

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL CONTROL DE TEMPERATURA EN  
LAZO CERRADO EN UN HORNO MICROONDAS PARA EL  
ESTUDIO DE LA EXTRACCION DE OLEORRESINA Y ACEITE  
ESENCIAL DE ESPECIES AROMATICAS DEL ECUADOR POR  
METODOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCONALES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**DIEGO MIGUEL CARRERA HERAS**

**diego.carrera01@epn.edu.ec**

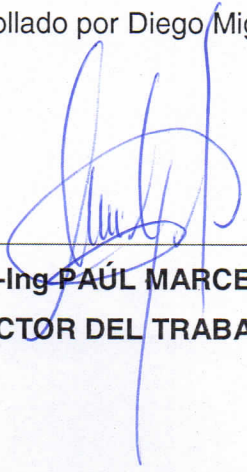
**DIRECTOR: Dr.-Ing PAUL MARCELO POZO PALMA**

**marcelo.pozo@epn.edu.ec**

**Quito, septiembre 2022**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Miguel Carrera Heras, bajo mi supervisión



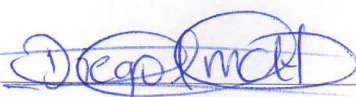
---

**Dr.-Ing PAÚL MARCELO POZO PALMA**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

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

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.



DIEGO MIGUEL CARRERA HERAS

# **DEDICATORIA**

(OPCIONAL)

# **AGRADECIMIENTO**

(OPCIONAL)

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	1
1.2 ALCANCE .....	2
1.3 MARCO TEÓRICO.....	2
1.3.1. Ondas microondas.....	2
1.3.2. Propagación de ondas electromagnéticas .....	5
1.3.3. Calentamiento por microondas .....	8
1.3.4. Rectificadores con diodos .....	12
1.3.5. Inversores monofásicos.....	14
1.3.6. Conversor de voltaje DC/DC.....	15
2. METODOLOGÍA .....	17
2.1. Modelamiento del Magnetrón.....	17
2.2. Dimensionamiento del transformador de voltaje .....	19
2.3. Duplicador de voltaje.....	20
2.4. Etapa de rectificación .....	21
2.5. Dimensionamiento del convertidor DC/DC tipo flyback.....	22
2.6. Dimensionamiento del convertidor DC/DC tipo Buck and Boost.....	23
2.7. Topologías armadas.....	24
2.7.1. Topología DC/DC.....	24
2.7.2. Topología DC/AC.....	25
2.8. Modelo de transferencia de la temperatura.....	25
2.9. Diseño de los reguladores en cascada para el control de los sistemas simulados.....	27

2.9.1.	Diseño del controlador pi por asignación de polos.....	27
2.9.2.	Regulador de lazo interno o corriente .....	29
2.9.3.	Regulador de potencia.....	30
2.9.4.	Regulador de temperatura o lazo externo.....	30
2.10.	Diseño de la interfaz hombre máquina (hmi) para visualizar los resultados del sistema .....	31
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
3.1	Índices de desempeño del controlador de potencia .....	35
3.2	Índices de desempeño del controlador de temperatura.....	36
3.3	Índices de desempeño del controlador de corriente .....	37
3.4	Controladores frente a cambios de referencia.....	37
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
4.1.	CONCLUSIONES.....	40
4.2.	RECOMENDACIONES .....	42
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43
	ANEXOS .....	45

## RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se plantea la simulación del sistema de calentamiento a lazo cerrado mediante ondas microondas creadas por un magnetrón. El propósito del trabajo de titulación es analizar la mejor opción para controlar la potencia entregada al elemento final de control, el magnetrón, mediante el diseño de diferentes topologías de electrónica de potencia. Las topologías propuestas en el apartado de la electrónica de potencia son una configuración DC/DC y una configuración DC/AC. Debemos entender que el magnetrón es el encargado de convertir el campo eléctrico y el campo magnético, suministrado, en ondas electromagnéticas las cuales son emitidas por una antena conectada a un conducto, en su gran mayoría de forma rectangular, y llega al objeto para proceder con el aumento de temperatura debido a la fricción entre moléculas dipolares existentes el mismo.

Para la simulación, se utilizará un software que me permita mostrar el modelamiento de mi planta compuesta por el objeto a controlar, el modelamiento del horno microondas, la electrónica de potencia y el arreglo en cascada de controladores para el funcionamiento eficiente de la planta. Los parámetros elegidos a controlar en el sistema en cascada serán la corriente que circula por el magnetrón, la potencia emitida por el magnetrón, y la temperatura del objeto a ser calentado.

**PALABRAS CLAVE:** magnetrón, control en cascada, DC/DC, AC/AC, campo eléctrico, potencia emitida, onda electromagnética.



## **ABSTRACT**

The present project shows the simulation of microwave heating in closed-loop control for a microwave oven. The purpose of this degree work is to analyze the best option for the power delivered to the magnetron by the power electronics device. The design of two different topologies using electronic power devices is DC/DC and DC/AC. We must understand that the magnetron is in charge of converting the electric field and the magnetic field, supplied into electromagnetic waves which are emitted by an antenna, connected to a conduit, mostly rectangular, and reaches the object to proceed with the increase in temperature due to friction between dipolar molecules. The element starts to elevate its temperature because it has dipolar molecules and the electromagnetic waves move them producing friction. That phenomenon is called energy transformation. In this case, we transform Kinetic energy into Thermal energy.

For the simulation, the software will be used allowing me to show the modeling of my plant composed of the object to be controlled, the modeling of the microwave oven, the power electronics, and the cascade arrangement of controllers for the efficient operation of the plant. The chosen parameters to control in the cascade system will be the current flowing through the magnetron, the power emitted by the magnetron, and the temperature of the object to be heated.

**KEYWORDS:** magnetron, cascade control, DC/DC, AC/DC, electric field, power, electromagnetic wave.

# 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, los elementos electrónicos han permitido un gran avance tecnológico en la sociedad, y muchas veces, los descubrimientos realizados han sido por casualidad de fenómenos que suceden a nuestro alrededor. Este es el caso del magnetrón, el cual en sus inicios fue utilizado como radar en la segunda guerra mundial, pero también se observó que la radiación emitida por el radar o magnetrón calentaba objetos cercanos a él. Con dicho suceso se empezó a investigar la fuente de este proceso y se obtuvo el magnetrón tradicional para hornos microondas, el cual permite el calentamiento de elementos que contengan moléculas dipolares. El magnetrón necesita de un campo magnético y un campo eléctrico para producir ondas electromagnéticas con la potencia necesaria para el aumento de temperatura del objeto introducido en el horno. Este tipo de magnetrón utiliza un campo magnético constante producido por imanes permanentes, caso contrario, el campo eléctrico es producido por la electrónica de potencia implementada para el control del magnetrón. Con el paso del tiempo se han utilizado diferentes tipos de configuraciones de elementos de potencia para el control del magnetrón, siendo el caso de este proyecto, el diseño de una topología DC/DC y una topología DC/AC para controlar el calentamiento del objeto mediante controladores PID en cascada.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

Realizar un estudio y análisis del control de temperatura en lazo cerrado en un horno microondas para el estudio de la extracción de oleorresina y aceite esencial de especias aromáticas del Ecuador por métodos no convencionales.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre las topologías de inversores monofásicos y topologías de convertidores DC-DC para sistemas de microondas.
- Modelar la planta a controlar por el objeto a ser calentado, el magnetrón del microondas y la electrónica de potencia.
- Proponer y diseñar dos topologías de electrónica de potencia, una DC/AC y otra DC/DC para el control de potencia del magnetrón de microondas.

- Realizar pruebas, analizar y evaluar los resultados del control en cascada de temperatura en un microondas ante cambios de referencias para lo cual se utilizarán índices de desempeño.

## **1.2 ALCANCE**

- Se realizará la búsqueda bibliográfica que permita obtener el sustento teórico para el estudio, diseño y simulación de las distintas topologías de inversores totalmente controlados monofásicos y topologías de convertidores DC – DC para el control de la potencia de sistemas de microondas.
- Se realizará el modelamiento de la planta a controlar compuesta por el objeto a ser calentado, el magnetrón del microondas y la electrónica de potencia.
- Se propondrá y diseñarán dos topologías de electrónica de potencia, una DC/AC y otra DC/DC para el control de potencia del magnetrón de microondas.
- Se realizará el diseño de una regulación PI para el control en lazo cerrado de la temperatura del objeto calentado por el sistema de microondas.
- Se implementarán los diseños y modelos anteriores en herramientas de simulación.
- Se realizarán pruebas, se analizarán y evaluarán los resultados del control en cascada de temperatura en un microondas ante cambios de referencias para lo cual se utilizará índices de desempeño.

## **1.3 MARCO TEÓRICO**

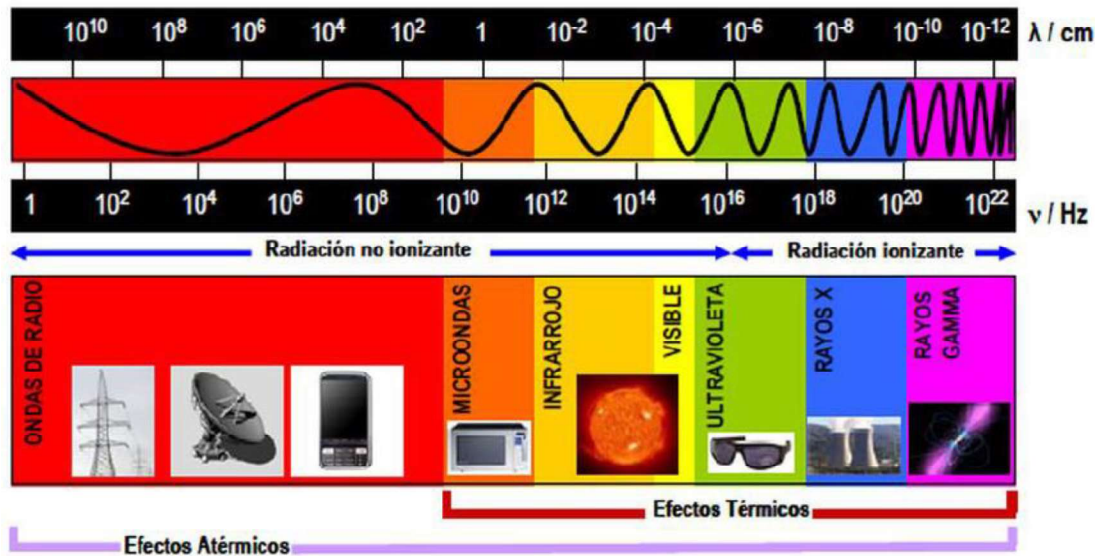
En el presente capítulo se presenta los conceptos teóricos referente al calentamiento empleando ondas microondas, convertidores estáticos de potencia, inversores monofásicos, elevadores de voltaje, así como de controladores en lazo cerrado.

### **1.3.1. Ondas microondas**

El descubrimiento de la radiación por microondas tuvo lugar de forma accidental por los astrónomos Arno Penzias y Robert Wilson al probar una vieja antena de microondas. Notaron que existía un ruido al obtener datos, por lo cual al investigar a fondo dicho fenómeno se encontraron con que era el “eco” del Big Bang que originó el universo. En

otras palabras, se asemeja a un objeto que se enfría por la tremenda energía emitida por el Big Bang, aumentando su longitud de onda y disminuyendo su energía.

Las ondas microondas son radiación electromagnética que se encuentran en la banda de frecuencias desde los 300 MHz hasta los 300GHz como se puede observar en la figura 1.



**Figura 1.3.1.** Bandas de frecuencia

Al ser ondas electromagnéticas se debe tener en cuenta que son la combinación de un campo eléctrico y campo magnético perpendiculares entre sí, las cuales se propagan por el espacio transportando la energía de un lugar a otro a la velocidad de la luz, considerando que el medio de propagación es el vacío.

Para analizar el comportamiento de las ondas electromagnéticas, nos basamos en las ecuaciones de Maxwell. Dichas ecuaciones demostraron que la electricidad, el magnetismo y la luz son manifestaciones del mismo fenómeno llamado campo electromagnético.

Mediante las siguientes ecuaciones fundamentales de Maxwell, los campos electromagnéticos se propagan a través de medios dieléctricos o magnéticos.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt}$$

### Ecuación 1.3.1. Ecuaciones de Maxwell generales.

Donde :

- $\vec{E}$  es el vector intensidad de campo eléctrico.
- $\vec{D}$  es el desplazamiento eléctrico.
- $\vec{B}$  es el vector inducción magnética.
- $\vec{H}$  es el vector intensidad de campo magnético.
- $\vec{J}$  es la densidad superficial de corriente.
- $\rho$  es la densidad de carga volumétrica.
- $\epsilon$  es la permitividad eléctrica.
- $\mu$  es la permeabilidad eléctrica.

Para el caso de materiales lineales e isotrópicos utilizamos las siguientes ecuaciones que relacionan las intensidades de campo eléctrico y magnético con la inducción magnética y el desplazamiento eléctrico.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

### Ecuación 1.3.2. Ecuaciones par un medio lineal

Para medios dieléctricos perfectos sin cargas ni corrientes de conducción, puede considerarse  $\rho = 0$  y  $\vec{J} = 0$ .

Cuando consideramos ondas electromagnéticas en el espacio libre, observamos que el medio carece de fuente ( $\rho = \vec{J} = 0$ ), por lo cual las ecuaciones de Maxwell se escriben solo en términos de la intensidad de campo eléctrico e intensidad de campo magnético.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{d\vec{D}}{dt}$$

### **Ecuación 1.3.3.** Ecuaciones de Maxwell en el espacio libre.

Para obtener la ecuación de ondas, consideramos un medio sin cargas libres: sin densidad de carga, lineal y homogéneo. Utilizando las ecuaciones de Maxwell en el espacio libre junto a las ecuaciones de Maxwell generales obtenemos la ecuación de ondas básica.

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \frac{d\vec{D}}{dt}$$

### **Ecuación 1.3.4.** Ecuación de ondas planas

Expresando la ecuación 1.3.4. en función del campo eléctrico obtenemos:

$$\nabla^2 \vec{E} = \sigma \mu \frac{d\vec{E}}{dt} + \epsilon \mu \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2}$$

### **Ecuación 1.3.5.** Ecuación de ondas planas en función de $\vec{E}$

La ecuación de ondas planas en función del campo magnético es análoga a la ecuación 1.3.5.

$$\nabla^2 \vec{B} = \sigma \mu \frac{d\vec{B}}{dt} + \epsilon \mu \frac{d^2 \vec{B}}{dt^2}$$

### **Ecuación 1.3.6.** Ecuación de ondas planas en función de $\vec{B}$

## **1.3.2. Propagación de ondas electromagnéticas**

En este apartado se estudiara la propagación de las ondas electromagnéticas y el efecto que produce en el medios de propagación en las mismas. El sentido de propagación de las ondas electromagnéticas, producidas por el campo eléctrico en la dirección del eje X y el campo magnético en la dirección del eje Y, se producen en la dirección del eje Z. Se toman las direcciones de los ejes de coordenadas para simplificar su estudio y comprenderlas de mejor manera. Se debe tener en cuenta que las ondas se propagan en hacia adelante y hacia atrás, pero por simplicidad del estudio se toma la dirección positiva del eje Z, es decir hacia adelante en el sentido de propagación.

