

Diseño y construcción de un inversor resonante para aplicaciones de calentamiento por inducción

Enrique-Ponce Camacho^a, Eduardo-Ortega Nava^a, Jorge Edmundo-Mastache Mastache^b, Orlando-Soriano Vargas^b, Roberto-López Ramírez^b

^aEstudiante del Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, quique.poncecamacho@gmail.com, Ixtlahuaca, Estado de México, México.

^bTECNM-Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, jorge.mastache@tesjo.edu.mx, Jocotitlán, Estado de México, México.

Resumen

El presente proyecto consiste en el diseño y armado de un inversor resonante para su aplicación en un sistema de calentamiento por inducción, el cual necesita de la generación de campos electromagnéticos variables en el interior de una bobina, y esto a su vez requiere de una corriente alterna de alta frecuencia. El circuito tiene como característica la auto conmutación propia de la naturaleza del circuito inversor, al presentar un circuito con una construcción igual para el cuadrante de cada interruptor de conmutación, se presentará una descompensación del flujo de la corriente eléctrica que atravesará cada componente eléctrico, ocasionando que uno de los Mosfet se encienda primero, a lo que su respectivo cuadrante comenzará a cargar sus elementos inductivos y el propio tanque resonante. Tras la carga de esos elementos, se presentará una disminución de voltaje hasta un valor de 0 v, por lo que el primer ciclo terminará y el Mosfet se apagará, redirigiendo el flujo de corriente eléctrica al otro cuadrante para generar el segundo ciclo, por lo que se está utilizando una conmutación por ZVS, reduciendo las pérdidas de potencia de los Mosfets, a lo que permite la generación de la corriente alterna de salida en la bobina de inducción. Con una corriente alterna de alta frecuencia, la bobina tendrá en su interior, campos electromagnéticos variables, por lo que un metal al estar sometido a dichos campos se inducirán corrientes parásitas comenzando el calentamiento por inducción [1-2]. De acuerdo a las características de un sistema de calentamiento por inducción, es imprescindible de una fuente de alimentación que soporte corrientes de entre 15 y 30 A.

Palabras clave— Auto conmutación, Calentamiento, Inducción, Inversor, Resonante.

Abstract

The present project consists of the design and assembly of a resonant inverter for application in an induction heating system, which requires the generation of variable electromagnetic fields inside a coil, and this in turn requires a current high frequency alternating. The characteristic of the circuit is the self-switching characteristic of the nature of the inverter circuit. By presenting a circuit with the same construction for the quadrant of each switching switch, there will be a decompensation in the flow of the electric current that will pass through each electrical component, causing that one of the Mosfets turns on first, to which its respective

quadrant will begin to charge its inductive elements and the resonant tank itself. After charging these elements, there will be a decrease in voltage to a value of 0 v, so the first cycle will end and the Mosfet will turn off, redirecting the flow of electric current to the other quadrant to generate the second cycle, therefore that ZVS switching is being used, reducing the power losses of the Mosfets, allowing the generation of the output alternating current in the induction coil. With a high-frequency alternating current, the coil will have variable electromagnetic fields inside, so when a metal is subjected to these fields, parasitic currents will be induced, starting heating by induction [1-2]. According to the characteristics of an induction heating system, a power supply that supports currents between 15 and 30 A is essential.

Keywords— Auto switching, Heating, Induction, Inverter, Resonant.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo al desarrollo de técnicas para aumentar las temperaturas con el fin de realizar tratamientos térmicos a metales para la alteración de sus propiedades mecánicas, se desarrollaron distintos tipos de hornos. Hoy en día se clasifican en dos tipos de acuerdo al proceso en el cual generan el calentamiento, siendo el primero como los hornos de llamas, y el segundo tipo de hornos son los eléctricos, en el cual se encuentra el horno de inducción [3].

Descubiertas sus bases para el calentamiento del metal por inducción en 1831 por Michael Faraday y utilizados desde la mitad del siglo XX, los hornos de inducción, mediante el flujo de corriente alterna en una bobina de cobre, se genera un campo magnético, induciendo corrientes parásitas, así como el fenómeno de histéresis causando vibración y fricción entre las moléculas del material que está a disposición del campo magnético de la bobina. Al estar sometido a ese campo magnético, las corrientes inducidas fluyen en sentido contrario a la resistividad eléctrica del material, produciendo así un aumento de temperatura solo en el área expuesta al campo magnético [3-2].

