pruebas se hicieron con crudo pesado y liviano, y también mezclados con la magnetita (esta con concentración de 20 % en todas las muestras de crudos), con el propósito de ver cómo este nanomaterial absorbe las microondas para así lograr calentar el crudo, debido a que este no absorbe en gran medida a las microondas en su estado puro. Las pruebas se realizaron con tiempos de 30 y 45 segundos respectivamente, ya que en un tiempo superior a este los recipientes del crudo empiezan a sufrir doblamientos por el calor, toda esta parte experimental fue registrada tanto por los sensores como por la cámara térmica.

Las pruebas en el prototipo se hicieron con la guía de ondas libre y tapada, observando así cambio de temperatura hasta aproximadamente 20°C de diferencia para el caso del crudo liviano con magnetita, siendo las temperaturas más altas registradas cuando la guía estaba tapada. Al exponer el crudo pesado puro a las microondas dentro del horno se observa un leve calentamiento pero no muy alto, esto debido a que no absorbe las microondas de forma óptima como se indicó anteriormente, en la figura 25a se observa la temperatura que alcanzó a los 30 segundos, la cual fue de 39.4°C ; y en la figura 25b la temperatura a 45 segundos.

Figura 25. Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado.

(a) Imagen térmica del crudo pesado en horno con tiempo de 30 segundos

(b) Imagen térmica del crudo pesado en horno con tiempo de 45 segundos

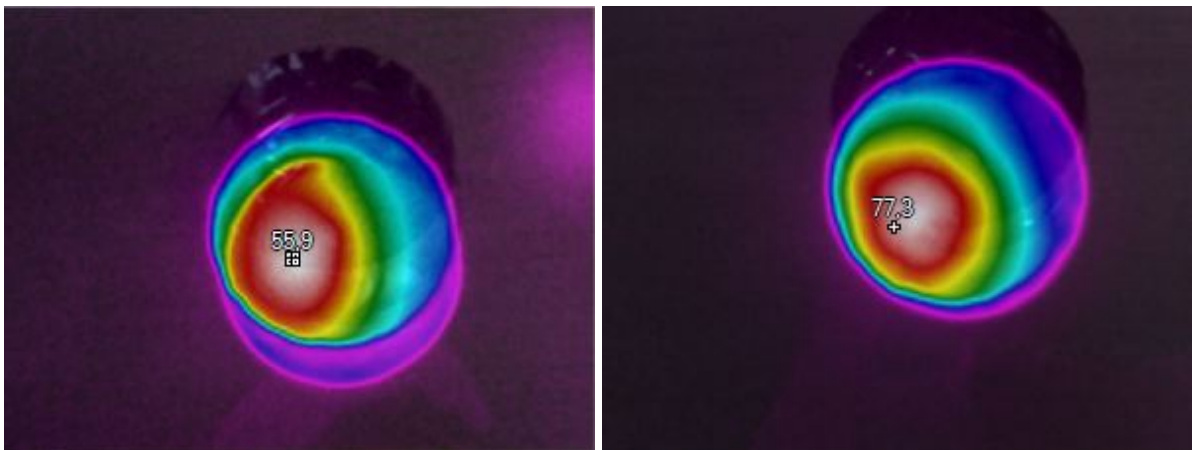


Para observar el comportamiento de la magnetita era necesario también mezclar el crudo pesado con este nanomaterial, en la figura 26a se observa como la magnetita absorbe las microondas y calienta el crudo pesado llegando a $55.9^{\circ}C$; así mismo en la figura 26b se observa la temperatura a 45 segundos.

Figura 26. Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado con magnetita.