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell en el espacio libre podemos llegar a la ecuación de Helmholtz en el espacio libre.

$$\nabla^2 \vec{E} = -k^2 \vec{E}$$

**Ecuación 1.3.6.** Ecuación de Helmholtz en el espacio libre.

Al expandir la ecuación de Helmholtz obtenemos una ecuación diferencial parcial de segundo orden.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = -k^2 E$$

**Ecuación 1.3.7.** Ecuación de Helmholtz en ecuación diferencial parcial de segundo.

Al suponer una onda plana uniforme, la cual no tiene variación en el eje x o y, la ecuación se reduce a

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = -k^2 E$$

**Ecuación 1.3.8.** Ecuación de Helmholtz en ecuación diferencial parcial de segundo reducido.

La solución de la ecuación diferencial de segundo orden es la siguiente la cual expresa la propagación en ambos sentidos:

$$E(z) = E e^{-jkz} + E' e^{jkz}$$

**Ecuación 1.3.9.** Solución ecuación de diferencias.

El valor del número de onda k depende del medio en el que se propague la onda electromagnética. En el vacío el valor de k se obtiene de la siguiente manera:

$$k = k_0 = \frac{\omega}{c} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

**Ecuación 1.3.10.** Número de onda para propagación en el vacío.

Al contrario de la propagación en el vacío, el análisis de propagación de ondas electromagnéticas en medios dieléctricos se amplía. Para el análisis suponemos que el medio es homogéneo ( $\mu$  y  $\epsilon$  son constantes) e isotrópico ( $\mu$  y  $\epsilon$  varían con la orientación del campo). El número de onda que se presenta en la ecuación 1.3.11 tiene un valor complejo y se conoce como constante de propagación compleja.

$$k = k_0 \sqrt{\mu_r \epsilon_r} = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$$

**Ecuación 1.3.11.** Número de onda para propagación en medios dieléctricos.

Cuando a un material conductor se le aplica el campo eléctrico surge un efecto llamado inducción de carga, esto provoca que los electrones libres se desplacen en dirección

contraria al campo aplicado. Dicho efecto provoca acumulación de cargas positivas y negativas en superficies opuestas del conductor lo cual produce un campo eléctrico opuesto al aplicado lo cual compensa entre los dos, formando un campo eléctrico nulo en el interior del conductor.

Por lo contrario, en un material dieléctrico las cargas poseen poca movilidad debido a que se encuentran ligadas a la estructura, por lo cual el campo produce la orientación de los dipolos. Dentro del material dieléctrico se mantiene compensadas las cargas, pero aparecen cargas superficiales a los lados del dieléctrico, lo cual provoca un apantallamiento parcial.

Para entender estos procesos físicos que ocurren dentro del material dieléctrico y como afectan el campo eléctrico de la onda y su polarización nos basamos en la permitividad relativa.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'')$$

**Ecuación 1.3.12.** Permitividad compleja.

La parte real se denomina constante dieléctrica, la cual determina la cantidad de energía electrostática almacenada por unidad de volumen en el material, y la parte imaginaria es el factor de pérdidas que representa la energía disipada en forma de calor.

Existen también pérdidas magnéticas y se explican mediante la permeabilidad compleja. Debido a que la respuesta magnética es pequeña en comparación con la respuesta del dieléctrico en los materiales que propagan la onda, se considera que  $\mu \approx \mu_0$ . Esto permite que el estudio de pérdidas se enfoque a lo descrito por la permitividad compleja, y que la permeabilidad es real. De tal manera que la constante de propagación compleja se puede expresar en función de la constante de atenuación ( $\alpha$ ) y la constante de propagación ( $\beta$ ).

$$jk = \alpha + j\beta$$

**Ecuación 1.3.13.** Constante de propagación compleja.

El valor de la constante de propagación en función de la permitividad relativa y la permeabilidad relativa se obtiene con la ecuación 1.3.14.

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \omega\sqrt{\mu(\varepsilon' - j\varepsilon'')} = \omega\sqrt{\mu} \sqrt{1 - j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}}$$

**Ecuación 1.3.14.** Constante de propagación.



Podemos observar que en la ecuación 1.3.14 encontramos un término que es la relación entre el factor de pérdidas y la constante dieléctrica, la cual se conoce como tangente de pérdidas.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

**Ecuación 1.3.15.** Tangente de pérdidas.

El efecto de la tangente de pérdidas se nota en la atenuación, ya que aumenta proporcionalmente con la frecuencia, y a su vez es proporcional a la permeabilidad del material. Además, por medio de este parámetro se conoce la capacidad de un material para calentarse en presencia de microondas.

De la ecuación 1.3.9 utilizamos la propagación hacia adelante, la combinamos con la ecuación 1.3.13 y obtenemos el campo eléctrico instantáneo el cual se conoce como una onda plana uniforme con fase constante.

$$E = E_0 e^{-jkz} = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z)$$

**Ecuación 1.3.16.** Campo eléctrico instantáneo.

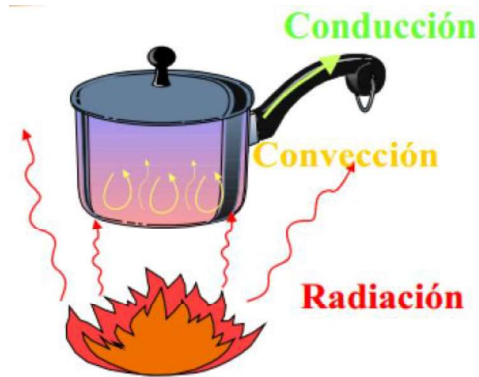
En el cual  $E_0$  es el máximo valor del campo eléctrico en el material. Esta ecuación nos permite interpretar el campo eléctrico en el calentamiento de las ondas microondas en los materiales.

El campo eléctrico dentro del dieléctrico es constante a lo largo del eje "x" y decae en la dirección del eje "y" a medida que atraviesa el material. Este tipo de decaimiento es de tipo exponencial y se relaciona con el tratamiento de productos alimenticios con microondas debido a que tiene un factor de pérdida alto.

### **1.3.3. Calentamiento por microondas**

El calor es la energía cinética total del sistema a nivel atómico o molecular.

La temperatura es un promedio de la energía cinética de los átomos en el sistema. Al tener dos cuerpos distintas temperaturas y se ponen en contacto, se produce transferencia de calor. El incremento de temperatura en los objetos es debido a la oscilación existente entre sus partículas debido a dicha transferencia de calor. Existen diferentes mecanismos que producen cambios en la temperatura como: conducción, convección y radiación.



**Figura 1.3.2.** Tipos de calentamiento.

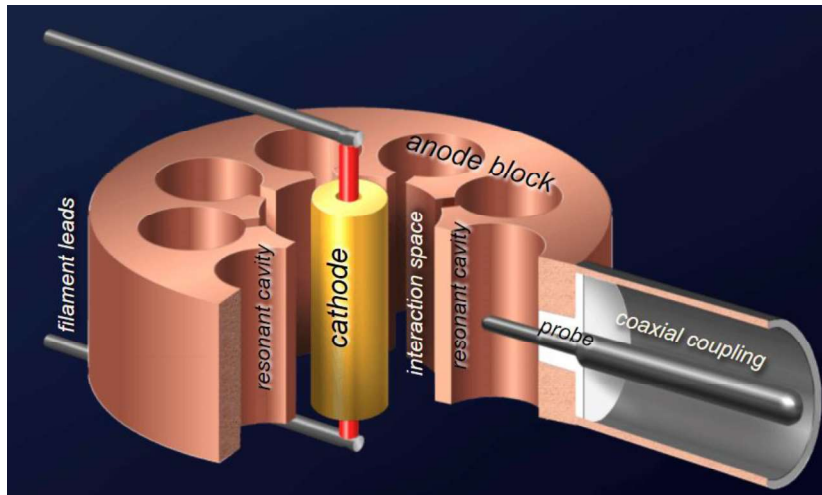
La conducción de calor es el mecanismo de transferencia a escala atómica a través de la materia al existir choque de unas moléculas con otras. Las partículas con más energía entregan a las de menos energía, produciendo flujo de calor de temperaturas altas a las temperaturas bajas. Los elementos que son buenos conductores de calor por conducción con los metales.

La convección se produce debido a la circulación de masa dentro de la sustancia. Tiene dos formas de ser producidas: natural el cual se produce solo por sus diferencias de densidades, y forzada en la cual se obliga a mover a la materia. Este proceso de calentamiento se produce en líquidos y sólidos. Un ejemplo de convección forzada

La radiación térmica es energía que se emite desde un emisor, que se encuentra a una temperatura dada, hacia fuera de él en diferentes direcciones. Este tipo de energía se la denomina radiación térmica, la cual es producida por cambios a nivel atómico y es transportada por ondas electromagnéticas. A diferencia de los otros tipos de calentamiento, la radiación electromagnética no necesita un medio para propagarse, por lo tanto, para conocer su poder de penetración de dicha energía, se necesita saber su longitud de onda y la frecuencia de la onda.

El calentamiento por microondas se debe a un elemento llamado magnetrón el cual se asemeja a un tubo de vacío. Dicho objeto fue creado en la segunda guerra mundial como un efectivo radar. El fenómeno de calentamiento de objetos fue descubierto por el doctor Percy Spencer, el cuál notó que al acercarse al radar, el dulce en su bolsillo se había derretido.

La disposición física del magnetrón es de un bloque de cobre perforado con hoyos llamado cavidades, las cuales deben tener un tamaño específico para establecer la frecuencia de operación del magnetrón.

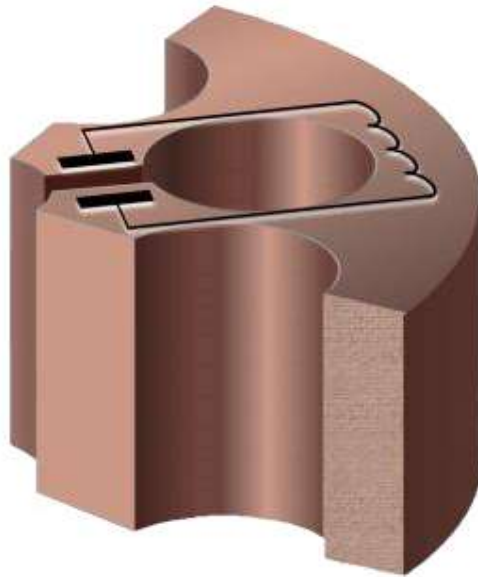


**Figura 1.3.3.** Partes del magnetrón.

El cátodo, ubicado en el centro del magnetrón, es calentado por un filamento para poder emitir electrones. Este proceso se asemeja a un tubo de vacío de vidrio. Un campo magnético estático, creado por imanes permanentes, es alineado con el eje del núcleo del magnetrón el cual es el causante que los electrones viajen en un patrón de flujo circular hacia el anillo exterior, es decir, hacia el ánodo. El campo magnético desvía los electrones y viajan alrededor del cátodo como una nube de electrones. Al hacerlo, crean una oscilación en las cavidades del magnetrón, ubicadas en el ánodo, las cuales se comportan como filtro LC, como se indica en la figura 1.3.4 para crear la frecuencia resonante deseada, es decir, la frecuencia de resonancia es determinada por las dimensiones físicas de las cavidades. La corriente resultante alrededor de las cavidades hace que irradian energía electromagnética a la frecuencia resonante según muestra la ecuación 1.3.6. Cabe recalcar que el magnetrón es un dispositivo de frecuencia fija.

$$\nu_{res} = \frac{1}{\sqrt{L/C}} \text{ [Hz]}$$

**Ecuación 1.3.17.** Ecuación de frecuencia de resonancia.

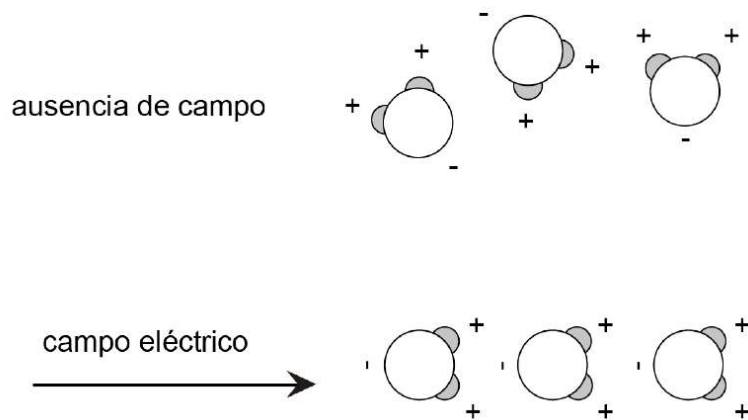


**Figura 1.3.4.** Cavidad resonante del ánodo del magnetrón.

La energía del bloque es capturada por un acoplamiento coaxial con una sonda que es insertada lateralmente en una cavidad, la cual funciona como antena receptora de energía electromagnética.

Luego de dicho suceso creó una caja metálica para evitar que las ondas microondas escaparan y analizar los fenómenos que producía la radiación microondas en diferentes tipos de alimentos. Esto provocó un campo electromagnético de mayor densidad el cual producía un rápido incremento de temperatura en los alimentos introducidos en la caja.

Las partículas o moléculas al ser inyectadas con ondas microondas tienden a orientarse en dirección del campo eléctrico como se puede observar en la figura 1.3.2.



**Figura 1.3.5.** Polarización de moléculas en presencia de campo eléctrico.

Para evitar perturbaciones en el sector de las telecomunicaciones, el espectro electromagnético se encuentra restringido tanto a frecuencias susceptibles como a ancho de banda. Por lo cual las frecuencias comunes para el calentamiento con microondas son 2450 MHz y 915 MHz.

Puesto que el campo eléctrico es oscilatorio, las moléculas oscilarán a la razón de dicha oscilación, colisionando unas con otras, provocando un aumento de temperatura. Este proceso se lo denomina “Calentamiento por polarización dipolar”. El calentamiento por polarización dipolar se aplica a moléculas dipolares como es el caso del agua, lo cual es distinto para sustancias iónicas en se denomina “Calentamiento por conducción iónica”.