La electrónica de potencia contribuye al desarrollo de circuitos que permiten la generación de dichos fenómenos físicos a partir de una corriente alterna de alta frecuencia. Conocidos como inversores, los convertidores de corriente DC a AC, permiten manipular las frecuencias de trabajo de acuerdo a lo que se requiere, con su aplicación en el ambiente industrial como la excitación de motores de CA de velocidad variable, fuentes de potencia de reserva y fuentes de potencia ininterrumpible, calefacción por inducción, etc. Considerando el uso de estos inversores, se clasifican en monofásicos y trifásicos.

Una de las desventajas de los inversores comunes es el gran esfuerzo que presentan los interruptores por la propia conmutación por lo que a su vez genera pérdidas de potencia, lo que aumenta de forma lineal con la frecuencia de conmutación PWM, Por lo que se desarrollaron los convertidores resonantes o inversores resonantes, aquellos que permiten una conmutación cuando el interruptor cambia

su estatus cuando el voltaje o corriente a través de él es cero en el instante de la conmutación [5].

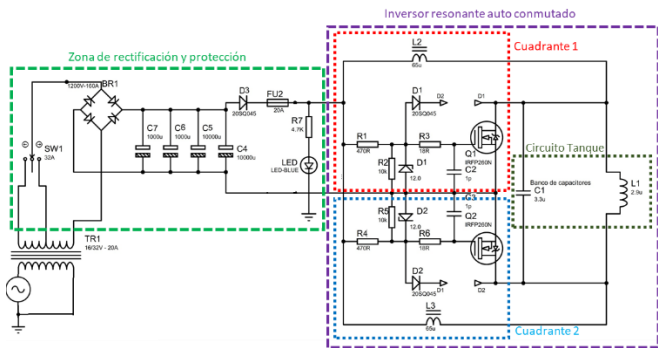
Entre los tipos de inversores resonantes como lo son en serie, paralelo, de clase E, de conmutación por voltaje cero y de conmutación por corriente cero, sobre sale para el circuito utilizado en este artículo, el inversor resonante de conmutación por voltaje cero (ZVS), reduciendo la pérdidas en conmutación [4].

Uno de los métodos de conmutación para ZVS es la conmutación resonante lograda por los elementos no parásitos del circuito, por lo que la frecuencia de conmutación debe ser mayor a la frecuencia natural del circuito presentando una carga inductiva, relacionada a la conmutación resonante, se presenta la auto conmutación, fenómeno que se genera a partir de la construcción propia de los elementos electrónicos, y el propio diseño del circuito inversor, al depender de un desbalance de activación de elementos.

2. DISEÑO

El circuito que compone el inversor resonante de tipo ZVS monofásico para la aplicación en un sistema de inducción comienza desde una reducción de voltaje AC por medio de un transformador con una salida AC de 16/32 V y un amperaje de 20 A, la presencia de una alta corriente es vital para el calentamiento por inducción, ya que tanto el numero de vueltas como la corriente eléctrica en una bobina, al incrementarse, el campo magnético también incrementa [6]. Posteriormente continúa la parte de la rectificación de onda completa por medio del puente rectificador de 160 A y una zona de filtrado por medio de capacitores (Figura 1).

Fig. 1 Circuito inversor resonante completo



Fuente: Elaboración propia

I. CIRCUITO INVERSOR RESONANTE

El circuito inversor resonante se trata de un inversor monofásico encargado de transformar la corriente CD (Zona de rectificación y protección) a una corriente de amplitud variable con una frecuencia igual o mayor a la frecuencia de resonancia (Inversor resonante auto conmutado) del circuito RLC el cual se encarga de producir la frecuencia de trabajo mediante un arreglo de un condensador y una bobina (bobina de inducción) conectados entre sí en paralelo, mientras que el término R hace referencia a la resistencia que presenta el material que se pretende calentar por medio de inducción electromagnética dentro de la bobina de inducción. El

capacitor trabaja como un almacén de energía eléctrica y la bobina como un almacén de energía magnética.