(a) Imagen térmica del crudo pesado con magnetita en horno, con tiempo de 30 segundos

(b) Imagen térmica del crudo pesado con magnetita en horno, con tiempo de 45 segundos



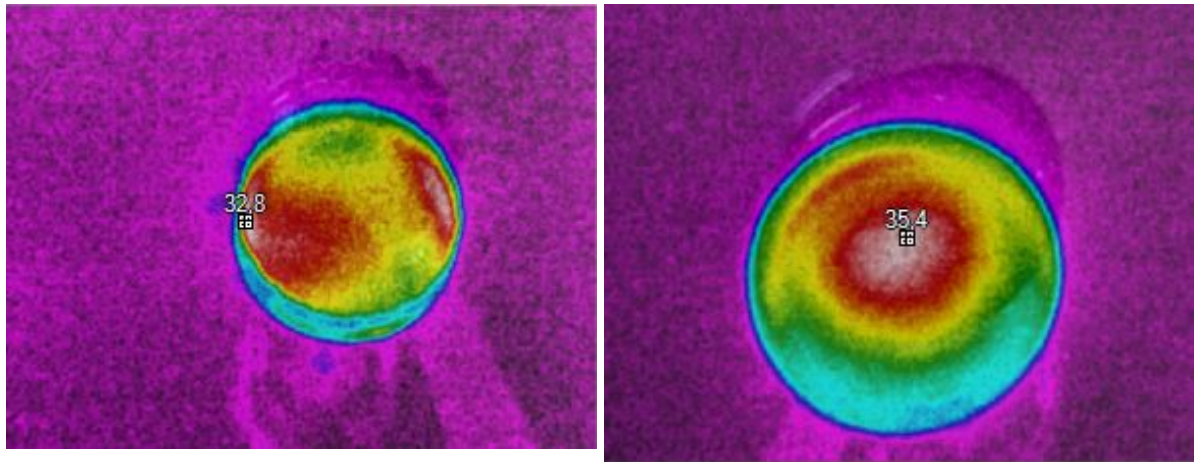
Dentro de la guía de ondas el calentamiento del crudo pesado a 30 segundos fue un poco menor al del horno microondas alcanzando solamente $32.8^{\circ}C$, esto se observa en

la figura 27a. La temperatura al tiempo de 45 segundos no varió en gran medida con respecto a los 30 segundos esta fue de $35.4^{\circ}C$ como se ve en la figura 27b.

Figura 27. Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado dentro de la guía.

(a) Imagen térmica del crudo pesado dentro de la guía, con tiempo de 30 segundos

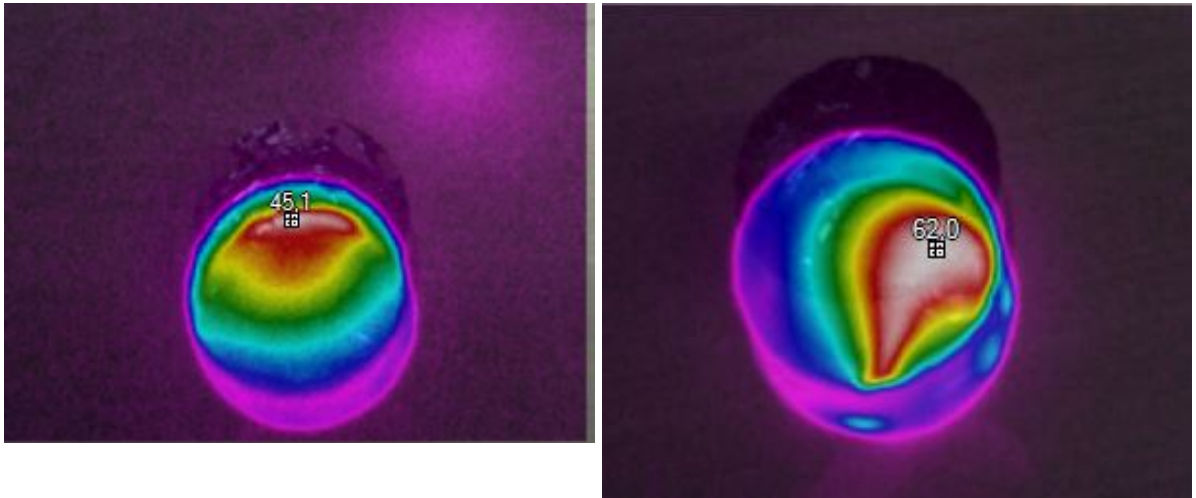
(b) Imagen térmica del crudo pesado con magnetita dentro de la guía, con tiempo de 45 segundos



Como se observó en el crudo pesado, la temperatura alcanzada en la guía de ondas fue un poco menor a la del horno, en la figura 28a se ve una temperatura de $45.1^{\circ}C$ para un tiempo de 30 segundos, temperatura un poco menor a la del horno, pero que sin embargo se nota el calentamiento que absorbe la magnetita, para el tiempo de 45 segundos hubo un aumento de temperatura como era de esperarse al ser un tiempo mayor, en la figura 28b se observa que la temperatura que alcanza este crudo mezclado con la magnetita es de $62^{\circ}C$.

