

Desarrollo de un prototipo experimental de estación de calentamiento por inducción

M.Y. PARKINS-ORTEGA¹, L. ESQUIVEL VILLEGAS¹, L.F. PANTOJA RUÍZ¹, A.J. BALVANTIN-GARCIA¹, A. SALDAÑA-ROBLES².

¹ División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

² División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra el desarrollo de un prototipo de máquina experimental de calentamiento por inducción. El objetivo principal de este desarrollo es fabricar un dispositivo capaz de llevar a cabo el proceso de calentamiento por inducción electromagnética para realizar tratamientos térmicos de probetas de acero. Para las pruebas experimentales se utilizaron probetas de acero AISI-SAE 1018. Se diseñó un circuito ZVS, llevando a cabo una simulación del mismo en el software de acceso libre EasyEDA; posteriormente, se fabricó la placa y se realizó el montaje completo del prototipo. Se realizaron pruebas empleando diferentes fuentes de alimentación; durante las pruebas se analizó el comportamiento de la estación y se determinaron las condiciones y/o modificaciones del prototipo para mejorar su desempeño. Como resultado de este trabajo se generó un prototipo funcional de calentamiento, la metodología para su fabricación, así como también un manual de usuario en el que se detalla el procedimiento para la utilización del prototipo en futuras aplicaciones didácticas y de investigación.

Palabras clave: prototipo experimental; calentamiento por inducción, tratamiento térmico, inducción electromagnética.

Abstract

The present research work shows the development of a prototype of an experimental induction heating machine. The main objective of this project is to manufacture a device capable of carrying out the electromagnetic induction heating process for the heat treatment of steel specimens. AISI-SAE 1018 steel specimens were used for the experimental tests. A ZVS circuit was designed and a simulation of it, in the free access software EasyEDA, was performed; later, the PCB was manufactured and the complete assembly of the prototype was carried out. Tests were performed using different power supplies; during the tests, the behavior of the station was monitored and the conditions and/or modifications of the prototype were determined to improve its performance. As a result of this work, a functional heating prototype was generated, as well as the methodology for its manufacture, and a user manual in which the procedure, for the use of the prototype in future educational and research applications, is detailed.

Introducción

El calentamiento por inducción es un método en el que materiales eléctricamente conductores son calentados por medio del fenómeno de inducción electromagnética. Como su nombre lo indica, el calentamiento por inducción se basa en las corrientes eléctricas que son inducidas internamente en el material a calentar, es decir, la pieza de trabajo.

Esta tecnología ha sido ampliamente estudiada y aplicada. Mazón-Valadez, et al. [1], desarrollaron un caudín autorregulable de bajo costo de producción, basado en el calentamiento por inducción. Torres García [2] realizó un modelo de análisis y predicción de comportamiento de un acero sometido a procesos de templado por inducción, para mejorar dicho proceso.

En el año 2017, Murygin et al., diseñaron un equipo automatizado para soldar "guías de ondas", centrándose en el diseño de la forma del inductor para obtener un calentamiento óptimo de la soldadura [3]. En el 2019, Apostolidis et al., realizaron un trabajo sobre el control de la reticulación de compuestos epoxi-asfalto para reducir los tiempos de curación manteniendo las características deseadas del sistema epoxi-asfalto [4]. Por otra parte, en el 2020, Choi y Lee realizaron un estudio sobre el material AISI 1045 midiendo el endurecimiento debido a un tratamiento térmico de inducción de alta frecuencia [5]. Finalmente, en el 2021 Barglik et al., desarrollaron un modelo numérico para predecir el resultado de un endurecimiento por inducción de engranes de acero AISI 300M y realizaron una comparación con una probeta sometida al tratamiento para revisar la precisión del modelo [6].

En el presente proyecto se propone realizar la fabricación de un prototipo experimental de estación de calentamiento por inducción para el tratamiento térmico de probetas metálicas de diferentes aceros. Dichos materiales son utilizados para la fabricación de componentes mecánicos utilizados en diversas áreas de ingeniería. Este proyecto incluye la etapa del diseño del circuito para la electrónica de la estación, así como la fabricación del prototipo experimental.