Un inversor resonante tiene una característica diferente a un inversor convencional, la cual consta en utilizar una técnica conocida como conmutación suave, pudiendo ser cero corriente ZCS o cero voltaje ZVS, con el fin de minimizar las pérdidas de potencia en los elementos encargados de realizar las transiciones de encendido y apagado.

Para el circuito en cuestión, se utilizó una conmutación ZVS ya que el capacitor perteneciente al tanque resonante, se encuentra en paralelo al interruptor y permitiendo una conmutación a cero voltaje. Al tener una bobina y un capacitor a la salida del convertidor resonante, se pretende hacer coincidir la frecuencia de resonancia con la frecuencia de trabajo, a su vez esta conexión entre los elementos provoca una corriente eléctrica que alterna entre ellos a una frecuencia angular (Ecuación 1).

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad [1]$$

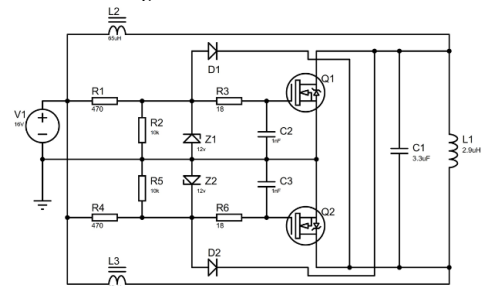
ω = frecuencia angular

L = Inductancia

C = Capacitancia

Se utilizó un convertidor resonante de conmutación por voltaje cero como se mencionó anteriormente con un diseño mostrado en la Figura 2.

Fig. 2 Inversor resonante



Fuente: Elaboración propia

Los inductores toroidales L2 y L3 permiten mantener una señal de salida estable, así como controlar las corrientes en base a la muestra que se expone a la bobina de inducción. Si la muestra expuesta en el interior de la bobina es más grande del 50% del área interna de la bobina de inducción, el valor de los inductores toroidales deberá ser estimado con respecto a esta carga.

El sistema de inducción al cual se le pretende aplicar este inversor resonante utilizara muestras de 2 x 1 cm, por lo tanto, se optó por elegir un valor de inductancia de 65uH.

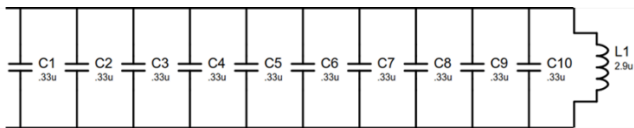
Utilizando las ecuaciones para el cálculo de inductancia de bobina [6] así como la consideración de las equivalencias de la densidad de flujo (B) y la geometría del toroide, se realizan los cálculos requeridos para determinar el numero de vueltas de alambre conductor para una bobina de tipo toroide, específicamente utilizando un toroide T106 de color amarillo y blanco, se tiene:

$$N = 36.055 \quad [2]$$

Por lo que para la construcción del toroide se utilizaran 36 vueltas de alambre.

Utilizando pulsos análogos como pulsos de disparo de los Mosfets, se genera una señal de alta frecuencia que alimenta el circuito tanque, compuesto por 10 capacitores de tipo MKPH, con una frecuencia de trabajo de 50kHz y una capacitancia de 0.33 uF. La utilización de esa cantidad de capacitores fue para repartir el calor que estos pudieran sufrir al estar expuestos a una frecuencia alta, Figura 3.