Figura 28. Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado con magnetita dentro de la guía.

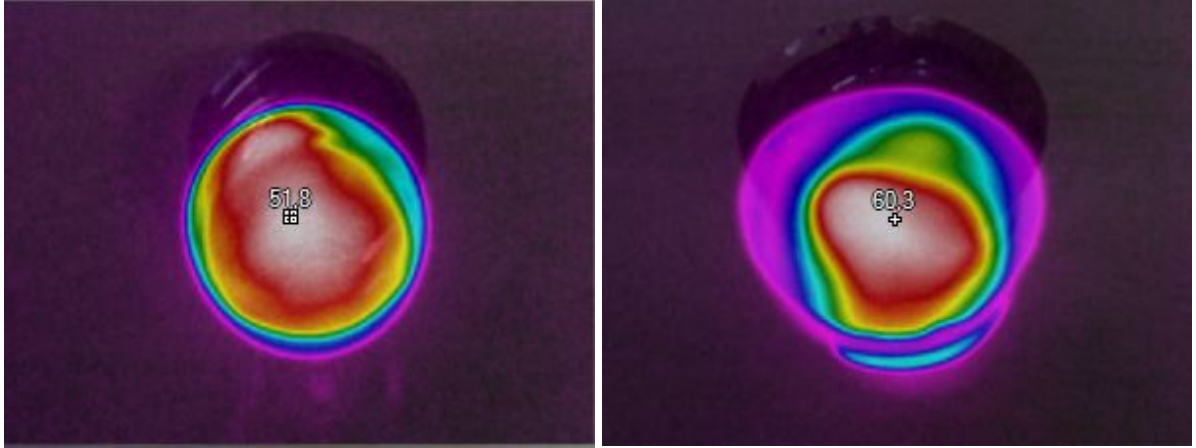
(a) Imagen térmica del crudo pesado con magnetita dentro de la guía, con tiempo de 30 segundos (b) Imagen térmica del crudo pesado con magnetita dentro de la guía, con tiempo de 45 segundos



Estas mismas pruebas realizadas en el crudo pesado se llevaron a cabo también con el crudo liviano, presentando este valores mas alto de temperatura en todo sentido, esto puede posiblemente deberse a la composición natural de cada crudo, ya que ambos están en profundidades distintas en el subsuelo. Se hicieron primero con el horno microondas a 30 segundo como se observa en la figura 29a la cual registra temperaturas de $51.8^{\circ}C$; en la figura 29b se observa la misma muestra con tiempo de 45 segundo la cual aumenta la temperatura a $60.3^{\circ}C$.

Figura 29. Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo pesado dentro de la guía.