Fundamentos Teóricos

Calentamiento por inducción

El calentamiento por inducción es un fenómeno multifísico que comprende una interacción compleja de fenómenos electromagnéticos, de transferencia de calor, de comportamiento metalúrgico y de análisis de circuitos altamente interrelacionados y no lineales [7]. Este fenómeno sucede cuando un voltaje alterno es aplicado a un inductor produciendo un campo magnético, variable en el tiempo, en su entorno y generando corrientes parásitas en la pieza de trabajo, las cuales producen calor debido al efecto Joule.

Los principios físicos básicos del calentamiento por inducción son la ley de Ampere, la ley de Faraday, el efecto Joule y la transferencia de calor por conducción. Basándonos en esos principios podemos obtener las ecuaciones del comportamiento del calentamiento por inducción [8].

Si consideramos que tenemos una corriente i , circulando por un inductor de N espiras y de longitud l obtenemos un campo magnético H

$$Ni = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \cong Hl \quad (1)$$

Considerando el flujo magnético ϕ que atraviesa a la pieza de trabajo podemos determinar la fuerza electromotriz fem .

$$fem = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

La fem produce corrientes i_F , llamadas corrientes de Foucault, en el material de trabajo, las cuales producen el calentamiento de la pieza debido al efecto Joule que cuantifica la potencia P en función de la corriente i_F y la resistencia equivalente R_{eq} del material

$$P = i_F^2 R_{eq} \quad (3)$$

La resistencia equivalente del material de trabajo R_{eq} es función de la longitud de penetración δ , el radio del material del trabajo r , la longitud l y la resistividad eléctrica del material ρ .

$$R_{eq} = \left(1 - e^{-\frac{2r}{\delta}}\right) N^2 \rho \frac{2\pi r}{\delta l} \quad (4)$$

Un fenómeno base del calentamiento por inducción es el efecto piel, que describe que la densidad de la corriente es máxima en el exterior del material inducido y disminuye con la profundidad, dando origen al concepto longitud de penetración δ es función de la frecuencia de variación temporal del campo magnético ω , la permeabilidad magnética del material μ y la conductividad eléctrica del material σ .

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \omega \mu}} \quad (5)$$

La inductancia del solenoide L que nos sirve de inductor es función de la longitud del solenoide l , su radio r y su número de espiras N , además de la permeabilidad del vacío μ_0 .

$$L_{(H)} = \mu_0 \frac{\pi r^2 N^2}{0.9r + 1} \quad (6)$$

Con la inductancia L y la resistencia equivalente R_{eq} se puede realizar un círculo RL en serie, con lo que obtenemos el factor de calidad Q definido como la relación de la potencia almacenada en el inductor $P_{reactiva}$ y la potencia disipada en el resistor P_{activa} .

$$Q = \frac{P_{reactiva}}{P_{activa}} = \frac{L\omega}{R_{eq}} \quad (7)$$

Con la ecuación 7 podemos definir la potencia que se aplica sobre la superficie del material de trabajo con base en la que circula por el inductor, de esa manera obtenemos la energía aplicada sobre la probeta la cual genera un calentamiento con el cuál podemos realizar un tratamiento térmico.

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico es un proceso por medio del cual podemos hacer que cambien ciertas propiedades mecánicas de un material, tales como su dureza y elasticidad, dependiendo de la temperatura a la que calentamos dicho material, la velocidad a la que se enfría, los tiempos de calentamiento, entre otros factores. El material más común al que se le aplican diferentes tratamientos térmicos es el acero.

Las aleaciones metálicas presentan múltiples fases con propiedades mecánicas distintas. Analizando el acero como ejemplo, sus múltiples fases se pueden observar en el diagrama Hierro-Carbón (Fe-C) de la Figura 1. El diagrama Fe-C es una representación gráfica del comportamiento del acero en función de la composición de su aleación y la temperatura a la que se encuentra la misma [9].