Fig. 3 Capacitores de alta frecuencia y bobina de inducción

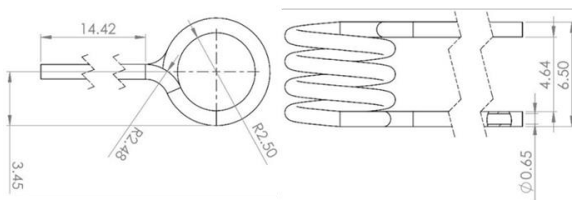


Fuente: Elaboración propia

II. BOBINA DE INDUCCIÓN

De acuerdo a los requerimientos y consideraciones respecto a la temperatura y amperaje que estarán influyendo en la bobina de inducción, se propone su construcción con tubo de cobre de 0.93 cm de diámetro, permitiendo un flujo de refrigerante al interior de la bobina. Respecto a las muestras que estarán dentro de ella para su tratamiento térmico, se diseña la bobina bajo las medidas mostradas en la Figura 4. De acuerdo a la construcción y material utilizado en la bobina de inducción, su valor de inductancia puede variar respecto a los valores que resultaran tras un cálculo, al existir separaciones entre cada vuelta y un conductor hueco como lo es el tubo flexible de cobre, por lo que se propone utilizar una inductancia de 2.9 uH, corroborada su inductancia con un inductómetro tras su construcción.

Fig. 4 Plano del diseño de la bobina de inducción

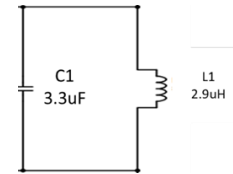


Fuente: Elaboración propia

III. CIRCUITO TANQUE

El circuito de la figura 3 se puede simplificar utilizando un solo capacitor del valor equivalente de los 10 que están presente (solo como análisis), y obteniendo el circuito tanque mostrado en la figura 5.

Fig. 5 Circuito tanque



Fuente: Elaboración propia

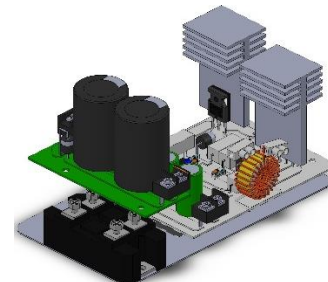
Utilizando los valores que tiene la bobina y el valor equivalente de los capacitores se puede calcular la frecuencia de resonancia mostrada en la ecuación [3].

$$F_R = 51.447 \text{ kHz} \quad [3]$$

3. DESARROLLO

En la figura 6 se muestra el ensamble del circuito inversor resonante completo, principal elemento para general la alta frecuencia en la bobina de inducción.

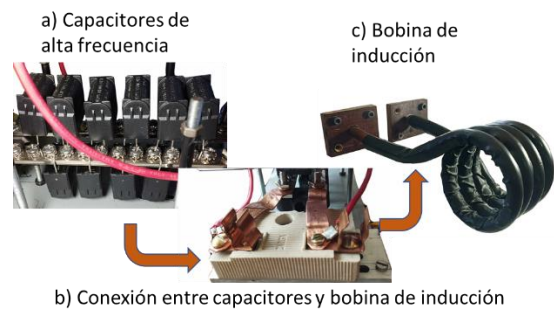
Fig. 6 Diseño previsto para el circuito inversor resonante



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, el apartado del tanque resonante esta externo en construcción al inversor resonante, al aumentar el amperaje conforme se acerca a la bobina de inducción existe el riesgo de un sobre calentamiento en conductores eléctricos, por lo que al tener una separación física de los circuitos se prioriza una ventilación forzada a los elementos que la requieran. El banco de capacitores de alta frecuencia y la bobina de inducción se muestran en la Figura 7.

Fig. 7 Composición física del circuito tanque

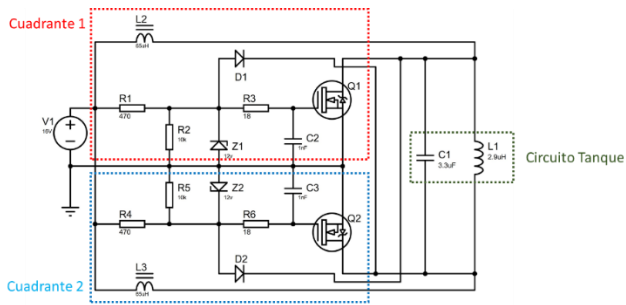


Fuente: Elaboración propia

El principio de funcionamiento del inversor resonante consiste en una auto conmutación, la cual se procede a

realizar su análisis tomando como referencia el circuito inversor posterior a la sección de rectificación, por lo que tenemos el siguiente circuito en la Figura 8 dividido por cuadrantes y el circuito tanque.