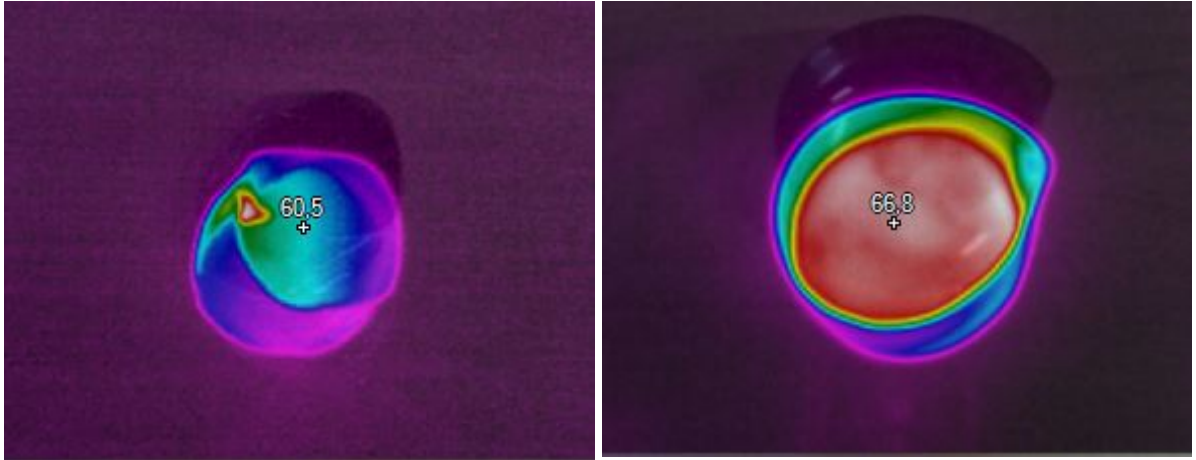
(a) Imagen térmica del crudo liviano dentro del horno, (b) Imagen térmica del crudo liviano dentro del horno, con tiempo de 30 segundos con tiempo de 45 segundos



El crudo liviano dentro de la guía tuvo un comportamiento similar al del horno pero en este caso se encontraron diferencias en las temperaturas respecto a tener tapado el extremo libre de la guía y en dejarlo libre, las pruebas a continuación es con la guía de ondas con tapa ya que así estaría mas a la par con el horno debido a que este ultimo siempre esta con la puerta cerrada. En la figura 30a se ve que la temperatura alcanzada por el crudo liviano puro en solo 30 segundos es de $60.5^{\circ}C$, por otro lado con tiempo de 45 segundos se alcanza $66.8^{\circ}C$ como se ve en la figura 30b. Si bien la variación de temperatura en ambos tiempo no varia mucho ya habíamos mencionado que el crudo puro no absorbe muy bien las microondas, sin embargo tiende a calentarse ya sea por que el recipiente que los contiene lo hace o por los componentes naturales en el crudo.

Figura 30. Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo liviano dentro de la guía.

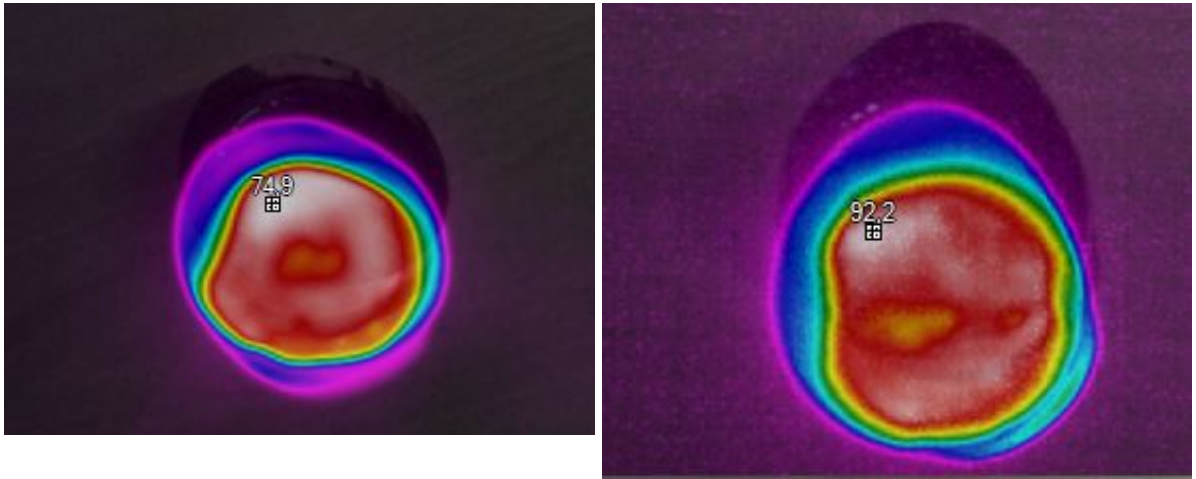
(a) Imagen térmica del crudo liviano dentro de la guía, (b) Imagen térmica del crudo liviano dentro de la guía, con tiempo de 30 segundos con tiempo de 45 segundos



En las siguientes pruebas se continuó analizando el crudo liviano pero mezclado con el nanomaterial, como pudo observarse en las pruebas anteriores el crudo liviano logra calentarse mas que el pesado, era de esperarse grandes temperaturas en estas muestras mezcladas con la magnetita. en la figura 31a se observa la temperatura alcanzada en el horno después de 30 segundos; y en la figura 31b la temperatura después de 45 segundos.