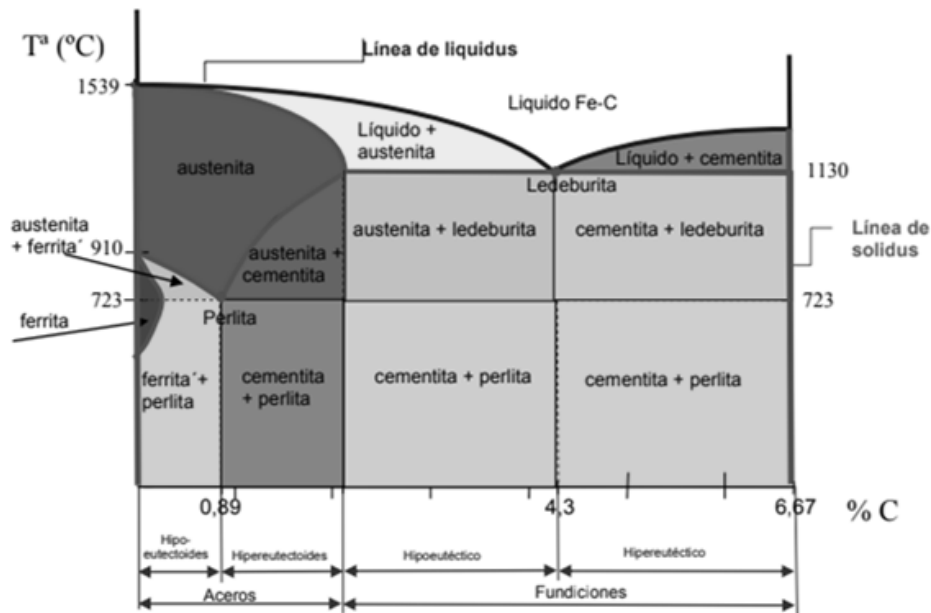


Figura 1 Diagrama Fe-C [9]

Con base en la característica mecánica que se desee obtener de un material, existen diversos tipos de tratamientos térmicos, entre los más comunes se encuentran el templeado, el recocido, el normalizado, el tratamiento para aliviar esfuerzos o el de endurecimiento superficial.

En este trabajo, se propone la generación de una estación experimental que aproveche el fenómeno de calentamiento por inducción, para generar un tratamiento térmico de temple superficial. Dicho tratamiento es un proceso empleado para mejorar la resistencia al desgaste que sufre la superficie del material, sin afectar la dureza interior del mismo, logrando una combinación de superficie dura y un núcleo resistente a la rotura. Para generar este tratamiento térmico, se debe lograr que la estación de calentamiento induzca campos magnéticos variables sobre el material. Lo anterior se logra aprovechando una configuración de circuito conocida como ZVS (zero voltage switching u onda cambiante de cero voltaje) con el cuál se cambia el sentido de la corriente en el inductor, generando así un campo magnético variable.

Circuito ZVS

La conmutación de voltaje cero se puede definir mejor como conversión de potencia de onda cuadrada convencional durante el tiempo de encendido del interruptor con transiciones de conmutación "resonantes". El circuito ZVS es un circuito oscilador con una resonancia primaria implementada con componentes denominados FETs o MOSFETs (transistores de efecto de campo). Este tipo de oscilador puede usarse para cargar el núcleo férreo de un transformador generando un alto voltaje. El mismo principio puede utilizarse para operar un embobinado simple para un calentador por inducción [10].

Comúnmente, el circuito se alimenta con una fuente de poder que oscila entre los 12-36 V con 5-20 A. Los transistores de efecto de campo (FET) son dispositivos de tres terminales: FUENTE (Source), DRENAJE (Drain) y PUERTA (Gate) que trabajan controlando la corriente entre drenaje y fuente a través del campo eléctrico establecido mediante la tensión aplicada al terminal de puerta.