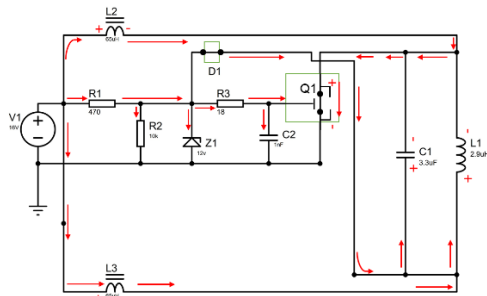
Fig. 8 Circuito inversor resonante para inducción electromagnética



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la naturaleza del circuito en cuestión, existirá un desbalance en el flujo de la corriente eléctrica, esto dado por las diferencias mínimas en resistencias internas de cada componente por el cual debe de pasar el flujo de corriente, por lo que uno de los interruptores encenderá primero que el otro. Suponiendo que el primer cuadrante será el primero en energizar el Mosfet Q1, será quien genere el primer ciclo (Figura 9).

Fig. 9 Activación del primer cuadrante del inversor resonante



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al flujo de la corriente eléctrica ilustrado con las flechas de color rojo, el primer punto en el que debe de atravesar, es un divisor de voltaje formado por R1 y R2, el cual mantiene un voltaje de salida fija con un valor dado por la ecuación 8.

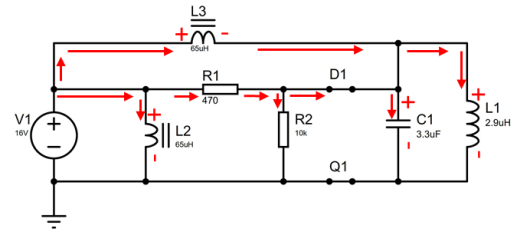
$$V_{out} = \frac{R2}{R1+R2} V_{in} \quad [8]$$

Tras pasar el divisor de voltaje, seguirá un circuito con la función de generar el voltaje de entrada a Gate de Q1, primeramente, con el diodo Zener Z1 de 12v el cual limitará un voltaje de entrada a solo 12 volts, alimentando a un arreglo RC (R3 y C2) para determinar la velocidad del pulso de entrada.

El diodo D1 se activó por el desbalance entre elementos resistivos del divisor de voltaje, por lo que en conjunto a los inductores L2 y L3 con la polaridad mostrada en la Figura 9, mantienen el flujo de corriente hasta llegar a tierra, la cual se generó al momento de activar Q1. Continuando con el análisis

del cuadrante 1, se reordenan el circuito mostrado en la Figura 10.

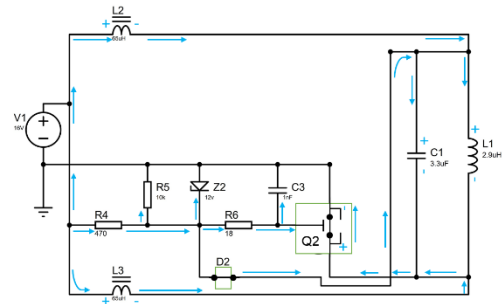
Fig. 10 Circuito equivalente tras la activación del primer cuadrante



Fuente: Elaboración propia

Como se puede mostrar en la Figura 10, los componentes (Z1, R3 y C2) para el disparo de Q1 se descartaron, el diodo D1 se representó como un cable al estar en su modo de conducción y de igual forma Q1 representado como un cable al ser activado previamente. Este circuito equivalente es quien genera el primer ciclo de la onda senoidal, al tener un flujo de corriente que carga primeramente el circuito tanque, hasta lograr que el capacitor C1 se cargue por completo y habrá su línea de circuito y cargando L1 hasta cortocircuitar su línea, prosiguiendo con los inductores L3 y L2, esto dando resultado a que el flujo de corriente de la fuente de alimentación del cuadrante 1 se descargue directamente a tierra o a 0, por lo que sin voltaje en el divisor de tensión, Q1 se apaga y la energía se transfiere al cuadrante 2.