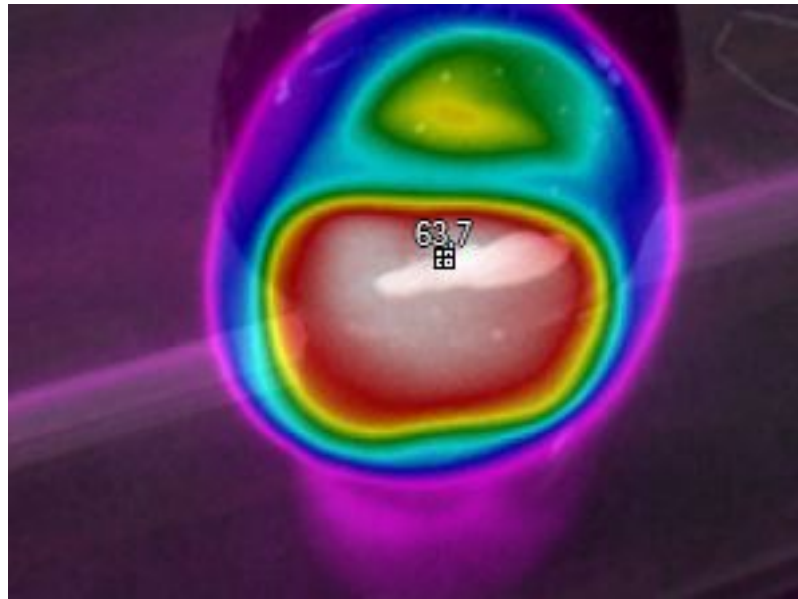
Figura 31. Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo liviano con magnetita dentro del horno.

(a) Imagen térmica del crudo liviano con magnetita dentro del horno, con tiempo de 30 segundos (b) Imagen térmica del crudo liviano con magnetita dentro del horno, con tiempo de 45 segundos



Cuando pasamos a la guía de onda se observó que la temperatura alcanzada en el crudo liviano era muy diferente e inferior a la que se registro en el horno, en la figura 32 se aprecia esto, pero esa prueba se llevó a cabo teniendo la guía de onda la base libre sin ser tapada, este fenómeno se registro en todas las pruebas que se hicieron pero solo se pondrá una foto térmica para no saturar el documento, si bien la figura 32 muestra solo $63.7^{\circ}C$ en 30 segundos, temperatura 11 grados inferior a la del horno.

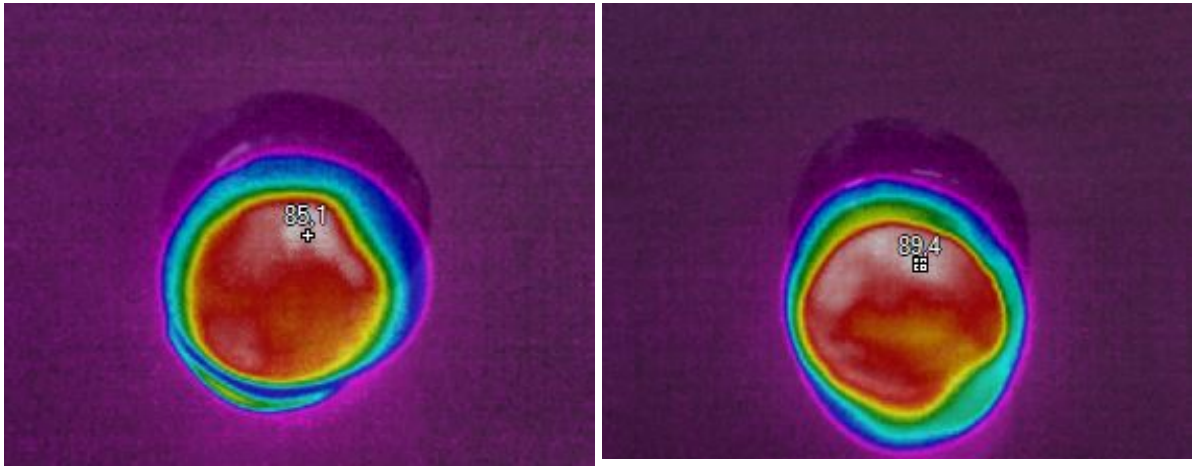
Figura 32. Imagen térmica del crudo liviano con magnetita dentro de la guía, con tiempo de 30 segundos.