El flujo de potencia asociado de una onda electromagnética se la puede obtener con el teorema de Poynting. Expresa la densidad de la potencia instantánea en vatios por metro cuadrado.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} [W/m^2]$$

**Ecuación 1.3.18.** Teorema de Poynting.

Al integrar el vector de Poynting a lo largo de la superficie y aplicando el teorema de divergencia con la leyes de Maxwell, obtenemos la potencia media disipada por unidad de volumen, la cual está en función del factor de pérdidas y de los valores pido del campo eléctrico.

$$P = \frac{1}{2} 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' \int_V \vec{E} \cdot \vec{E}^* dV [W/m^3]$$

**Ecuación 1.3.19.** Potencia media disipada.

El calor generado o potencia por unidad de volumen se expresa en la ecuación 1.13.20.

$$Q_{gen} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}_{rms}|^2$$

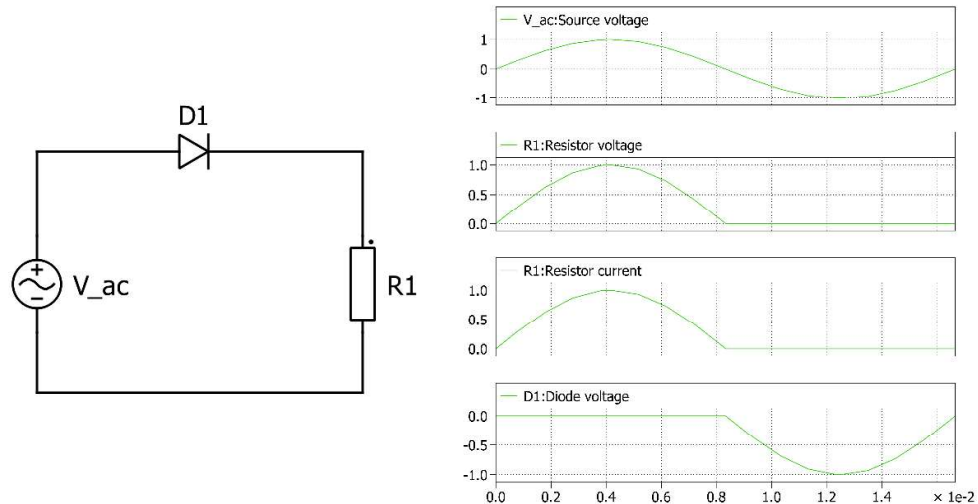
**Ecuación 1.3.19.** Potencia media disipada.

En un cuerpo, el calor generado es proporcional a la frecuencia, al factor de pérdidas del material y al cuadrado del campo eléctrico.

**1.3.4. Rectificadores con diodos**

El rectificador en un circuito eléctrico, cumple la acción de convertir la señal alterna (AC) en señal continua (DC). Según el tipo de alimentación, tenemos rectificadores monofásicos y rectificadores trifásicos. Este tipo de rectificadores, al utilizar diodos, son circuitos no controlados que van de la mano con filtros para evitar ondulaciones y tener una señal cuasi continua. Tenemos dos tipos de circuito básicos para la rectificación monofásica, rectificación de media onda y rectificación de onda completa.

La rectificación de media onda utiliza un solo diodo, y es el más utilizado en fuentes de bajo costo. Para este tipo de configuración, como se observa en la figura 1.3.6, el diodo permite el paso del semiciclo positivo del voltaje de entrada hacia la resistencia R1. Caso contrario, con el semiciclo negativo de la entrada, debido a que el diodo no se polariza directamente, no permite el paso de corriente.



**Figura 1.3.6.** Rectificador de media onda.

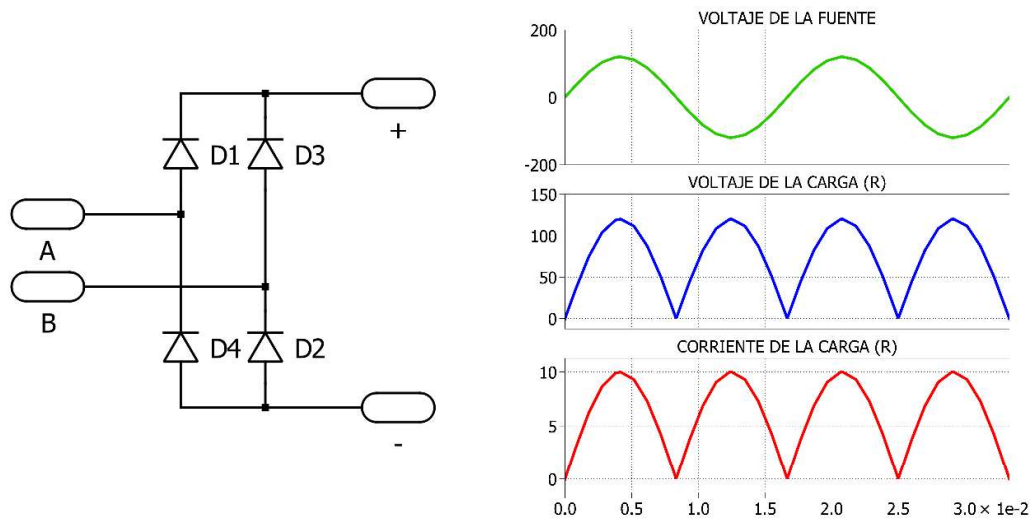
Este tipo de señal ya rectificada que se muestra en la carga es DC, ya que no posee valores negativos, pero contiene componentes armónicas que pueden afectar a los componentes electrónicos y a su red de alimentación principal. Realizando cálculos del voltaje medio obtenemos:

$$V_{DC} = 0.318V_m$$

**Ecuación 1.3.20.** Voltaje DC rectificador media onda.

El puente de diodos o rectificador de onda completa, los diodos D1 y D2 se polarizan, permitiendo el paso de la corriente y de la señal de voltaje del semiciclo positivo de la fuente, como se observa en la figura 1.3.7. En la segunda mitad del período de mi señal,

los diodos D3 y D4 se polarizan, permitiendo el paso de corriente y de la señal de voltaje del semiciclo negativo de la fuente. El resultado de dicho proceso se puede observar en el voltaje y corriente de la carga. Esta siempre va a ser positiva debido a la configuración de los diodos, y se aprovecha la energía de mi fuente en su totalidad.



**Figura 1.3.7.** Rectificador de media onda.

Obteniendo el voltaje DC de la configuración puente de diodos.

$$V_{DC} = 0.636V_m$$

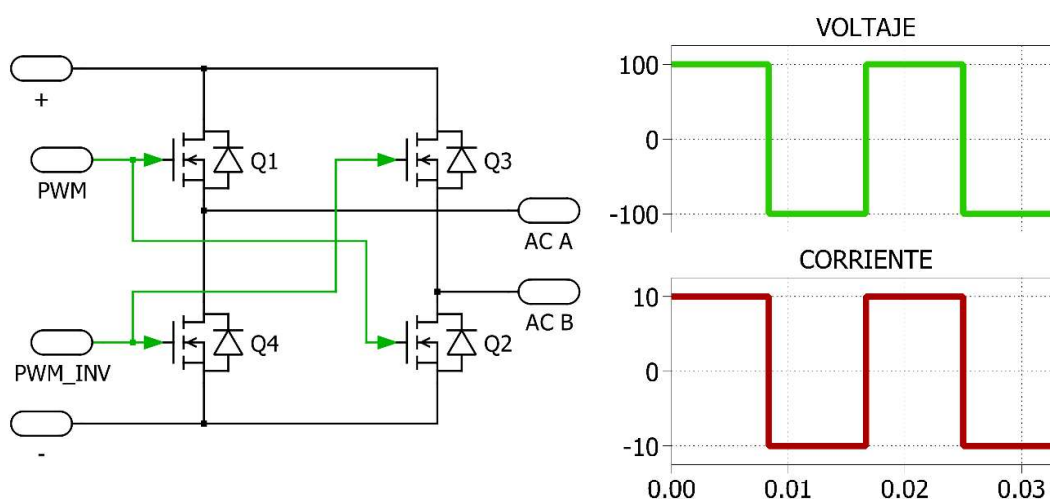
**Ecuación 1.3.20.** Voltaje DC rectificador media onda.

Este tipo de rectificadores, a la salida se coloca una capacitor para reducir el rizado del mismo.

### 1.3.5. Inversores monofásicos

Un inversor monofásico es un arreglo de semiconductores controlados por una señal PWM los cuales permiten cambiar el voltaje de entrada DC en un voltaje de salida AC deseado y en una frecuencia deseada. Para variar el valor de voltaje AC se tiene dos opciones; la primera opción es variar el voltaje de entrada DC sin variar la señal de control, y la segunda es no variar el voltaje de entrada DC y variar la señal de control. La forma de onda esperada es de tipo sinusoidal, pero al ser un inversor monofásico, el tipo de onda que obtendremos es de forma cuadrada. Los inversores tiene muchas utilidades como en variadores de velocidad, UPS, calentamiento por inducción, etc.

El inversor monofásico de puente completo posee cuatro semiconductores Q1, Q2, Q3 y Q4. Cuando Q1 y Q2 se encuentran en zona de saturación, Q3 y Q4 se encuentran en zona de corte, esto permite el paso del voltaje DC a la carga en la mitad del período deseado. Cuando Q3 y Q4 se encuentran en zona de saturación, Q1 y Q2 se encuentran en zona de corte, esto permite el paso del voltaje DC a la carga en la mitad del período deseado pero con signo contrario, completando mi señal de voltaje AC. La forma de voltaje AC y su corriente se puede observar en la figura 1.3.8. En aplicaciones que se necesita baja potencia se pueden aceptar este tipo de onda (cuadrada). Caso contrario, en aplicaciones que se necesitan altas potencias, las formas de onda sinusoidales deben tener poca distorsión.

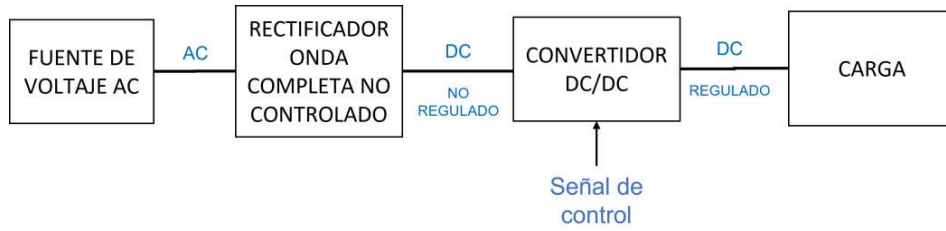


**Figura 1.3.8.** Inversor monofásico configuración puente completo.

### 1.3.6. Conversor de voltaje DC/DC

Los convertidores DC/DC o convertidores de modo de conmutación son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales y domésticas debido a su tipo de funcionamiento regulable, es decir, dependiendo de la topología de construcción podemos aumentar o disminuir la magnitud de voltaje y corriente a la entrada del convertidor. La figura 1.3.9 nos muestra un esquema de cómo es (de forma general) la composición de dichos elementos, teniendo una etapa de rectificación con su etapa de filtrado, la cual nos permite obtener una fuente de alimentación no regulada. La siguiente etapa es el conversor DC/DC, quien es el encargado de regular la señal DC de entrada, a lo requerido por mi carga mediante una señal de control.





**Figura 1.3.9.** Diagrama de flujo .

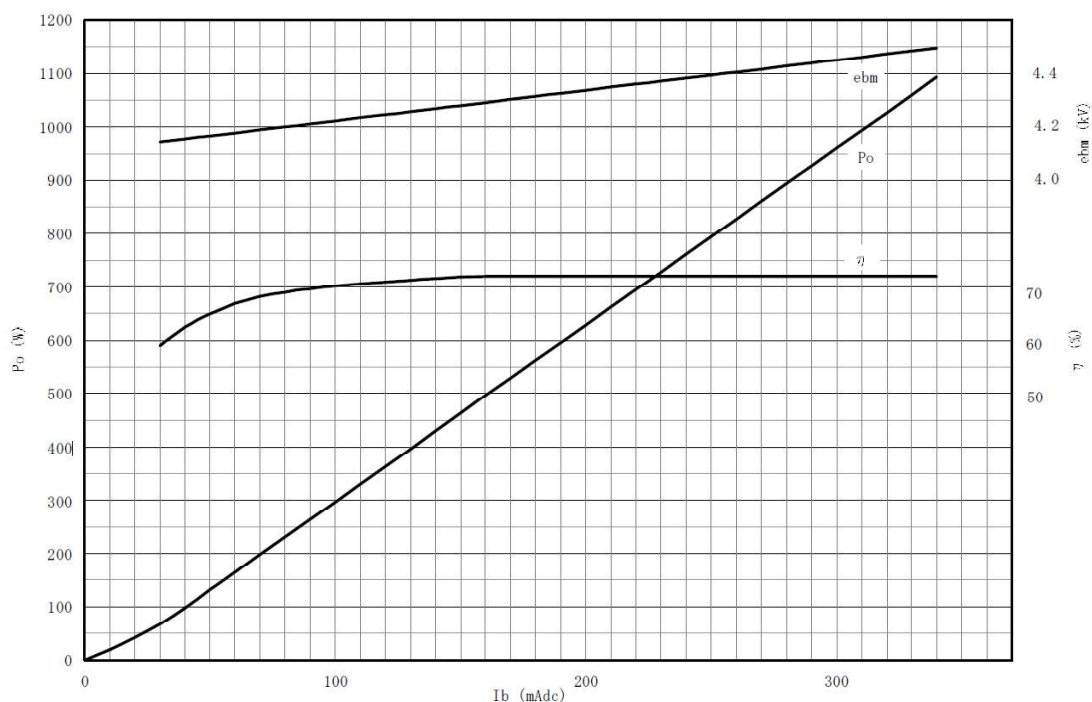
Existen varias topologías de convertidores DC/DC en los cuales poseemos convertidores aislados y no aislados. La característica principal de los convertidores de potencia aislados es el uso de un transformador.

## 2. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el proceso de modelamiento del sistema, y dimensionamiento de los elementos de los distintos tipos de sistemas para el control de temperatura del horno microondas

### 2.1. Modelamiento del Magnetrón

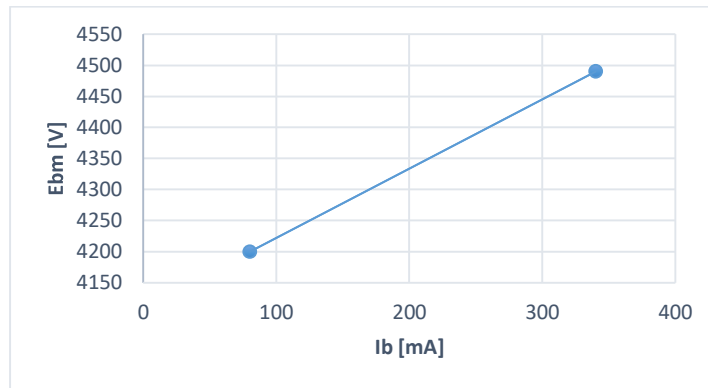
El magnetrón es el encargado de convertir la energía eléctrica en ondas microondas gracias a su diseño. Para analizar el estado de operación del magnetrón, debemos comprender que el mismo se comporta como un tubo de vacío, y se lo representa con un diodo ideal con su respectivo voltaje umbral o de ruptura, y una resistencia, todos conectados en serie. Tal como se muestra en la figura 2.1., el magnetrón no trabaja si no ha pasado el voltaje umbral, en este lapso de tiempo, el cátodo se calienta para poder emitir electrones y crear la nube de electrones en la cavidad del magnetrón.