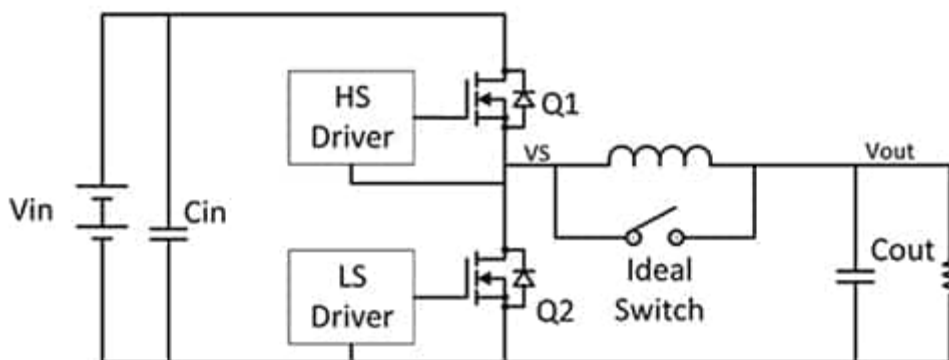


Figura 2 Topología de reducción ZVS [10]

Cuando se aplica energía al circuito, la corriente comienza a fluir a través de ambos lados del circuito primario y hacia los drenajes de los mosfets. Simultáneamente, ese voltaje aparece en las dos puertas de los mosfets, encendiéndolas. Debido a que en la práctica no hay dos componentes iguales, un mosfet se enciende más rápido que el otro y puede fluir más corriente a través del mismo. La corriente adicional que fluye en ese lado roba corriente de la puerta del otro mosfet, apagándolo. Un circuito secundario LC forma un reservorio con el primario haciendo que el voltaje suba y baje sinusoidalmente. Si no existiera dicho condensador, la corriente continuaría aumentando hasta que el núcleo del transformador se saturara y los mosfets se dañaran.

En la siguiente sección se presenta la totalidad de componentes y herramientas utilizados para la generación de un circuito ZVS que pueda funcionar para llevar a cabo el proceso de calentamiento por inducción de probetas de acero.

Materiales y Métodos

En el presente trabajo se llevó a cabo el diseño y fabricación de un prototipo experimental de estación de calentamiento por inducción para el tratamiento térmico de probetas metálicas. La intención de este trabajo es la generación de una plataforma experimental que permita en un futuro el estudio de los efectos del tratamiento térmico de temple por inducción sobre probetas de acero. También se pretende que este modelo experimental permita a los alumnos de la DICIS realizar prácticas que les ayude a comprender conceptos fundamentales de unidades de aprendizaje como: Ciencia de Materiales para Ingeniería, Ciencia de Materiales para Ingeniería Mecánica, entre otras.

Lista de herramientas y materiales requeridos

Para el proceso de fabricación del prototipo se optó por el ensamblado del circuito sobre una placa fenólica perforada para mejorar la distribución de los componentes. Sobre la placa se imprimió el circuito para posteriormente acomodar y soldar los componentes electrónicos. En las tablas 1 y 2 se enlistan los materiales y herramientas ocupados para la fabricación de este.

La variedad de materiales utilizados en el desarrollo del prototipo se presenta en la Tabla 1, en la cuál se encuentran tanto los componentes del circuito como los materiales que se usaron en su fabricación como estaño para soldadura y pasta térmica.

Tabla 1. Lista de materiales implementadas.

Lista de materiales implementados	
Placa fenólica para circuito impreso	Diodos zener y schottky
Núcleos de ferrita	Diodo LED
Ventilador 60x60 mm 12V	Transistores (FET) STY60NK30Z
Disipador de calor	Alambre de cobre esmaltado 11 AWG y 16 AWG
Resistencias de 220 Ω	Fusibles 20A con bornera sujetadora
Capacitores 0.47 μ F, 400V-1kV	Estaño para soldadura de componentes electrónicos
Conector BOOMELE XH-2A	Pasta térmica endurecible
Bornes para conexión	Pasta Flux
Separadores para PCB	Fuente de poder 12V 20A

Adicionalmente, para poder construir el prototipo se requirió de la implementación de las herramientas listadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Lista de herramientas aplicadas

Lista de herramientas aplicadas
Cautín Weller 40W
Multímetro Digital
Alicates/Pinzas antiestática
Desarmadores
Herramental Dremel multipropósito

La totalidad de componentes y herramientas se pueden observar en las figuras 3, 4, 5 y 6.