La prueba se realizó también tapando la base libre de la guía de onda, en la cual las temperaturas fueron más altas, esto puede deberse al mejor confinamiento de las microondas y así ser mejor absorbidas por la magnetita. En la figura 33a se aprecia que hubo una temperatura mas alta y mejor absorción de las microondas respecto a la figura 32; en la Figura 33b hubo un incremento de temperatura con respecto a los 30 aunque este incremento no sea tan grande se observa que a mayor tiempo más se calienta el crudo.

Figura 33. Imágenes térmicas en ambos tiempos del crudo liviano con magnetita dentro del horno.

(a) Imagen térmica del crudo liviano con magnetita dentro de la guía, con tiempo de 30 segundos (b) Imagen térmica del crudo liviano con magnetita dentro de la guía, con tiempo de 45 segundos

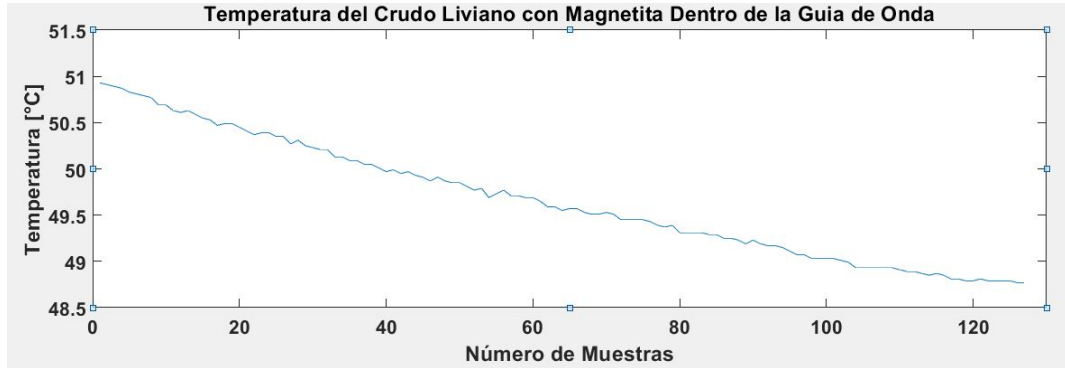


En todas las pruebas realizadas se observó leves diferencias entre las temperaturas registradas tanto por el modelo funcional como el horno microondas, estas leves diferencias se deben al fabricante de de los componentes ya que el algunos magnetrones trabajan a diferente potencias pero el rango que se maneja en la industria es de 800-950 [W]. Al ser las temperaturas registradas por ambos aparatos tan parejas se dice que el funcionamiento del modelo funcional es bueno.

Paralelo a estas pruebas se fueron realizando las mediciones de las temperaturas en los crudos con los sensores infrarrojos, cabe mencionar que la resolución de los sensores es optima en un rango de 2 [cm] después de esa distancia la lectura de la temperatura se distorsiona de la real $10^{\circ}C$ por cada cm que se aleja la muestra de este, debido a la geométrica tanto de la guía como la de los recipientes la distancia entre los sensores y los diferentes crudos era de 5.5[cm], esto provocaba una temperatura de aproximadamente $35^{\circ}C$ por debajo de la temperatura real que estaban captando los sensores en la figura 34 se observa que la mayor temperatura es de $50^{\circ}C$ aproximadamente, si corregimos el error debido a la distancia de separación entre sensor y muestra la temperatura real que capto fue de $85^{\circ}C$ y fe disminuyendo a medida que pasa el tiempo como es lógico ya que debido a que las ondas electromagnéticas afectan a los dispositivos electrónicos la medida de temperatura tomada por los sensores ocurre pocos segundos después que