**Figura 2.1.** Gráfica de Voltaje, Potencia vs corriente del magnetrón 2M261-M32J1

Los parámetros para el funcionamiento en el modo oscilatorio del magnetrón se obtienen del gráfico de rendimiento presentado en la figura 2.1. El valor de la resistencia en el modo de oscilación se obtiene de la gráfica entre el voltaje y la corriente presentado en la figura 2.2. en la cual se puede observar que la tendencia de la curva es lineal por lo cual se

obtendrá una ecuación lineal la cual nos los valores de corriente para la zona de oscilación entre 30mA a 340mA para una óptimo trabajo del mismo.



**Figura 2.2.** Gráfica de Voltaje vs Corriente del magnetrón 2M261-M32J1

En este lapso, primero obtenemos la pendiente la recta el cual es el valor de la resistencia en modo oscilatorio.

$$R_{osc} = m = \frac{V_{max} - V_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (2.1)$$

$$R_{osc} = m = \frac{4,49kV - 4,2kV}{340mA - 80mA} \quad (2.2)$$

$$R_{osc} = 1115,38 \Omega \quad (2.3)$$

Con el resultado anterior podemos obtener el valor de corte con el eje “y” de la ecuación de voltaje en función de la corriente.

$$e_{bm} = R_{osc} * I_b + b \quad (2.4)$$

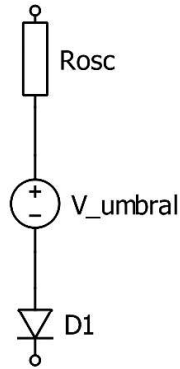
$$4,49kV = 1115,38\Omega * 340mA + b \quad (2.5)$$

$$b = 4110,77 V \quad (2.6)$$

Finalmente, obtenemos la ecuación de voltaje en función de la corriente en la zona de oscilación. Esta ecuación nos permite obtener los voltajes correspondientes al rango de corrientes en el modo oscilatorio, teniendo así rangos de voltaje de [4144,22kV ; 4490kV] respectivamente con los rangos de corriente DC [30mA ; 340mA], siendo el voltaje de 4144, 22kV el voltaje umbral para que inicie su funcionamiento.

$$e_{bm} = 1115,38\Omega * I_b + 4110,8 V \quad (2.7)$$

El modelo eléctrico del magnetrón es expresado con los valores obtenidos de la resistencia de oscilación (Rosc), el voltaje mínimo de trabajo (V\_umbral) en conjunto con un diodo ideal (D1).



**Figura 2.2.** Modelo eléctrico del magnetrón

La eficiencia de magnetrón oscila entre el 60% al 86%. Esto se debe al calentamiento que sufre el mismo cuando está en operación, haciendo que la potencia de salida se reduzca considerablemente. El modelo de magnetrón utilizado nos entrega una potencia de 895W a una frecuencia de 2450 MHz ya considerado la eficiencia del elemento.

## 2.2. Dimensionamiento del transformador de voltaje

Las especificaciones las cuales requerimos para nuestro transformador para optimizar el trabajo de mi magnetrón son los siguientes:

**Tabla 2.1.** Datos del transformador

Potencia de salida	1200 W
Voltaje primario	140 V
Voltaje Secundario (alto voltaje)	2400 V
Voltaje secundario (bajo voltaje)	3.3V
Relación de transformación	0.06
Frecuencia de trabajo	20 kHz
Inductancia	≤1 mH

El transformador para nuestro diseño posee un devanado primario y dos devanados secundarios, en el cual vamos a tener una relación de transformación para el devanado de alto voltaje como se muestra en la ecuación 2.8.

$$\frac{N1}{N2} = \frac{120}{2000} \quad (2.8)$$

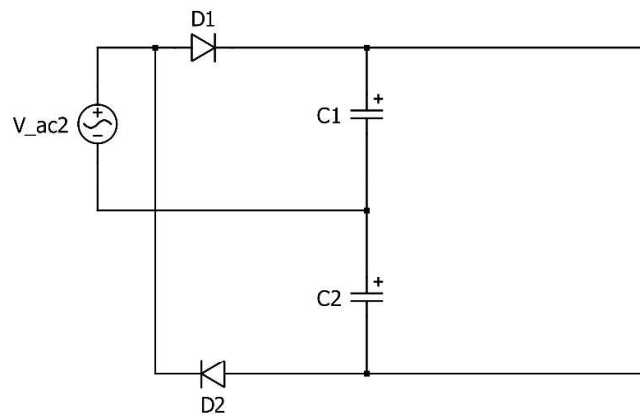
La segunda relación de transformación es para el filamento en el cual está conectado el cátodo. La relación de transformación es menor debido a que necesitamos una corriente alrededor de los 10 A, con un voltaje de 3.3 V para que se pueda realizar la emisión de electrones.

$$\frac{N1}{N3} = \frac{120}{3} \quad (2.9)$$

Con los datos requeridos para el sistema, la mejor opción es un transformador de núcleo de ferrita, debido a la frecuencia a la que vamos a trabajar. En este caso con los datos requeridos, se analiza distintos tipos de fabricantes siendo uno de ellos el fabricante PHOEGON los cuales permiten personalizar el transformador requerido.

### 2.3. Duplicador de voltaje

El voltaje a obtener en el lado del devanado secundario (alto voltaje), va a ser un límite de 2000 V. Por tal motivo creamos una etapa de duplicado de voltaje. El modelo sugerido para esta acción es el duplicador de voltaje de onda completa como se observa en la figura 2.3



**Figura 2.2.** Duplicador de voltaje de onda completa

En el semiciclo positivo, el diodo D1 se polariza, permitiendo que el capacitor C1 se cargue con el voltaje pico del devanado de alto voltaje y el diodo D2 no se polariza. Para el semiciclo negativo, el diodo D2 se polariza cargando al capacitor C2 con el voltaje pico del devanado de alto voltaje. El resultado de este proceso es tener en los terminales finales la suma de voltajes de los capacitores C1 y C2, lo cual da como voltaje el doble del valor de voltaje pico del devanado de alto voltaje.

Para dimensionar los diodos se toma el voltaje inverso piso del transformador con un factor de tolerancia del 10%.

$$Vm = Vp * 1.1 = 2420 V \quad (2.10)$$

Para la corriente, el magnetrón trabaja a corrientes pequeñas como se especificó en enunciados anteriores por lo cual la máxima corriente que obtendremos es de 340mA, colocando así una tolerancia del 10% tenemos:

$$I_{DC} = 340mA * 1.1 = 374 mA \quad (2.11)$$

Para el cálculo de los capacitores, utilizamos el siguiente valor de 1% de rizado, la frecuencia de trabajo del sistema, el voltaje máximo de trabajo del magnetrón en el ragnogo antes dado y la corriente a utilizar.

$$C_T = \frac{0.303A^2}{20kHz * 4.49kV * 0.01} \quad (2.9)$$

$$C_T = 0.6748\mu F$$

Siendo este el valor de los dos capacitores. Al dividir para dos la cifra tenemos un valor aproximado de 0.33uF para cada capacitor. Este es un valor referencial, por lo cual a partir de este valor podemos colocar valores más grandes acorde con el voltaje necesario para el mismo.

## 2.4. Etapa de rectificación

Comprende el diseño del rectificador monofásico tipo puente completo no controlado. Esta etapa permite el cambio de voltaje alterno a voltaje continuo para la alimentación de los conversores DC/DC.

Para dimensionar los diodos a necesitar, nos basamos en el peor caso de operación, que es el voltaje pico inverso.

$$V_{inv} = 2 * V_{in} * 1.41 = 339.4 V \quad (2.12)$$

Además se debe calcular la corriente DC considerando la potencia que va a consumir el magnetrón.

$$I_{DC} = \frac{P_{in}}{1.41 * V_{in}} \quad (2.13)$$

$$I_{DC} = \frac{1200W}{1.41 * 120V}$$

$$I_{DC} = 7.07 A$$

Al colocar un filtro capacitivo, los diodos se someten a una conducción no continua debido a la carga y descarga de los mismos llamado rizado. Para mantener un rizado de un porcentaje bajo los capacitores se deben aumentar de valor, provocando que el tiempo de

conducción de los diodos sea pequeño. Considerando este efecto se toma en cuenta que el ángulo de conducción del diodo es menor al 5%.

$$I_{pi} = \frac{I_{DC} * 180}{180 * 0.1} \quad (2.14)$$

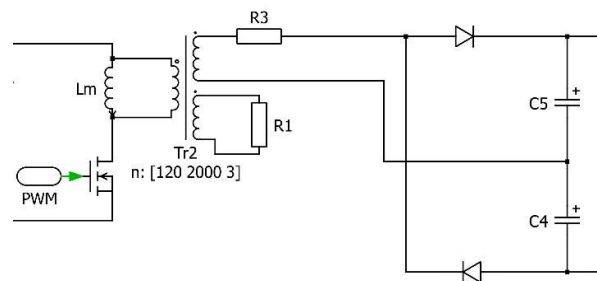
$$I_{pi} = \frac{7.07 * 180}{180 * 0.1}$$

$$I_{pi} = 70.7 \text{ A}$$

## 2.5. Dimensionamiento del convertidor DC/DC tipo flyback

El convertor DC/DC tipo flyback es un convertor asilado el cual me permite variar el valor del voltaje DC de la entrada mediante un transformador de voltaje. Consta de tres etapas importantes para su correcto funcionamiento: conmutador, transformador y etapa de rectificado en el lado del secundario.

Los parámetros del transformador ya fueron detallados en el mismo documento, por lo cual se basa en dichos datos para la elaboración del convertor. Para la etapa de rectificación se utiliza el duplicador de voltaje de onda completa detallado anteriormente. Así quedando el lado del semiconductor a utilizado para establecer una nueva frecuencia de trabajo del sistema y controlar al sistema. En la figura 2.3 podemos observar el modelo flyback implementado.

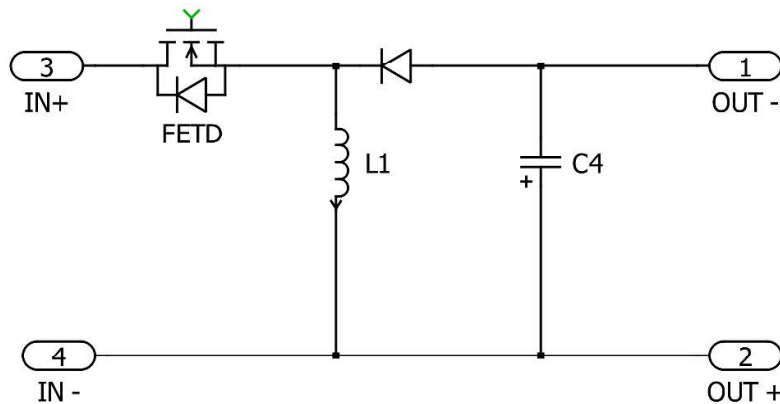


**Figura 2.3.** Convertor DC/DC tipo flyback

Para el dimensionamiento del semiconductor, el voltaje que debe soportar es el voltaje del primer devanado el cual es un voltaje máximo de 169.7V. Debido a que pueden existir voltajes picos lo sobredimensionamos con el doble de su valor y la corriente del mismo, además debe soportar la frecuencia que en este caso hemos escogido de 20KHZ. Por tal motivo utilizamos un Mosfet el cual me permite trabajar a grandes frecuencias.

## 2.6. Dimensionamiento del convertidor DC/DC tipo Buck and Boost

El convertidor Buck and Boost es un convertidor DC/DC el cual tiene dos tipos de propósito, elevar o reducir el voltaje de entrada. Los componentes a dimensionar en este tipo de conversor son el inductor (L), capacitor (C) y el semiconductor (FETD). Debemos tomar en cuenta el rango de valores de voltaje de operación del magnetrón [4144,22V ; 4490V] y el rango de valores de corriente.



**Figura 2.4.** Conversor DC/DC tipo Buck and Boost

Según la tabla 2.1. la relación de transformación es de 0.06, por tal motivo debemos obtener el valor de voltaje máximo junto a su corriente requerido en el lado del primario para que pueda soportar los variaciones de voltajes y corrientes respectivos

$$V1 = \frac{V2}{2} * 0.06 = 134,7 V \quad (2.14)$$

$$I1 = \frac{I2}{0.06} = 5.05A$$

Este es el valor máximo dentro de la zona de trabajo presentado en la figura 2.1. Cabe recalcar que si el voltaje sobre pasa los 4490V, el magnetrón logrará soportar dicho voltaje ya que para llegar a su zona de destrucción el voltaje necesario rodea los 10kV.

Con el valor de voltaje V1 trabajamos obtenemos el valor de la capacitancia del capacitor. Para ello calculamos una resistencia teórica y el valor del el cual es uno de los requisitos para el cálculo de la capacitancia

$$R = \frac{V0}{I1} = \frac{134.7V}{5.05A} = 26.67 \Omega \quad (2.15)$$



Además calculamos el valor de la relación de trabajo con el máximo valor de voltaje que utilizaremos. Sabiendo que el voltaje máximo que podemos obtener desde la red ya rectificado es  $E = 169.7V$

$$\delta = \frac{134.7V}{134.7V + 169.7V} = 0.4425 \quad (2.16)$$

Ahora calculamos el valor de capacitor con los datos obtenidos de las ecuaciones (2.15) y (2.16) teniendo en cuenta un porcentaje de rizado del 2% y una frecuencia de 20kHz

$$C = \frac{\delta}{\% * R * f} \quad (2.17)$$

$$C = \frac{0.4425}{0.02 * 26.67\Omega * 20kHz}$$

$$C = 41.47 \mu F$$

Para calcular el valor de inductancia debemos calcular una variación de corriente

$$I_{max} + I_{min} = \frac{E\delta}{(1-\delta)^2 * R} \quad (2.18)$$

$$I_{max} + I_{min} = \frac{169.7V * 0.4425}{(1 - 0.4425)^2 * 26.67\Omega}$$

$$I_{max} + I_{min} = 9.059A$$

Con el valor obtenido en (2.18) podemos calcular el valor de la inductancia para que mi sistema trabaje de forma correcta.

$$L = \frac{E\delta}{\% * \Delta I * f} = \frac{169.7V * 0.4425}{0.02 * 9.059A * 26.67\Omega} \quad (2.19)$$

$$L = 0.0207 H$$

## 2.7. Topologías armadas

### 2.7.1. Topología DC/DC

La topología DC/DC tenemos diferentes etapas diseñadas acorde a lo requerido para el control de la temperatura del magnetrón. Tenemos una etapa de rectificación no controlada, la etapa convertora DC/DC en el cual se realiza una etapa duplicadora para obtener el voltaje necesario. Y por último mi planta a ser controlada para obtener la potencia necesaria para el calentamiento del objeto.