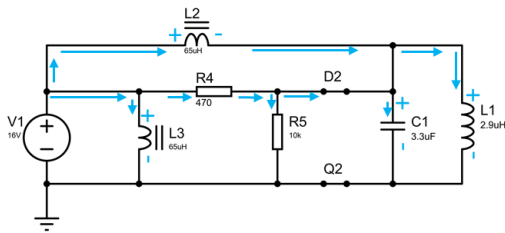
Fig. 11 Activación del segundo cuadrante del inversor resonante



Fuente: Elaboración propia

Al ser retransmitida la corriente eléctrica al cuadrante dos (Figura 11), comienza el flujo para la activación de los componentes de manera similar al cuadrante 1, representada la corriente eléctrica con flechas azules, llegan al segundo divisor de tensión dando un voltaje estable a los componentes encargados de generar un pulso de voltaje a 12v y con una velocidad determinada por el arreglo RC de R6 y C3. Con Q2 activado, se completa el circuito permitiendo el flujo de corriente a través de D2, los inductores L2 y L3, por lo que el circuito equivalente para generar el segundo ciclo de la onda senoidal se muestra en la Figura 12.

Fig. 12 Circuito equivalente tras la activación del segundo cuadrante

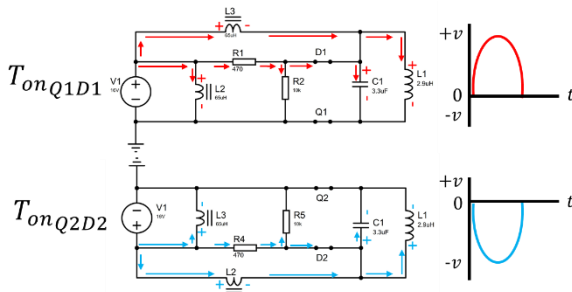


Fuente: Elaboración propia

Con Q2 y D2 cortocircuitados, permiten el flujo de corriente, por lo que ahora se prosigue con la carga de los elementos L1, L2 y L3, así como C1. De igual manera que en el cuadrante 1, los inductores al cargarse por completo, se cortocircuitan, por lo que el flujo de corriente de la fuente de alimentación para el cuadrante 2, se aterriza a tierra, dejando con un voltaje de 0v al divisor de tensión, apagando Q2 y redirigiendo el flujo de corriente al cuadrante 1.

En la Figura 13 se muestran los dos circuitos equivalentes de cada cuadrante, mostrando la igualdad entre ellos, pero con sus respectivos elementos activados.

Fig. 13 Circuito equivalente de cada cuadrante



Fuente: Elaboración propia

Al tener primeramente una activación del cuadrante 1, y al tener el cuadrante 2 con igualdad de construcción al cuadrante 1, se permite la generación de ambos ciclos (Positivo y negativo) de manera intercalada, para finalmente obtener una señal de corriente alterna en la bobina de inducción, generando campos electromagnéticos variables.

4. RESULTADOS

A continuación, se presenta en la Figura 14 el circuito inversor resonante ensamblado de acuerdo al diseño previsto.

Fig. 14 Circuito inversor resonante ensamblado

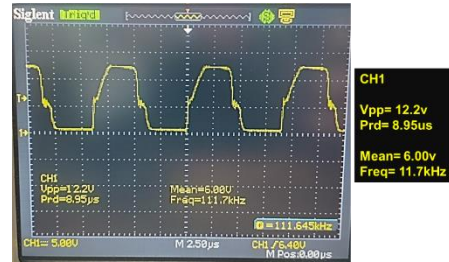


Fuente: Elaboración propia

Considerando el análisis del funcionamiento del inversor resonante y la auto conmutación, se realizó el monitoreo de las señales generadas en el sistema de inducción por medio de un osciloscopio.

En la Figura 15, se muestra la señal de entrada del Mosfet Q1, el cual es una onda semi cuadrada en forma de pulso generada por el propio funcionamiento del circuito y la resonancia magnética del circuito tanque.

Fig. 15 Señal de disparo de Q1 en osciloscopio

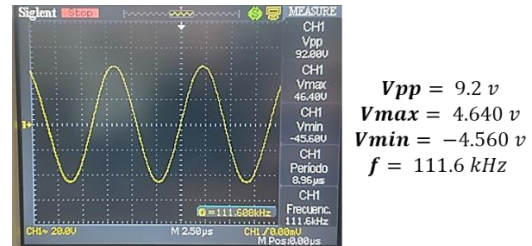


Fuente: Elaboración propia

Para la señal de entrada de Q2, tiene una igualdad en su forma, sin embargo, cada pulso para Q2 esta activado cuando el de Q1 esta apagado como se especificó anteriormente en su principio de funcionamiento.