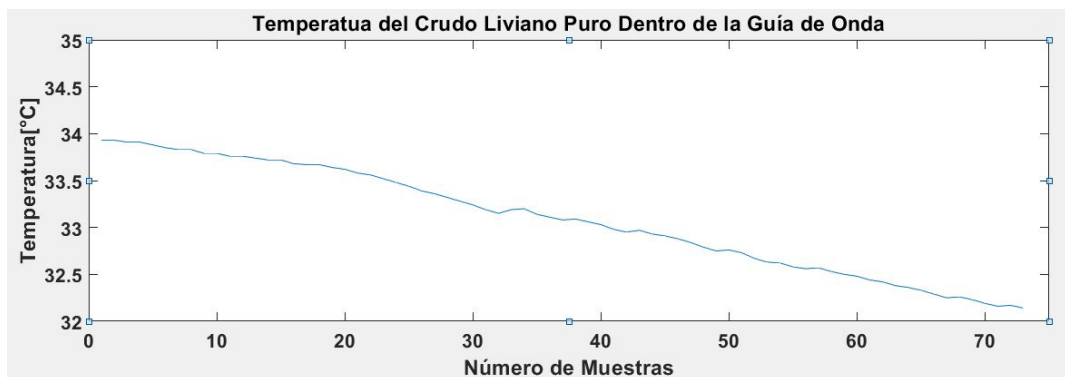
el magnetrón es apagado.

Figura 34. Gráfica de la temperatura del crudo liviano con magnetita dentro de la guía captada por los sensores, con tiempo de 45 segundos de calentamiento, realizada con el software MATLAB.



En la figura 35, se aprecia la gráfica obtenida con el software MATLAB, con los datos tomados por los sensores durante poco más de 35 segundos ya que cada muestra es tomada 0.5[s], se observa que la temperatura más alta que alcanzó a registrar es de casi 34°C, la cual si le sumamos los 35 grados que se pierden por la separación del sensor daría 69°C, temperatura cercana a la captada por la cámara térmica.

Figura 35. Gráfica de la temperatura del crudo liviano puro dentro de la guía captada por los sensores, con tiempo de 45 segundos de calentamiento, usando el software MATLAB.



Capítulo 6

CONCLUSIONES

- ❖ El diseño conceptual que se realizó en el software SolidWorks 2018, cumplió con los requisitos y objetivos del modelo funcional, haciéndolo factible para ser usado y asequible en costo final para poder llevar a cabo su construcción.
- ❖ El diseño y construcción del modelo funcional cumplió con lo que se realizó en el diseño conceptual, tanto en las dimensiones de cada componente y el ensamble general que estos debían tener así como los lugares donde debían ser ubicados, La construcción del modelo funcional de calentamiento por microondas, se logró llevar a cabo tanto con el uso de materiales nuevos, y reciclados de electrónica, los cuales presentaron un buen desempeño, similar a los análisis teóricos.
- ❖ En las numerosas pruebas que se realizaron con el modelo funcional y teniendo en cuenta que se comparó frente a un horno microondas para tener más fiabilidad de su funcionamiento, los resultados fueron muy similares entre sí, e incluso superiores en la guía para algunas pruebas, teniendo esto en cuenta, el funcionamiento del modelo funcional y su operación fueron las correctas y cumplió con lo que se requería.
- ❖ La geometría de los objetos es un aspecto importante al hablar de calentamiento por microondas, y este tuvo lugar también en el modelo funcional, puesto que dependiendo de la geometría del recipiente de las muestras, el calentamiento podía ser parcial o uniforme, por esta razón los recipientes usados eran de forma redonda.
- ❖ Ambos crudos durante las pruebas presentaron disminución de su viscosidad al calentarse, observación que sirve para concluir que la técnica de calentamiento

mediante microondas es viable.