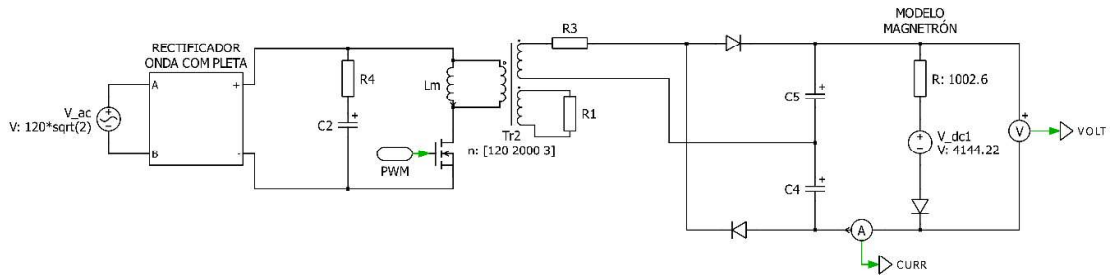


Figura 2.5. Topología DC/DC

### 2.7.2. Topología DC/AC

La topología DC/AC tenemos algunas etapas diferentes para poder alcanzar el onjetivo deseado el cual es alimentar al magnetrón con voltaje DC. Empieza con la etapa rectificadora no controlada, seguida del conversor DC/DC buck and boost, seguido de la etapa inversora puente completo, tarnsformador elevador, duplicador de voltaje y modelo de magnetrón. Este sistema es más complejo debido a que debemos controlar el voltaje de entrada al inversor mediante la etapa DC/DC.

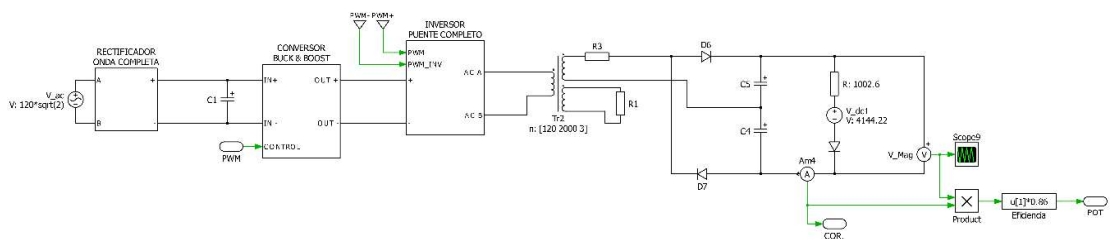


Figura 2.6. Topología DC/AC

## 2.8. Modelo de transferencia de la temperatura

El principal objetivo de este trabajo de integración curricular es controlar la temperatura que presenta un cuerpo al ser calentado mediante un horno microondas. Cómo se observó en puntos anteriores, el horno microondas, no genera calor, sino produce radiación electromagnética, mientras más tiempo esté un cuerpo expuesto a esta radiación su temperatura incrementará.

Para la obtención del modelo de transferencia de temperatura de un horno microondas de 1200 W, se utilizó el método experimental, para esto, se calentó un vaso con agua y se

registró la temperatura del agua cada cierto tiempo. Los datos de este experimento se muestran en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.2** Incremento de la temperatura del agua después de cierto tiempo expuesto a la radiación electromagnética de un horno microondas.

Tiempo [s]	Temperatura [°C]
10	26.6
20	28.1
30	34.1
40	38.9
50	43.5
60	52.3
70	56.2
80	61.8
100	68.1
120	75.5

Al observar la tabla que antecede se observa que el incremento de la temperatura del agua es exponencial. El enfriamiento también es exponencial, mediante la ley de enfriamiento de Newton se observa este comportamiento [1].

La siguiente ecuación representa la ley de enfriamiento y calentamiento de Newton.

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_A) \quad (2.20)$$

Siendo  $dT/dt$  la variación de temperatura en el tiempo y  $T_A$  temperatura ambiental.

Para determinar el comportamiento del enfriamiento del agua se toma en cuenta que, el proceso inicia a una temperatura de 75°C, después de 120 s que el microondas está apagado la temperatura disminuye hasta 70°C, con el agua a una temperatura ambiental de 20°C.

Primero, se integra la ecuación x, una vez integrada se determina la ecuación general de la ecuación diferencial como se muestra en la ecuación x2

$$T(t) = T_A + ce^{kt} \quad (2.21)$$

Segundo, conociendo la temperatura inicial y después de 120 s, se determina  $k$  y  $c$  de la ecuación x2, tal como se describe en x3

$$\left\{ \begin{array}{l} T(0) = 20 + ce^{kt} = 75 \\ T(120) = 20 + ce^{kt} = 70 \end{array} \right\} \rightarrow k = \ln\left(\frac{10}{11}\right) * \frac{1}{120} \quad (2.22)$$

La función que proporciona la temperatura del cuerpo es

$$T(t) = 20 + 55e^{\ln\left(\frac{10}{11}\right) * \frac{1}{120} * t} \quad (2.23)$$

Al considerar que el microondas tiene una potencia de 1200W, observando el incremento y decremento de la temperatura del agua se puede aproximar este comportamiento a un sistema de primer orden, como se muestra en la ecuación 2.24

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T(s)}{P(s)} = \frac{0.0593}{8s + 1} \rightarrow \text{decremento Temp.} \\ \frac{T(s)}{P(s)} = \frac{0.0593}{0.8s + 1} \rightarrow \text{incremento Temp.} \end{array} \right\} \quad (2.24)$$

Mediante la ecuación 2.24 se observa que la diferencia en ambos casos es el tiempo que le toma al sistema llegar a su referencia, siendo así, que el incremento de temperatura es aproximadamente 10 veces más rápido que el decremento de temperatura.

## 2.9. Diseño de los reguladores en cascada para el control de los sistemas simulados

En sistemas donde se utiliza convertidores para controlar la temperatura, es recomendable que se use control en cascada, ya que, se controla la corriente, la potencia y finalmente la temperatura. De esta manera se asegura un control óptimo de la variable de interés que es la temperatura. Si no se controla la potencia y la corriente, la respuesta de la temperatura podría sobre exigir a la electrónica de potencia.

### 2.9.1. Diseño del controlador pi por asignación de polos

La asignación de polos es un método de sintonización de controladores, que permite realizar la regulación del controlador estableciendo los valores máximos del transitorio (tiempo de establecimiento y sobre impulso) [29]. Conociendo estos valores se protege a la electrónica de potencia utilizada, ya que, no se sobrepasa los valores recomendados por el fabricante.

Según [29], para determinar el tiempo integral y la constante proporcional del regulador PI, con un error menor al 2% se utilizan las ecuaciones detalladas en 2.25

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_i = \frac{K_c K_p}{\tau W_n^2} \\ K_c = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot W_n \cdot \tau - 1}{K_p} \\ \varepsilon = \frac{-\ln\left(\frac{Mp}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln\left(\frac{Mp}{100}\right)}} \\ W_n = \frac{4}{\varepsilon \cdot t_s} \end{array} \right. \quad (2.25)$$

Donde:

$K_c$  → Ganancia proporcional del regulador.

$K_p$  → Ganancia del proceso, o estática.

$\tau$  → Tiempo que demora el proceso en llegar al 63% de la referencia.

$\tau_i$  → Tiempo de la parte integral del regulador

$W_n$  → Frecuencia natural de la planta.

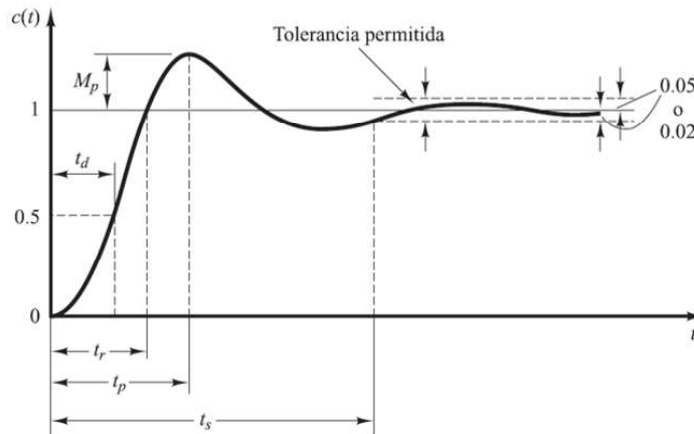
$\varepsilon$  → Coeficiente de amortiguamiento.

$t_s$  → Tiempo de establecimiento con tolerancia.

$Mp$  → Máximo sobre impulso del sistema

Basándose en el criterio de control para análisis de la respuesta transitoria , para sistemas electrónicos de potencia, se recomienda que no se sobre pase el 10% de sobre impulso y se escoja un tiempo de establecimiento entre 3 a 5 veces la constante de tiempo del sistema. Con estos criterios en mente se podrán tener respuestas adecuadas.

La siguiente figura ilustra de mejor manera los parámetros que se pueden calibrar para tener una buena respuesta del sistema.



**Figura 2.7** Transitorio del sistema.

Como se mencionó previamente se realiza un control en cascada, para esto se regula la corriente, la potencia y la temperatura. Sin embargo, en la sección de la temperatura se explica más detalladamente sobre ese control.

### 2.9.2. Regulador de lazo interno o corriente

Para el caso del convertidor Buck & Boost y para el Flyback, se usa control por modulación de ancho de pulso o PWM, se trabaja en por unidad, de esta manera no se considera la resolución de la PWM, sino se trabaja con porcentaje. Ambos convertidores fueron diseñados para operar a una frecuencia de 20 kHz.

Las funciones de transferencia de la corriente ante variaciones de la entrada PWM se muestra en x7.

$$\begin{cases} G_i(s) = \frac{1.4263}{0.14s + 1}; \text{Buck \& Boost} \\ G_i(s) = \frac{1.7829}{0.02s + 1}; \text{Flyback} \end{cases} \quad (2.26)$$

Utilizando las ecuaciones en 2.26, considerando un máximo sobre impulso del 10% y un tiempo de establecimiento de 3 veces la constante de tiempo del sistema planteado, se obtienen los siguientes controladores,

$$\begin{cases} C_i(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \rightarrow 0.418 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.08683s}\right); \text{Buck \& Boost} \\ C_i(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \rightarrow 0.3258 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.013899s}\right); \text{Flyback} \end{cases} \quad (2.27)$$

### 2.9.3. Regulador de potencia

Una vez sintonizado el regulador de corriente, se procede a regular el controlador de potencia, para esto se considera como potencia la multiplicación del voltaje con la corriente y una eficiencia del 75%. Para la entrada del sistema se considera como referencia corriente y se observa la potencia resultante. Con estos valores se determina los modelos que se presentan a continuación.

$$\begin{cases} G_p(s) = \frac{4025.16}{0.022 s + 1}; Buck \& Boost \\ G_p(s) = \frac{3342.96}{0.019 s + 1}; Flyback \end{cases} \quad (2.28)$$

Con el objetivo de obtener un máximo impulso del 10% y un tiempo de establecimiento no mayor a 5 veces la constante de tiempo mostrado en los modelos anteriores, se calculan los siguientes reguladores para la potencia.

$$\begin{cases} C_p(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \rightarrow 0.000164 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.01123 s}\right); Buck \& Boost \\ C_p(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \rightarrow 0.0001796 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.008145 s}\right); Flyback \end{cases} \quad (2.29)$$

### 2.9.4. Regulador de temperatura o lazo externo

Antes de mostrar los reguladores sintonizados, se recuerda que para incrementar y decrementar la temperatura de un cuerpo no se cuenta con el mismo modelo matemático, por eso, se considera un modelo variable, es decir que los dos modelos son diferentes: cuando se incrementa la temperatura del cuerpo se obtiene un comportamiento y al decrementar la temperatura se observa un comportamiento diferente.

Con eso en mente, se realiza una conmutación entre los modelos considerando si se desea incrementar o decrementar la temperatura del cuerpo. Debido a esto se cuenta con dos reguladores para la temperatura, uno controla el comportamiento del sistema al incrementar la temperatura y otro al decrementar esta.

Algo que se demostró en la sección del modelo de transferencia de la temperatura es el tiempo que tarda cada modelo, siendo así, uno es más veloz que el otro en llegar a la referencia. Para agilizar la simulación se considera que los modelos de incremento y decremento son 100 veces más veloces, es decir que los resultados obtenidos son apropiados, pero se debe multiplicar por 100 si se desea saber el tiempo en que el sistema alcanza la referencia propuesta por el usuario.

Los modelos de los dos sistemas ante el incremento y decremento de temperatura son los siguientes:

$$\begin{cases} G_{T_{inc}}(s) = \frac{0.0591}{0.8 s + 1} : \text{incremento temp} \\ G_{T_{dec}}(s) = \frac{0.0591}{8 s + 1} : \text{decremento temp.} \end{cases} \quad (2.30)$$

Considerando que se desea alcanzar la referencia en 5 veces la constante de tiempo de los modelos anteriores y con un sobre impulso del 10% se calculan los siguientes controladores para el sistema

Reguladores de temperatura para el convertor Buck & Boost:

$$\begin{cases} C_{T_{inc}}(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \rightarrow 10.1247 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.5255 s}\right) : \text{incremento temp.} \\ C_{T_{dec}}(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \rightarrow 56.2485 \cdot \left(1 + \frac{1}{4.2039 s}\right) : \text{decremento temp.} \end{cases} \quad (2.31)$$

Reguladores de temperatura para el convertor Flyback:

$$\begin{cases} C_{T_{inc}}(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \rightarrow 10.1252 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.5424 s}\right) : \text{incremento temp.} \\ C_{T_{dec}}(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \rightarrow 56.2485 \cdot \left(1 + \frac{1}{4.2039 s}\right) : \text{decremento temp.} \end{cases} \quad (2.32)$$

## 2.10. Diseño de la interfaz hombre máquina (hmi) para visualizar los resultados del sistema

Las simulaciones realizadas se hicieron en el programa de ingeniería PLECS, el cual cuenta con el software necesario para entregar respuestas rápidas y confiables, sin embargo, la interfaz gráfica fue elaborada mediante una herramienta de Matlab denominada AppDesigner. Para la visualización de resultados del trabajo de integración curricular, fue necesario comunicar el software de simulación PLECS con Matlab, a pesar de que se cuenta con la opción de usar Blockset, el cual es una extensión de PLECS para ser usado en Matlab, se vio inapropiado el uso de esta extensión, ya que el tiempo necesario para la simulación sería demasiado largo.

En la Figura 2.8 se presenta la interfaz diseñada.