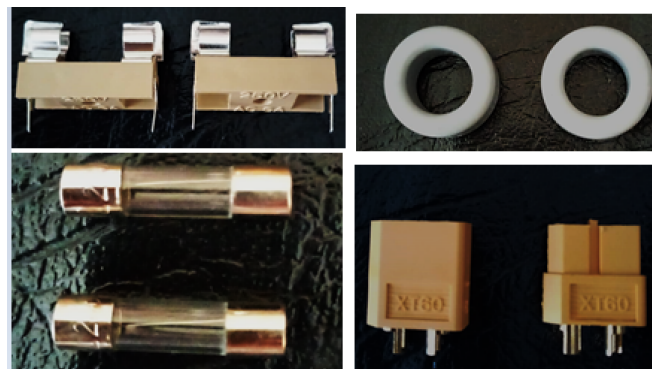


Figura 3 Borneras portafusibles (superior izq.) con fusibles (inferior izq.), núcleos férricos (superior derecha) y Conectores BOOMELE XH-2^a (inferior derecha)



Figura 4 Resistores y diodos con alambre AWG calibre 11 y 16, capacitores de película 0.47uf 400V y borneras

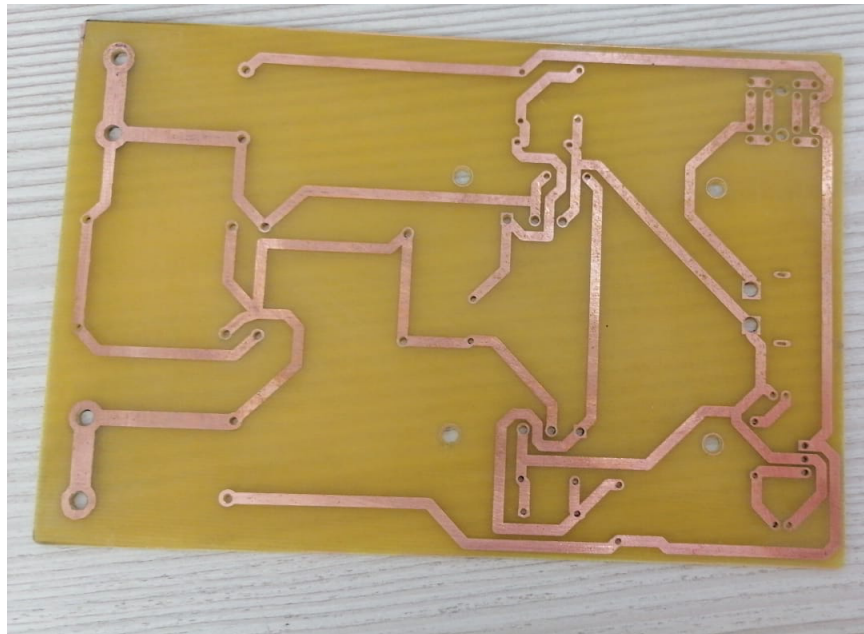


Figura 5 Placa fenólica perforada



Figura 6 Herramientas para soldadura del circuito, pinzas antiestáticas, alicates, cautín Waller 40W, pasta Flux y estaño

Descripción del diseño y construcción de la máquina.

- Diseño del esquemático

Para la elaboración del esquemático del circuito y el diseño de la PCB, se empleó el software EasyEDA, el cual es un software libre basado en la nube que permite simular, diseñar y compartir esquemas y placas de circuitos impresos de forma sencilla e intuitiva.

El circuito funciona como un oscilador LC, es decir, se induce corriente en objetos metálicos, en este caso probetas de acero, asimismo la corriente sufrirá un cambio continuo de campo magnético. La entrada corresponde a un voltaje DC cuyo rango va de 12v a 36v.