REFERENCIAS

- [1] Curtis, C., Kopper, R., Decoster, E., Guzmán-García, A., Huggins, C., Knauer, L., Minner, M., Kupsch, N., Linares, L. M., Rough, H., et al. Yacimientos de petróleo pesado. *Oilfield Review*, *11* 23 (2003), 32–55.
- [2] Alboudwarej, H., Felix, J. J., Taylor, S., Badry, R., Bremner, C., Brough, B., Skeates, C., Baker, A., Palmer, D., Pattison, K., et al. La importancia del petróleo pesado. *Oilfield review* 18, 2 (2006), 38–58.
- [3] Miranda Pantoja José, Sebastián Franco José, Sierra Pérez Manuel, M. P. *INGENIERÍA DE MICROONDAS*. Madrid, 2002.
- [4] C. Rodrigo Correa Cely., M.Sc., M.Sc., P., and Oscar M. Reyes T., M. P. *Sobre El Efecto Térmico De Las Microondas (2.45 Ghz) En El Pavimento.*, primera ed. Bucara, 2007.
- [5] C. Rodrigo Correa C., M.Sc., M.Sc., P., Jhon F. Gómez, M., and Oscar M. Reyes T., M.Sc., P. *Modelado Y Simulación Del Proceso De Calentamiento Del Carburo De Silicio Con Microondas (2.45 Ghz)*, primera ed. Bucaramanga, 2008.
- [6] Pérez Páez Rocio. *Aplicación de Microondas en el Tratamiento de Emulsiones del Tipo Agua en Aceite (w/o) y Aceite en Agua(o/w)*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- [7] W. J. Klaila. “Method and apparatus for controlling fluency of high viscosity hydrocarbon fluids” U.S: 4067683, 1978.
- [8] N. O. Wolf. “Use of microwave radiation in separating emulsions and dispersions of hydrocarbons and water” U.S: 4582629, 1986.

- [9] Loranca Ramos, Y. A. *Líneas de Transmisión y guías de onda*. PhD thesis, Universidad de las Américas Puebla, 2003.
- [10] Mooijweer, H., and Cabezón Zumel, J. *Técnica de las microondas*, primera ed. 1974.
- [11] David K. Cheng. *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería - David K. Cheng*, primera re ed. 1998.
- [12] Martin R. Davidoff. *The Satellite Experimenter's Handbook*. 1984.

BIBLIOGRAFÍA

ALBOUDWAREJ, Hussein, *et al.* La importancia del petróleo. Oilfield review, 2006. p.38-54.

CHENG, David K. Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería. Pearson Educación, 1998. p.476. ISBN 968-444-327-7

CORREA CELIS, Rodrigo y REYES, Oscar Mauricio. Sobre el efecto tèrmico de las microondas (2.45 Ghz) en el pavimento. Bucaramanga: División Editorial y de Publicaciones UIS, 2007. p.139. ISBN 978-958-44-2547-8

CORREA CELIS, Rodrigo; REYES, Oscar Mauricio y GÓMEZ, Jhon. Modelado Y simulacion del proceso de calentamiento del carburo de silicio con microondas (2.45 Ghz). Bucaramanga: División Editorial y de Publicaciones UIS, 2008. p.125. ISBN 978-958-44-2769-4

DAVIDOFF, Martin R. The satellite experimenter's handbook. American Radio Relay League, 1984. p.207.

KLAILA, William J. Method and apparatus for controlling fluency of high viscosity hydrocarbon fluids. U.S. Patent No 4,067,683, 10 Ene. 1978.

MIRANDA PANTOJA, José, *et al.* Ingeniería de microondas. Madrid: Pearson Educación, 2002. p.384.

MOOIJWEER, H. Técnica de las microondas. Paraninfo, 1974. p.355. ISBN 978-84-283-0565-5

PÉREZ PÁEZ, Rocío. Aplicación de microondas en el tratamiento de emulsiones del tipo agua en aceite (w/o) y aceite en agua(o/w). Valencia, 2009.

RAMOS, Yolanda Angelica. Líneas de transmisión y guías de onda. 2003.

WOLF, Nicholas O. Use of microwave radiation in separating emulsions and dispersions of hydrocarbons and water. U.S. Patent No 4,582,629, 15 Abr. 1986.