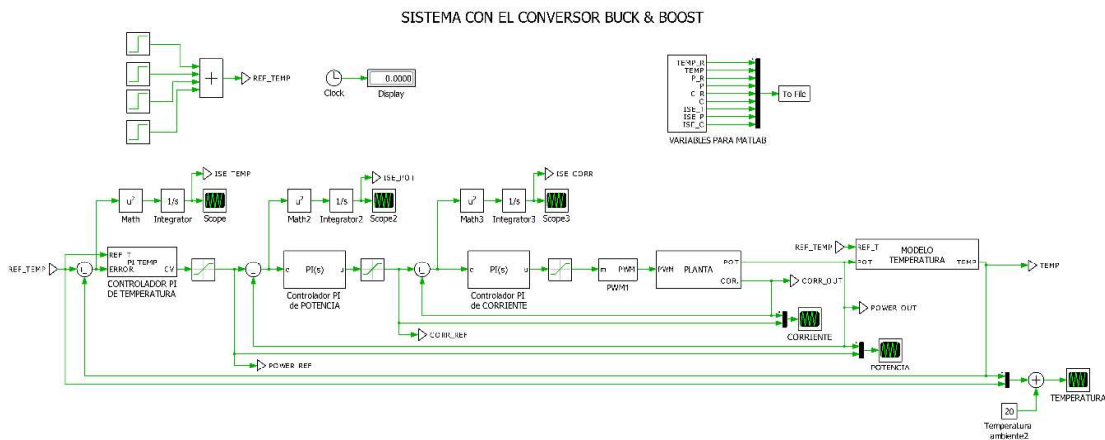




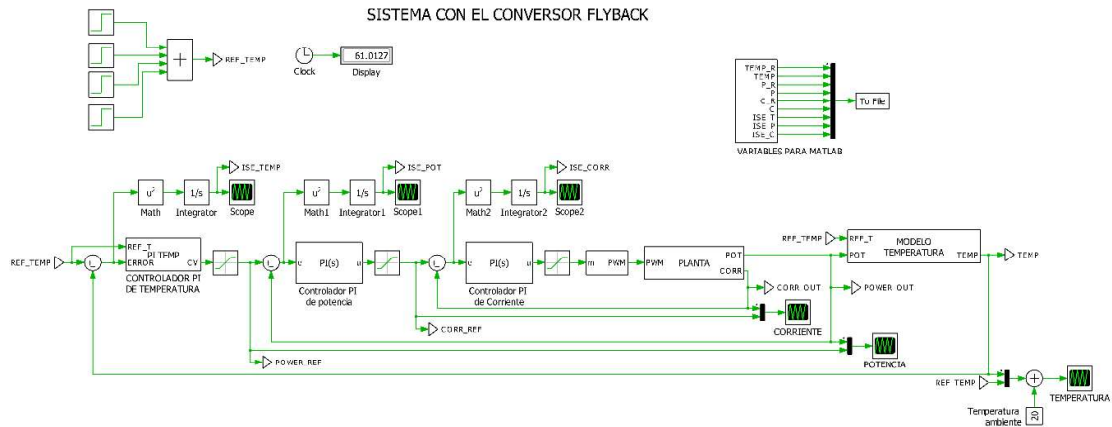
**Figura 2.8** Interfaz diseñada

Esta interfaz cuenta con ciertos elementos. Para describir mejor lo que contiene cada sección de la interfaz se utilizan cuadros de colores.

El panel de control delimitado por el rectángulo azul cuenta con algunas características, entre estas consta un mensaje que le indica al usuario que primero debe realizar una simulación previa de cada sistema simulado, para esto se cuenta con dos botones que abren las simulaciones donde se usa el convertor Flyback o el Buck & Boost, como se indica en las siguientes figuras.



**Figura 2.9** Sistema con el convertor Buck & Boost



**Figura 2.10** Sistema con el convertor Flyback

Con ambos circuitos simulados el usuario puede redireccionarse a la interfaz gráfica diseñada, donde al presionar el botón **GRAFICAR RESULTADOS**, podrá observar los resultados de los sistemas simulados. Estos resultados se observan en las pestañas encerradas en el cuadro rojo.

En el cuadro rojo, se pueden observar varias cosas:

- La temperatura del sistema utilizando el convertor Flyback o el Boost & Boost.
- El resultado de la potencia.
- El comportamiento de la corriente.
- Los índices de cada regulador sintonizado.

Además, se cuenta con una opción extra, la cual es una simulación en movimiento y se puede observar al acceder a la pestaña delimitada por el recuadro verde. Esta simulación en movimiento permite que el usuario observe cómo varía la temperatura del sistema utilizando el circuito Buck & Boost, también se observa esta variación en el termómetro superior derecho, para esto el usuario debe presionar los botones del panel de control **SIMULAR**, si desea observar la simulación y **LIMPIAR** para que se borre lo que se simuló, un ejemplo de esto se observa en la siguiente figura.



**Figura 2.11** Simulación en movimiento de la temperatura.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos al desarrollar la simulación y diseño de las distintas topologías se lo analiza mediante los índices de desempeño. Es decir, nos permite saber la calidad del elemento analizado para el sistema implementado. Son utilizados en sistemas de control para evaluar las respuesta del sistema ante cambios o perturbaciones. Una vez realizado se puede decidir que controladores brindan el mejor rendimiento. En nuestro caso realizamos el análisis mediante el método Integral del error cuadrático (ISE) el cual analiza los errores que aparecen al inicio de la respuesta obtenida.

#### 3.1 Índices de desempeño del controlador de potencia

La figura 3.1 nos muestra una buen desempeño de nuestro controlador PI ante variaciones tipo paso, ya que el tiempo de respuesta y la estabilización es casi una recta en la topología DC/AC



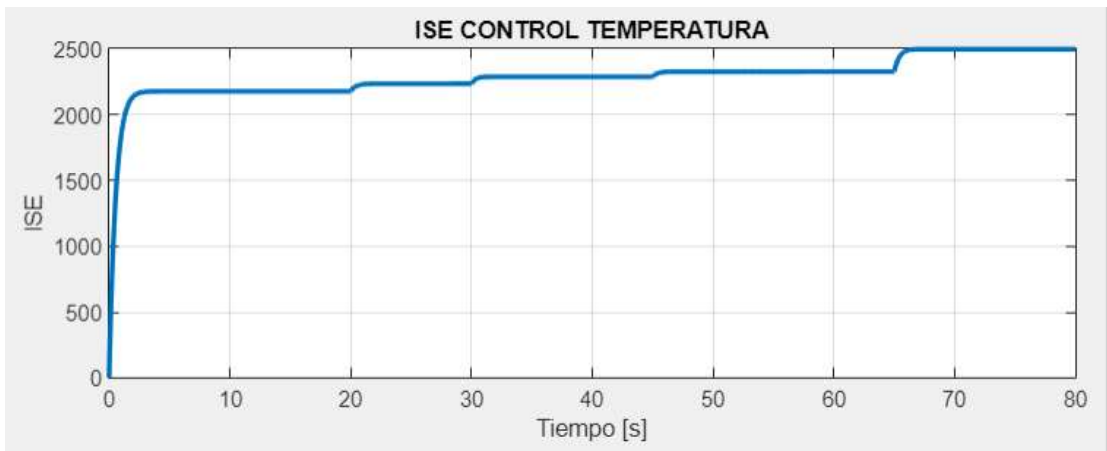
**Figura 3.1** Simulación ISE control de potencia topología DC/AC.

No es el caso de la topología DC/DC. Es verdad que su respuesta no es mala pero se puede observar una pendiente más elevada en la figura 3.2. Podemos reducir esto afinando los controladores, pero al ser un sistema en el cual se controla la temperatura se debe tener en cuenta que va a ser un sistema lento. Por lo cual va a dar errores pero como veremos más adelante el sistema no tiene error de posición, lo que me permite observar que llega a la referencia entregada.

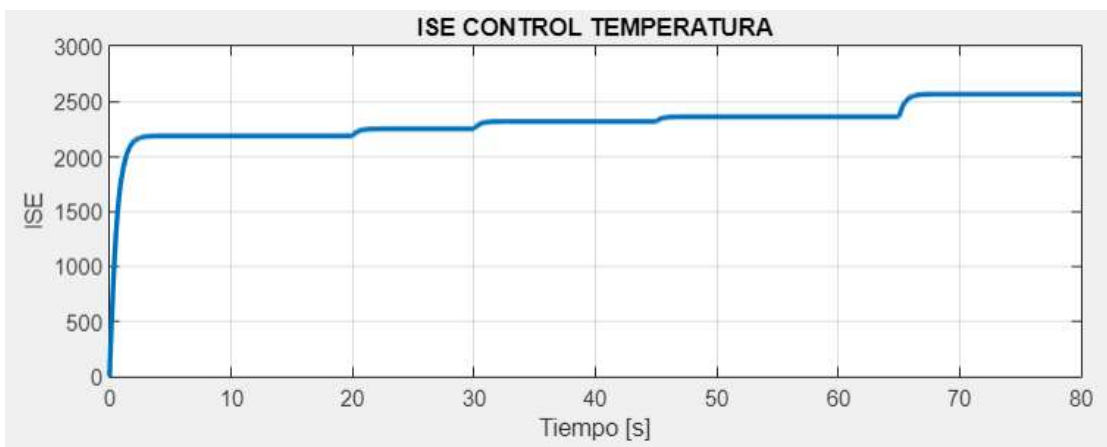


**Figura 3.2** Simulación ISE control de potencia topología DC/DC

### 3.2 Índices de desempeño del controlador de temperatura



**Figura 3.3** Simulación ISE control de temperatura topología DC/AC.



**Figura 3.4** Simulación ISE control de temperatura topología DC/DC.

### 3.3 Índices de desempeño del controlador de corriente

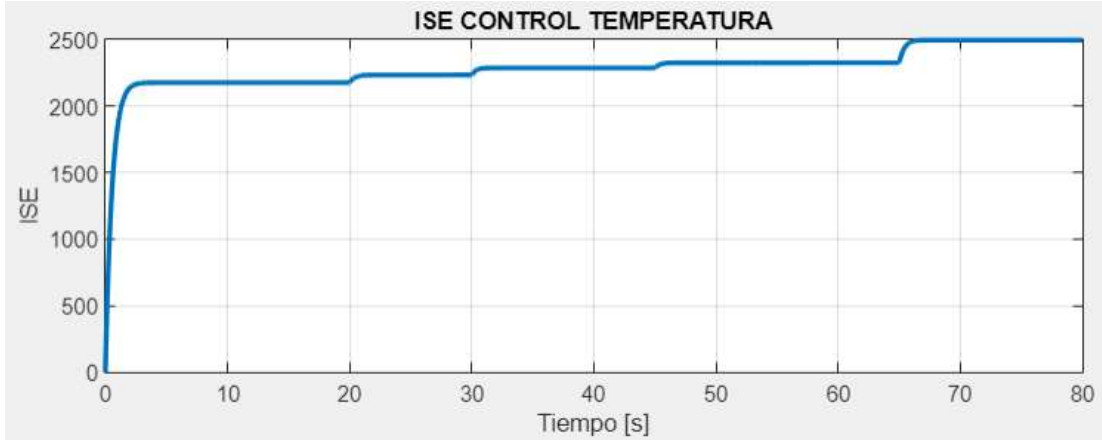


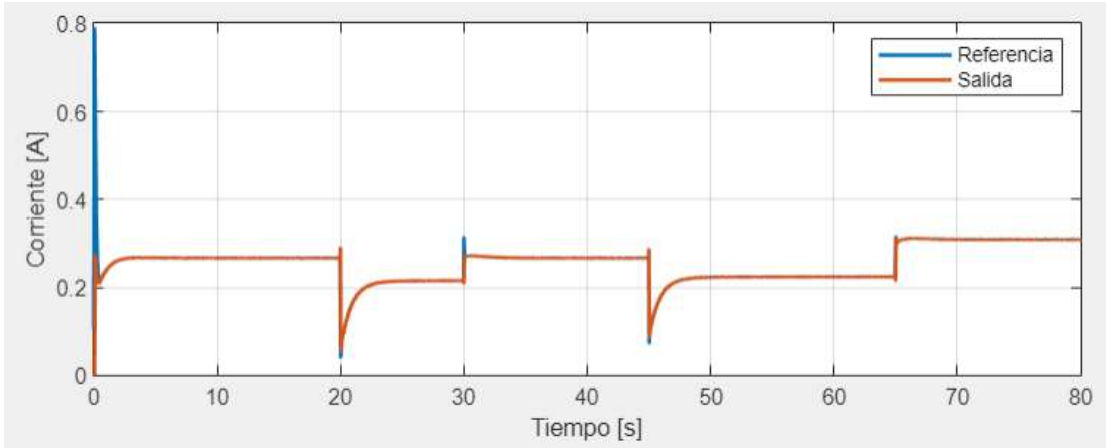
Figura 3.5 Simulación ISE control de corriente topología DC/AC.



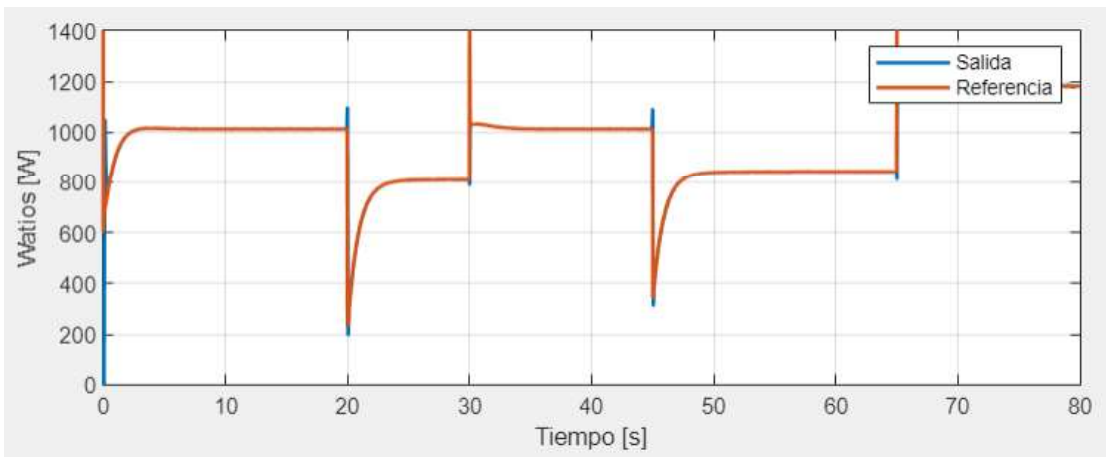
Figura 3.6 Simulación ISE control de corriente topología DC/DC.