El suministro de energía alimenta al regulador de voltaje LM7812, el cual se encarga de impulsar un ventilador para mantener los MOSFETS a una temperatura adecuada. Mientras que la otra parte del suministro alimenta a los 2 MOSFETS para su funcionamiento. La configuración consiste, además, de dos inductores y una sola bobina de salida la cual inducirá el campo electromagnético en la probeta a calentar. Con estos conceptos en mente, se diseñó el esquemático del circuito, el cual se muestra en la Figura 7. La totalidad de componentes utilizados para la construcción del prototipo se enlistan en la Tabla 3.

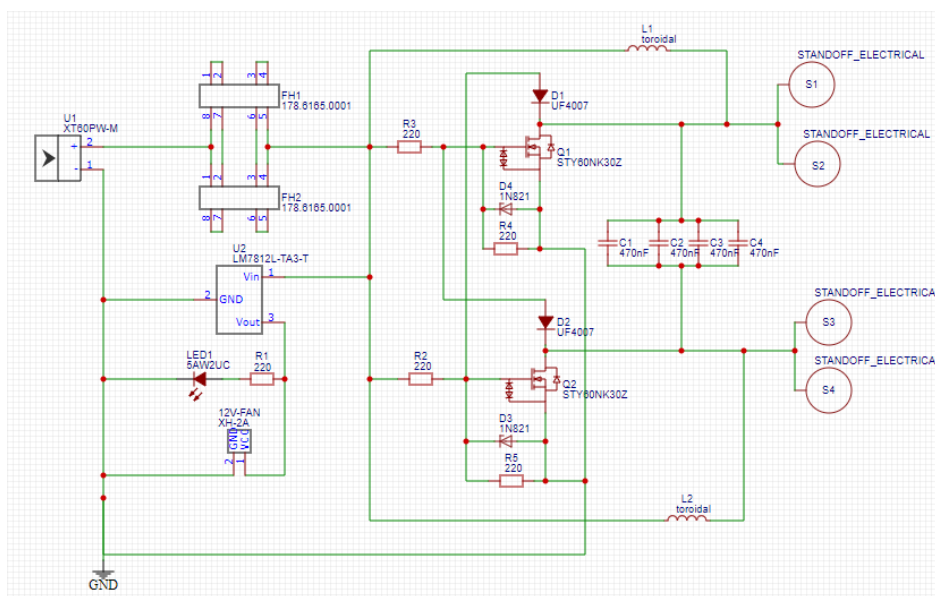


Figura 7 .Diagrama esquemático realizado en el software EasyEDA

Tabla 3 Lista de componentes electrónicos

CODIGO	NOMBRE	DESIGNACION	FOOTPRINT	CANTIDAD
5AW2UC	Diodo LED	LED	LED-5MM	1
UF4007	Diodo schottky	D1,D2	DO-41	2
R 220	Resistor	R5,R1,R2,R3,R4	AXIAL-0.4	5
Toroidal Inductor	Inductor Toroidal	L1,L2	INDUCTOR	2
1N821	Diodo Zener	D3,D4	DO35Z10	2
178.6165.0001	Fusibles 20 A	FUSE1,FUSE2	178.6165.0002-C207061	2
B32654A0474K000	Capacitores de Película 0.47uf 400V	C1,C2,C4,C3	CAP-FILM_31.5*18*27.5-P27.5 470nf	4
XT60PW-M	Bornera de conexión	U1	XT60PW-M PCBLIB	1
XH-2A	Ventilador 12V	12V-FAN	XH-2A	1
LM7812	Transistor regulador 12V	U4	TO-220(TO-220-3)	1
STY60NK30Z	Transistor FET	Q1,Q2	MAX-247	2

Después de construir el circuito en el software y validar su correcto funcionamiento, se realiza el diseño de la PCB (figuras 8 y 9), nuevamente haciendo uso del software EasyEDA. Las dimensiones de la placa a utilizar son: 100 x 150 mm y 1.6 mm de espesor.