En la Figura 16 se puede apreciar la señal de salida utilizando una sonda con una atenuación de 10X de la bobina de inducción, la cual tiene una señal senoidal, en la Figura 15 se muestran los valores de voltaje transformados a una atenuación de 1X.

Fig. 16 Señal alterna proveniente de la bobina de inducción



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la teoría, tras obtener una señal de alta frecuencia variable, se puede producir un campo magnético variable dentro de la bobina de inducción, por lo que se introdujo piezas de metal ferromagnético (o ferroso) para la observación del aumento de temperatura como se muestra en la Figura 17.

Fig. 17 Clavos expuestos a inducción electromagnética



Fuente: Elaboración propia

La Figura 17 muestra dos tornillos de metal al rojo vivo, sostenidos por una pieza de cerámica para aislar el calor de la pieza de la propia bobina de inducción y esta no se quema por el contacto. De acuerdo a la temperatura registrada por un termopar instalado en el sistema de inducción, se registró un aumento de temperatura desde 27°C a 500°C en 5 minutos de haber encendido la inducción electromagnética.

En la siguiente Figura 18 se muestra un tubo de metal en una tonalidad rojiza por el aumento de temperatura por inducción y siendo separada de la bobina de inducción por una pieza construida de ladrillo refractario con el fin de aislar el calor radiante de la pieza.

Fig. 18 Tubo de metal ferroso expuesto a inducción electromagnética



Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El circuito inversor resonante completo permite la generación de una corriente alterna de 9.2 V, un amperaje de 48 A y una frecuencia de oscilación de 111.6 kHz, considerando que el metal expuesto a los campos electromagnéticos dentro de la bobina de inducción, es de un acero de tipo ferroso con un peso de 9.22 gr, se requirió de 48 A para subir la temperatura del metal hasta 500°C.

Es importante mencionar que al introducir un metal ferroso más pesado y más grande en sus dimensiones físicas, a la bobina de inducción, este requiere de una corriente eléctrica mayor, por lo que si la fuente de alimentación no está en condiciones para soportar la corriente que se requiera para calentar esa pieza, existirá un aumento de temperatura en el transformador reductor y en conductores eléctricos, por lo que es recomendable limitar una corriente de trabajo límite para el circuito inversor completo así como cada una de las conexiones entre cada subsistema o módulo que esté disponible.

De acuerdo a el propio funcionamiento de un sistema de inducción electromagnética, este no puede calentar metales de tipos no ferrosos, como los son el aluminio o el cobre, sin embargo, la posibilidad de generar un aumento de temperatura en dichos metales no ferrosos, aumenta al diseñar o introducir dentro del a bobina de inducción recipientes que reaccionen ante el calentamiento por inducción.

La elección de los valores de los componentes del circuito inversor también influye en los resultados de la temperatura a obtener en cierto metal ferroso, modificando la construcción de la bobina de inducción incrementa o disminuye la temperatura final de la pieza metálica.

6. REFERENCIAS

- [1] J. C. Sánchez, “Selección y acoplamiento de un micro horno de inducción”, Tesis de fin de grado, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México, México, 2018.
- [2] W. S. Mejía y G. F. Villalobos, “Diseño de un horno por inducción para prácticas en laboratorio”, Proyecto integral de grado, FUA, Programa de ingeniería mecánica, Bogotá, Colombia, 2019.
- [3] J. C. Sánchez, “Selección y acoplamiento de un micro horno de inducción”, Tesis de fin de grado, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México, México, 2018.
- [4] M. H. Rashid, Electrónica de potencia. Cuarta Edición. México: Pearson Educación. 2015.
- [5] N. Mohad, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Electrónica de potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño. Tercera Edición. México: McGraw-Hill. 2009.
- [6] R. Boylestad. Introducción al análisis de circuitos. Decimosegunda Edición. México. Pearson Educación. 2011.