### 3.4 Controladores frente a cambios de referencia

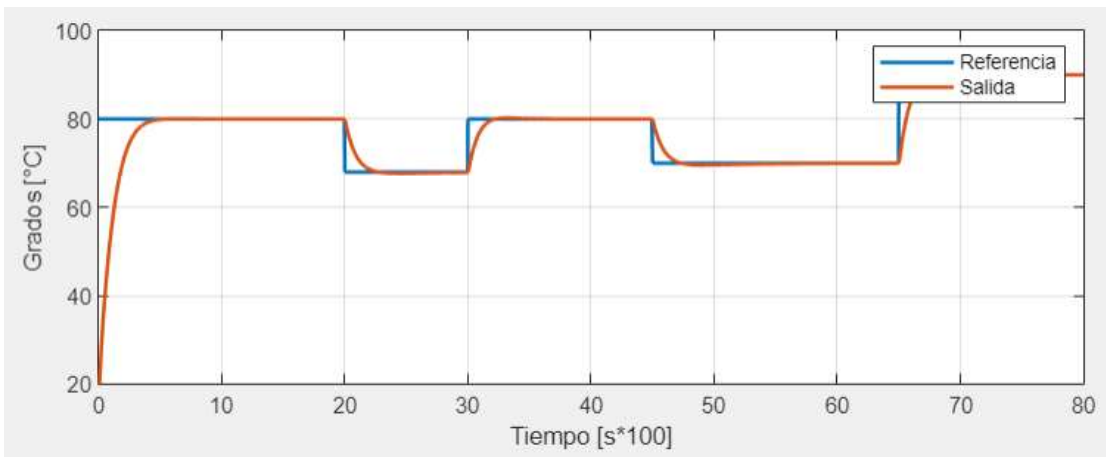
Los dos sistemas poseen un control en cascada el cual a cambios de perturbaciones trabajan de manera adecuada, pero internamente existen fluctuaciones. En ambos casos podemos ver un inicio agresivo del sistema debido a que el magnetrón empieza a calentarse y se encuentra en modo no oscilatorio. Es interesante ya que el sistema desea a toda costa llegar al punto de referencia, pero no puede debido a que el inicio no hay la nube de electrones para poder generar las ondas electromagnéticas necesarias para el calentamiento del objeto. Una vez pasado ese instante, quiere decir que el filamento (cátodo) se calentó y el voltaje de operación del magnetrón superó el voltaje umbral. El sistema se estabiliza en las referencias entregadas.



**Figura 3.7** Control de corriente topología DC/AC.

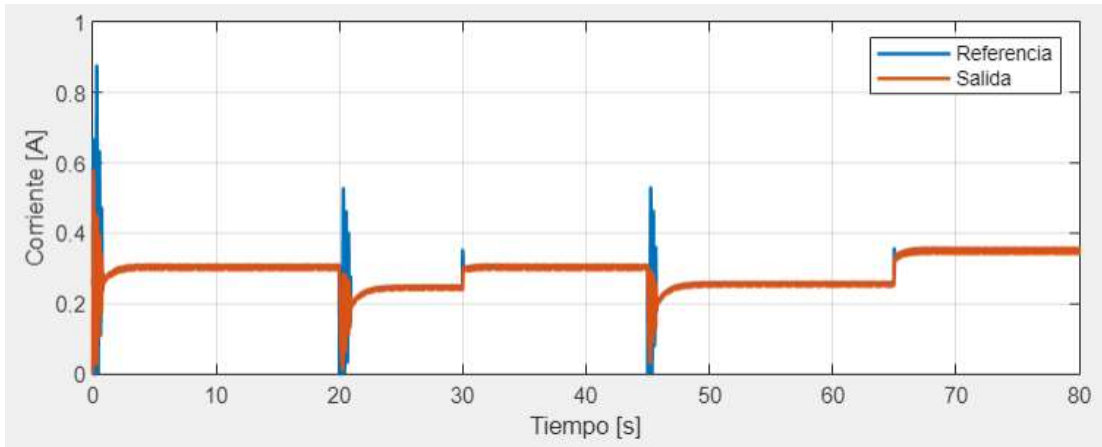


**Figura 3.8** Control de potencia topología DC/AC.

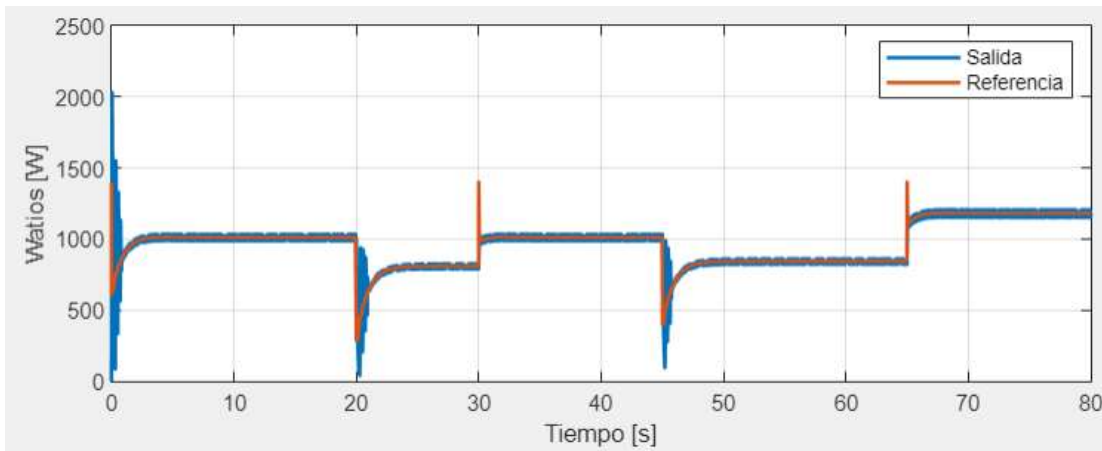


**Figura 3.9** Control de temperatura topología DC/AC.

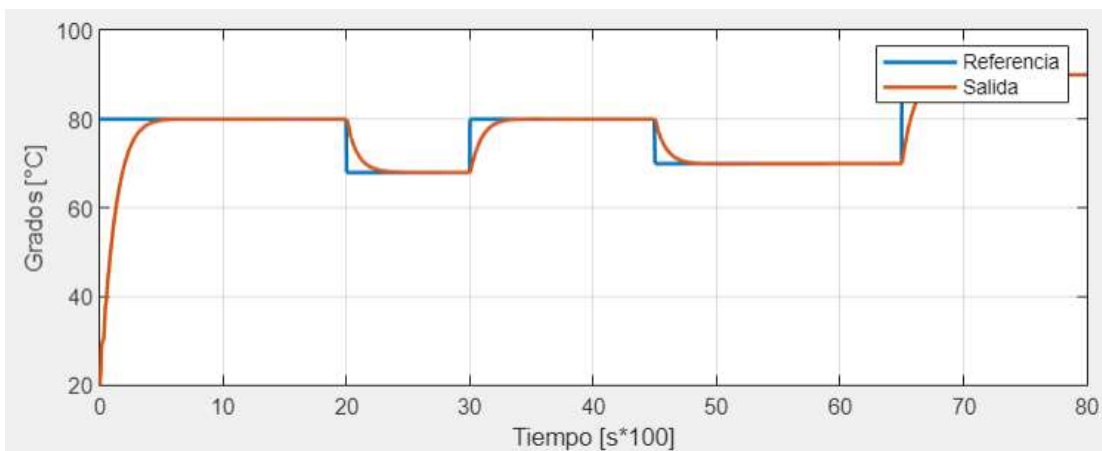
Asfdasfadsd



**Figura 3.7** Control de corriente topología DC/DC.



**Figura 3.7** Control de potencia topología DC/DC.



**Figura 3.7** Control de temperatura topología DC/DC.



El propósito de este estudio es que a futuro sea implementado el control de temperatura al horno microondas. Por lo tanto, se debe analizar algunos parámetros más allá del control del sistema, como es la vida útil del elemento final de control (magnetron). La forma de adquisición de datos para el sistema, la fácil manipulación de los elementos electrónicos para ser cambiados en caso de necesitarlos y los respectivos sistemas de emergencia en caso de sa

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. CONCLUSIONES**

- El modelo térmico del microondas se estimó realizando el calentamiento de agua y midiéndolo con un termómetro para obtener la curva de reacción del objeto a calentar. Se debe tener en cuenta que el objeto llega a un punto en el cual no puede aumentar más su temperatura sin cambiar su estado por tal motivo consideramos que el objeto no cambia de estado.
- Al analizar el índice de desempeño ISE notamos que los dos sistemas se comportan de manera correcta gracias a los controladores PI diseñados en cascada, ambos sistemas llegan a la referencia deseada permitiendo que el objeto simulado alcance su temperatura deseada.
- El sistema de calentamiento se considera un sistema cerrado, por lo cual al colocar perturbaciones en la simulación se entendería que se abrió la puerta del horno microondas permitiendo el ingreso de corrientes de aire ajenas al sistema. Se considera que el sistema va a ser cerrado y se controlará desde su interior.
- Al analizar los distintos tipos de topologías para el sistema se verificó que la mejor opción para un sistema DC/DC es el flyback debido a su componente de aislamiento y su etapa de elevación. Mientras que la etapa DC/AC realizamos dos conversiones de AC/DC para su correcto funcionamiento en voltaje DC el magnetron.
- En cuestión de materiales, la topología DC/DC tipo flyback es la mejor opción debido a que la cantidad de componentes a utilizar es menor, en comparación con la topología DC/AC en la cual tenemos más etapas para cumplir con los objetivos deseados.
- En el presente trabajo la eficiencia del magnetron cumple un papel importante, pero debemos tener en cuenta que la eficiencia de los elementos electrónicos no son

siempre del 100%. Por tal motivo la eficiencia dada por el magnetrón se debe añadir a los parámetros esperados para la temperatura ya que la eficiencia del magnetrón bajará un poco más de lo esperado.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Para el análisis del objeto calentado se recomienda utilizar un software de simulación que me permita modelar al sistema en tres dimensiones para observar cómo realmente se produce el calentamiento de un objeto ya que se estima para este trabajo que el objeto se calienta de manera uniforme.
- Se recomienda utilizar la herramienta PLECS para futuras simulaciones de elementos electrónicos, ya que el tiempo de simulación del mismo es más rápido y se obtiene los mismos valores deseados que Matlab.
- En caso de armado del sistema, se recomienda realizarlo por equipo de profesionales los cuales estén capacitados sobre el manejo de alto voltaje y ondas microondas, además, utilizar los elementos de protección adecuados ya que la exposición a ondas electromagnéticas es perjudicial para la salud.
- En caso de reutilizar los componentes de un microondas comercial, se recomienda comprobar que todos los dispositivos electrónicos funcionen de manera correcta realizando las respectivas pruebas sugeridas por expertos en la manipulación de aparatos de hogar similares.
- Se recomienda utilizar sensores de temperatura de fibra óptica para la medición de temperatura en el interior del horno microondas ya que estos no se ven afectados por la frecuencia de trabajo del elemento.
- Para casos en los cuales se va a realizar calentamiento prolongados, consultar la hoja de datos del magnetrón y del horno microondas convencional para confirmar que el magnetrón puede estar dicho tiempo encendido. Ya que comúnmente el horno microondas se lo utiliza por minutos.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Boylestad, «ELECTRÓNICA: TEORÍA DE CIRCUITOS Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS», 2009.
- [2] M. Rashid, «ELECTRÓNICA DE POTENCIA: CIRCUITOS, DISPOSITIVOS Y APLICACIONES», 2004.
- [3] N. Mohan, «ADVANCED ELECTRONIC DRIVES: ANALYSIS, CONTROL, AND MODELING USING MATLAB/SIMULINK», 2014.
- [4] V. Agraso, «Horno microondas el invento que favoreció la comida rápida.», 2018. <https://viambox.com/horno-microondas/> (accedido sep. 03, 2022).
- [5] A. Zemtsov, I. Artyukhov, y S. F. Stepanov, «Modeling and Simulation of a Low Power Magnetron as an Element of Electrical System», 2018
- [6] P. Krishnaswamy, R. Jha, y P. Deshpande, «When To Use Cascade Control», Singapore, jun. 1990.
- [7] A. W. Hull, «The Magnetron», 1921.
- [8] W. Hayt, J. Buck, «Teoría electromagnética», 2006.
- [9] P. Plaza, «Control de la temperatura en sistemas de calentamiento por microondas», 2015. [Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia] Repositorio Institucional – Universidad Politécnica de Valencia.
- [10] J.P. van der Merwe, J.B. De Swardt, «Power Control of a Domestic Microwave Oven - Electrical and Electronic Engineering Department Stellenbosch University», 2017.
- [11] A. García, «Evaluación experimental de la eficiencia energética de un prototipo de secadora asistida por microondas y mejora del mismo», 2015. [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena] Repositorio Institucional – Universidad Politécnica de Cartagena.
- [12] N. Elghazal, M. Ould Ahmedou, M. Chraygane, M. Ferfra, A. Belhaiba, «OPTIMIZATION OF HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY FOR INDUSTRIAL MICROWAVE GENERATORS FOR ONE MAGNETRON», 2012.
- [13] M. Nikhil Waghmare, P. Rahul, Argelwar, «High Voltage Generation by using Cockcroft-Walton Multiplier», 2015. [En línea]. Available: <https://nanopdf.com/download/high-voltage-generation-by-using-cockcroft>.
- [14] A. Bonfiglia, L. Campañone, J. Bava, R. Mascheroni, «MODELADO MATEMÁTICO DEL CALENTAMIENTO CONTROLADO DE ALIMENTOS EMPLEANDO MICROONDAS», 2010.
- [15] H. Ciro, J. Meléndez, J. Meléndez, «MODELACIÓN NUMÉRICA DE UN PROCESO TÉRMICO POR MICROONDAS CON ÉNFASIS EN ALIMENTOS», 2015. [En línea]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v73n150/a14v73n150.pdf>.
- [16] A. Zemtsov, I. Artyukhov, F. Stepanov, E. Mirgorodskaya, P. Mityashin, A. Kalistratov, «Modeling and Simulation of a Low Power Magnetron as an Element of Electrical System». [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/325707304\\_Modeling\\_and\\_simulation\\_of\\_a\\_low\\_power\\_magnetron](https://www.researchgate.net/publication/325707304_Modeling_and_simulation_of_a_low_power_magnetron).