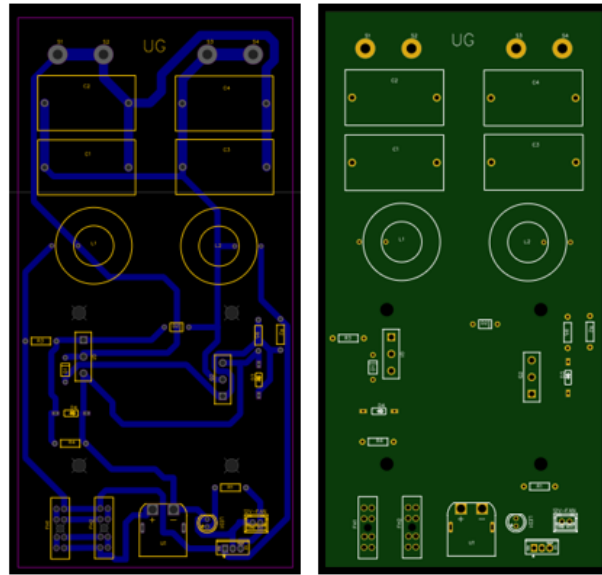


Figura 8 Diagrama representativo 2D del circuito impreso

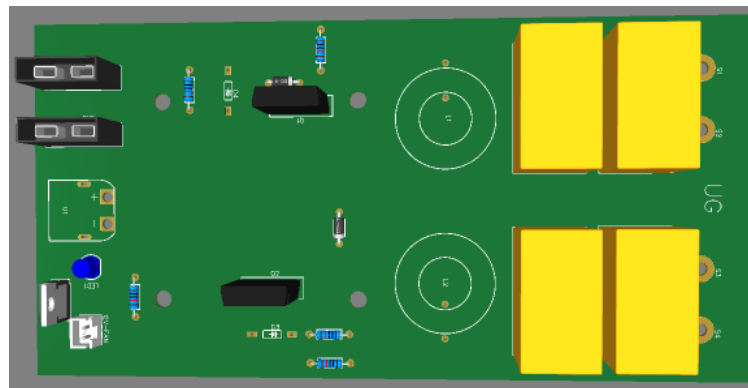


Figura 9 Representación 3D del prototipo

Posterior a la elaboración de los esquemáticos y del diseño de la PCB, se procedió a adquirir todos los materiales y componentes necesarios para construir la PCB y así posteriormente proceder con la ejecución de las pruebas experimentales.

Procedimiento de montaje y descripción de la prueba

El montaje del circuito inició con la identificación y posicionamiento de los componentes, estos se ajustan de la parte inferior para colocar la soldadura en las terminales correspondientes. Se repite el proceso hasta haber ajustado y soldado todos los componentes (ver Figura 10).

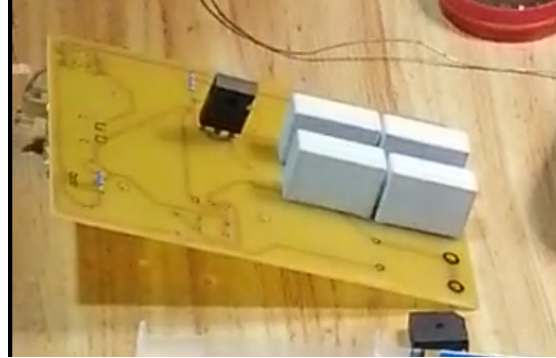


Figura 10 Montaje del circuito para soldado de componentes.

Por otro lado, los inductores toroidales (Figura 11) se fabricaron haciendo pasar el alambre AWG calibre 16 por el núcleo férrico hasta completar 22 vueltas, asegurando el correcto tensado del alambre para evitar deformaciones no deseadas en la forma del inductor. De la misma manera, la bobina inductora se fabricó al enrollar el alambre AWG calibre 11 alrededor de un tubo de 5 pulgadas de diámetro, las puntas tanto de la bobina como de los inductores se esmerilaron con un herramienta Dremel para poder asegurar la correcta soldadura de sus terminales.



Figura 11 Inductor toroidal fabricado a mano.

Por último, se conectó el circuito a diferentes fuentes de alimentación para su posterior arranque y pruebas (ver Figura 12).