- [17] V. Ivanov, K. Rogozhin, D. Sidorenko, «Research on Magnetron Generator Energy Efficiency in Microwave», 2017.
- [18] E. Fernández, «Implementación de un magnetrón para evaporación física de materiales en cámara de alto vacío», 2017. [Tesis de Pregrado, Universidad Pública de Navarra] Repositorio Institucional – Universidad Pública de Navarra.
- [19] C. Kobougias, E. Tatakis, «Optimal Design of a Half-Wave Cockcroft–Walton Voltage Multiplier With Minimum Total Capacitance», 2010.
- [20] A. Giménez, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONVERTIDOR FLYBACK PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO», 2016. [Tesis de Pregrado, Universidad Pública de Valencia] Repositorio Institucional – Universidad Pública de Valencia.
- [21] L. Voisin, «Conductividad Térmica y Ley de Fourier», 2011. [En línea]. Available: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/MI3010/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=396193](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/MI3010/1/material_docente/bajar?id_material=396193).
- [22] P. Larregain, A. Machado, «¿El agua calentada en microondas se enfría más rápido?», 2009. [En línea]. Available: <https://users.exa.unicen.edu.ar>.
- [23] Comsol Multiphysics, «Microwave Oven - SOLVED WITH COMSOL MULTIPHYSICS 3.3», 2006.
- [24] Onsemi TM, «LC Selection Guide for the DC-DC Synchronous Buck Converter», 2006.
- [25] Y. Yang. «A Magnetron Power Supply with Transition-Mode Zero-Voltage-Switching Inverter», 2013.
- [26] DACI-EPN, “ANÁLISIS DE LA RESPUESTA TRANSITORIA”, Accessed: Jan. 05, 2022. [Online]. Available: [http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/virtualdirectories/80/CControlC/materias/automatico/Descargas/An%C3%A1lisis/Lecturas/Lecturas\\_PDF/LECTURA\\_ANALISIS.pdf](http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/virtualdirectories/80/CControlC/materias/automatico/Descargas/An%C3%A1lisis/Lecturas/Lecturas_PDF/LECTURA_ANALISIS.pdf)
- [27] O. Camacho, A. Rosales, and F. Rivas, *CONTROL DE PROCESOS*, vol. 1. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [28] M. A. Ojeda-Misses, “Modelado y control de temperatura para una clase de sistema derivado de la ley de enfriamiento de Newton,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 10, no. Especial4, pp. 160–167, Oct. 2022, doi: 10.29057/ICBI.V10IESPECIAL4.8950.
- [29] F. X. Toapanta Moscoso, “Diseño y simulación del control en cuatro cuadrantes de una máquina DC con un convertidor DC/DC tipo CÛK bidireccional.,” 2022, Accessed: Oct. 20, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22539>

# ANEXOS

**ANEXO A**

**MANUAL DE OPERACIÓN HMI**

El siguiente documento muestra los pasos a seguir para la utilización del HMI implementado.

Se presenta la ventana de inicio, en ella podemos observar varias viñetas para la presentación de los distintos resultados luego de ser simulados por el software PLECS.



**Figura 1.** Venta de inicio

La ventana principal presenta el nombre del proyecto, nombre del director, nombre del autor, y título del trabajo de integración curricular.

Además, poseemos 5 botones al lado izquierdo los cuales me permiten simular los modelos propuestos los cuales son "Flyback" y "Buck Boost", GRAFICAR LOS RESULTADOS en las respectivas viñetas, y por último los botones SIMULAR y LIMPIAR nos permite observar cómo se realizó la simulación del mismo en tiempo real.

#### PROCEDIMIENTO PARA OBSERVAR LOS RESULTADOS

1. Primero se debe simular los modelos, para lo cual debemos abrir los archivos presionando los botones "Flyback" o "Buck Boost".



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL CONTROL DE TEMPERATURA EN LAZO CERRADO EN UN HORNO MICROOND...  
PARA EL ESTUDIO DE LA EXTRACCIÓN DE OLEORRESINA Y ACEITE ESENCIAL DE ESPECIES AROMÁTIC...  
DEL ECUADOR POR METODOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES

DIRECTOR: DR ING. PAUL MARCELO POZO PALMA  
AUTOR: DIEGO MIGUEL CARRERA HERAS



PRIMERO SE DEBEN SIMULAR AMBOS PROGRAMAS

FLYBACK

BUCK BOOST

GRAFICAR RESULTADOS

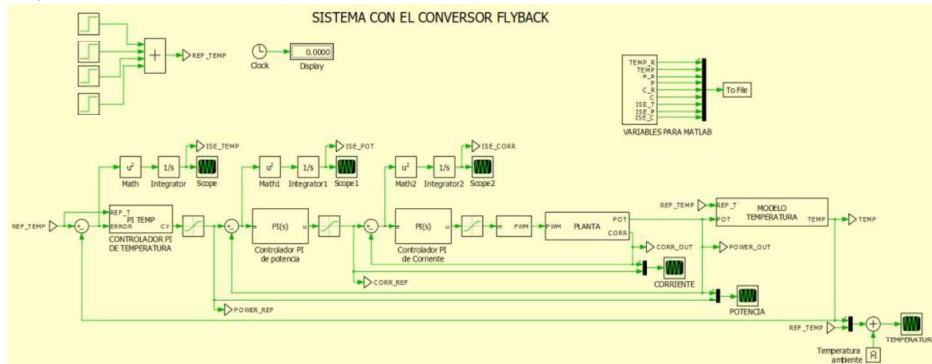
SIMULAR    LIMPIAR

CONVERSION FLYBACK    CONVERSION BUCK & BOOST    SIMULACION BUCK & BOOST

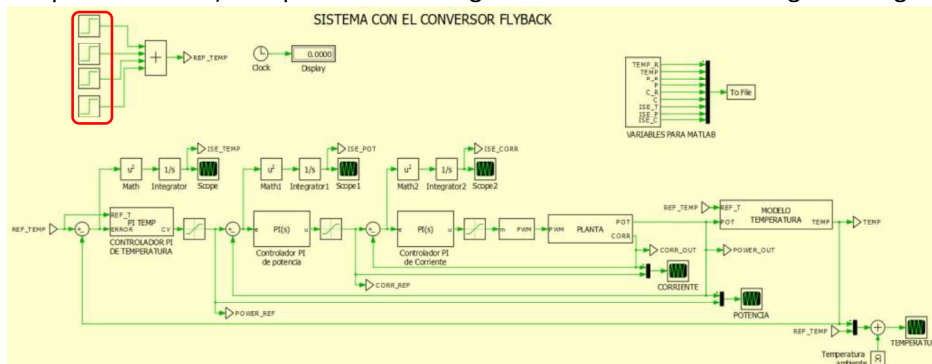
TEMPERATURA    POTENCIA    CORRIENTE    ISE TEMP    ISE POT    ISE CORR.



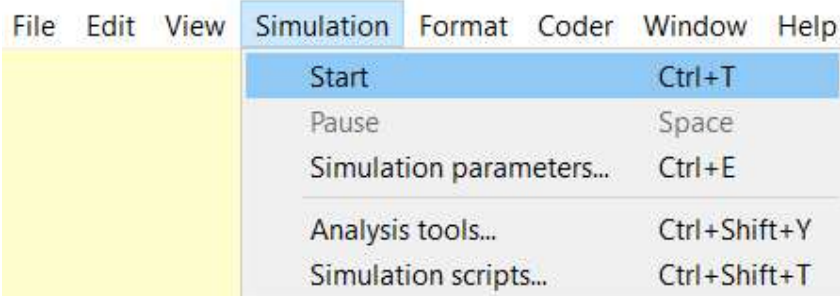
2. Al presionar el botón “Flyback” se despliega la siguiente ventana



En esta ventana podremos cambiar los puntos de referencias de temperatura (en los bloques señalados) a la que deseamos llegar como se muestra en la siguiente figura.



3. Una vez escogidos los puntos de referencias se procede a simular. Esto se puede realizar presionando las teclas CTRL + t, o a su vez en la barra de herramientas ir a “Simulation” y escoger la opción “Start”



4. Debemos esperar a que se complete la simulación y realizar el mismo procedimiento desde el literal 1 pero al 3 con el modelo “Buck Boost”
5. Una vez terminadas las simulaciones, procedemos a graficar los resultados presionando el botón “ GRAFICAR RESULTADOS”.



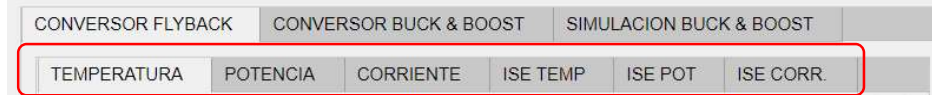
Al presionar, se mostrará los distintos tipos de gráficos en las pestañas elegidas como se muestra a continuación.



6. Dependiendo del modelo requerido para observar sus resultados, elegimos la pestañas correspondiente como se muestra en la siguiente figura



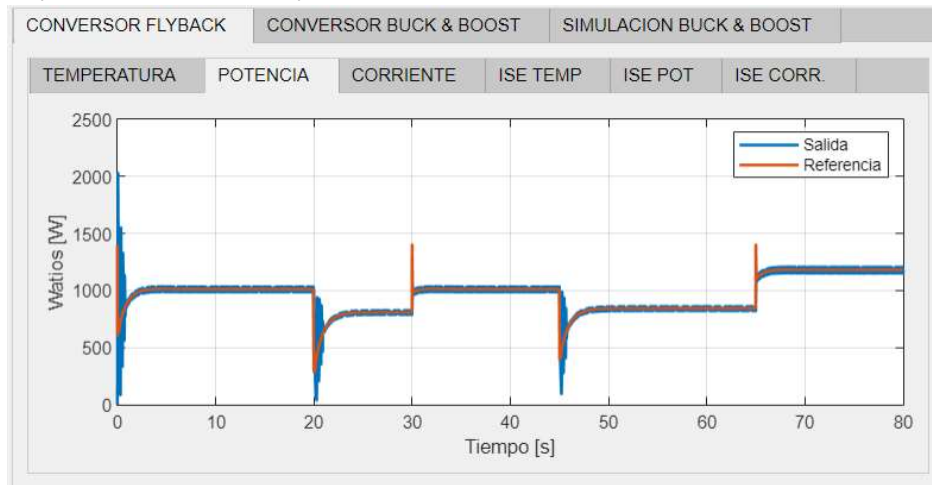
7. Una vez elegido el modelo, en las siguientes pestañas podemos elegir entre la temperatura, potencia, corriente. Además, también puedo elegir los índices cuadráticos del error de temperatura ( ISE TEMP), potencia (ISE POT) y corriente (ISE CORR)



8. A continuación, tenemos un ejemplo observando la temperatura del modelo Flyback.



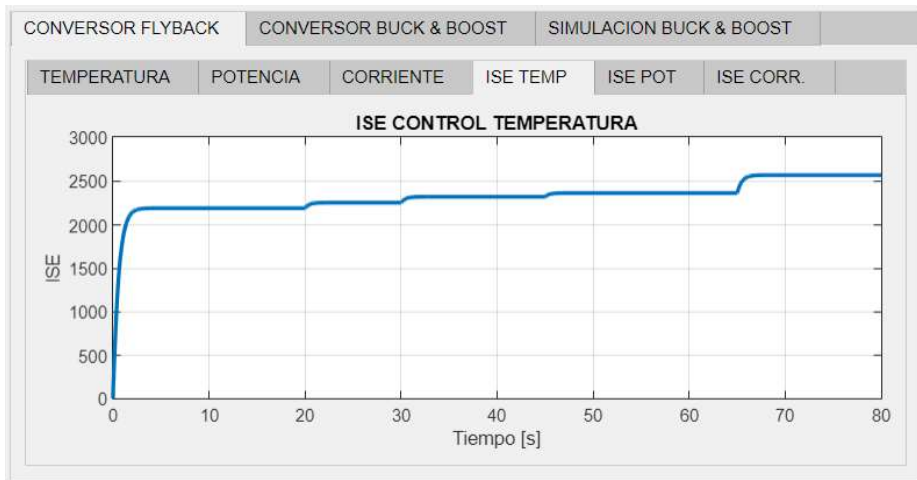
La potencia del modelo Flyback



La corriente del modelo Flyback

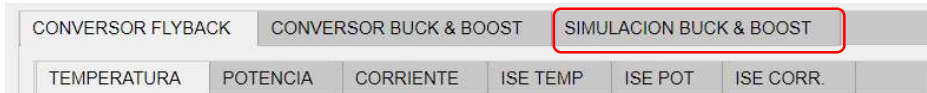


El índice cuadrático del error de corriente



### PROCEDIMIENTO PARA OBSERVAR LOS RESULTADOS EN TIEMPO REAL

1. Para poder observar en tiempo real como evoluciona la temperatura del objeto escogemos el botón "SIMULAR". Previo a este paso, el modelo "Buck Boost" ya debe estar simulado en el software PLECS. En caso de abrirlo por primera vez, debemos realizar el procedimiento del 1 al 4 del **PROCEDIMIENTO PARA OBSERVAR LOS RESULTADOS**.
2. Escogemos la pestaña "Simulación Buck Boost" como se muestra a continuación.



3. Presionamos el botón "SIMULAR".

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL CONTROL DE TEMPERATURA EN LAZO CERRADO EN UN HORNO MICROOND...  
PARA EL ESTUDIO DE LA EXTRACCIÓN DE OLEORRESINA Y ACEITE ESENCIAL DE ESPECIES AROMATIC...  
DEL ECUADOR POR METODOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES

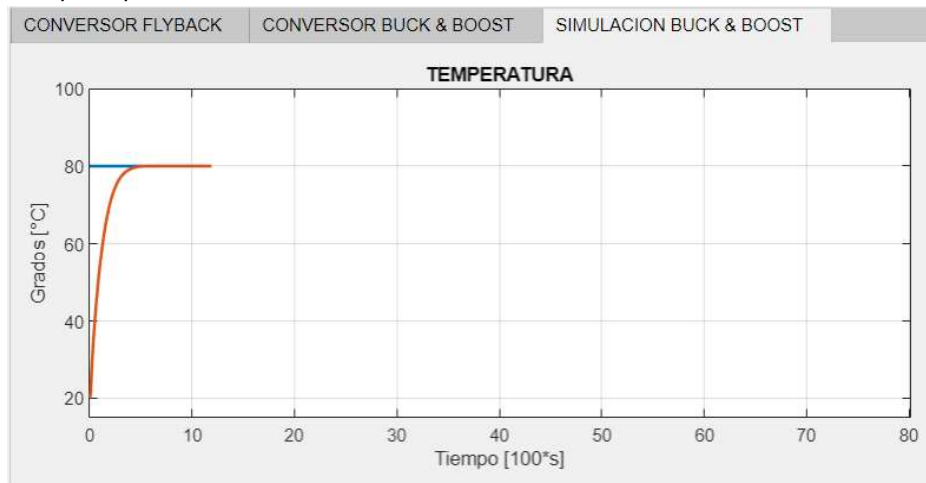
DIRECTOR: DR ING. PAUL MARCELO POZO PALMA  
AUTOR: DIEGO MIGUEL CARRERA HERAS



PRIMERO SE DEBEN SIMULAR AMBOS PROGRAMAS



4. Al presionar dicho botón, mostrará la evolución de la temperatura en función del tiempo dependiendo de los distintos cambios de referencia.



5. El medidor de temperatura comenzará a variar.



6. Para borrar la gráfica, debemos presionar el botón “Limpiar”



7. Si deseamos cambiar los cambios de referencias debemos realizar los literales del 1 al 4 del **PROCEDIMIENTO PARA OBSERVAR LOS RESULTADOS**.