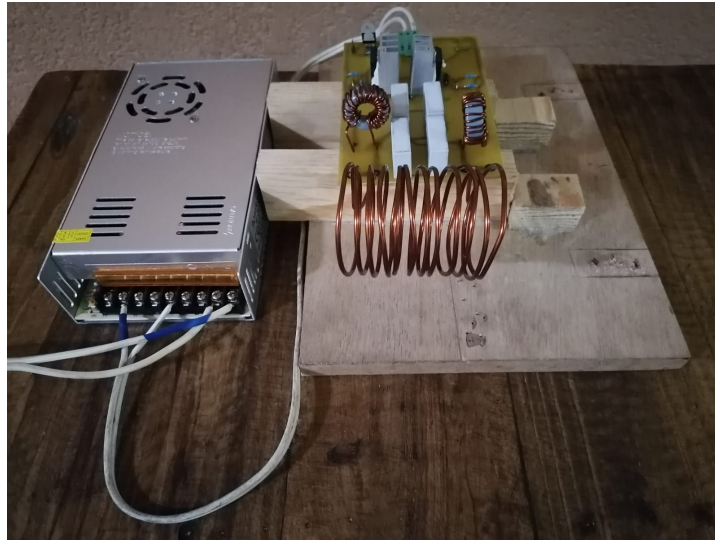


Figura 12 Ensamble final del circuito con fuente de poder

La prueba del circuito consiste en conectar una de las fuentes al circuito y dejar pasar unos segundos para revisar que no se presentaran fallas en el proceso de arranque. Posteriormente se procede a insertar con ayuda de pinzas las probetas de acero dentro del embobinado para que así este genere las corrientes parásitas en la probeta y se provoque su calentamiento. Posteriormente, se procede a medir, con ayuda de un pirómetro, la temperatura alcanzada por la probeta colocada dentro del inductor o bobina, y tomar diversas medidas de tiempo contra temperatura alcanzada, para así corroborar el funcionamiento del dispositivo.

Análisis de Resultados y Conclusiones

Al realizar la prueba con la primera fuente de 12V y 4A se observó que no se presentaron problemas de conexión entre componentes; sin embargo, la potencia suministrada por dicha fuente era insuficiente para el funcionamiento adecuado del circuito. Al observar el ventilador del circuito se notó que la velocidad a la que estaba funcionando era demasiado baja y no recibía suficiente alimentación. Con esto se concluyó que dicha fuente no era útil para el dispositivo. Adicionalmente, no se produjo un calentamiento en la probeta al colocarse dentro del inductor por un periodo prolongado de tiempo, por lo que se procedió a conectar una fuente de mayor potencia.

Al utilizar una segunda fuente de alimentación de 12V y 20A, el ventilador se comportó de manera aceptable y el circuito respondió de manera satisfactoria en su estado libre. Sin embargo, el colocar la probeta dentro del inductor generó que el circuito demandara una gran cantidad de corriente para llevar a cabo el proceso de calentamiento de la probeta. Lo anterior indica que el dispositivo funciona apropiadamente, al demandar más potencia cuando se inicia el fenómeno de calentamiento por inducción.

Desafortunadamente, después de que se inicia el proceso de calentamiento, la demanda de corriente en el circuito provocó que parte del circuito impreso en la tarjeta se dañara al mantener el funcionamiento por un tiempo determinado. Debido a esto, se concluye que el circuito propuesto es eficiente para generar el proceso de calentamiento por inducción en probetas de acero. Sin embargo, es necesario llevar a cabo un proceso de construcción más robusto de la PCB, de manera que soporte la demanda eléctrica del circuito, por tiempos prolongados, al suministrar la potencia apropiada para la tarea de calentamiento.

Bibliografía/Referencias

- [1] Mazón-Valadez, C., Quintero-Hernández, L., Mazón-Valadez, E., Hernández-Sámano, A., Ávila-Paz, J., & Cano-González, M. (2016). Developing a self-regulating soldering iron based on induction heating. *DYNA*, 83(196), 159-167. doi: 10.15446/dyna.v83n196.51208
- [2] Torres García, H. (2016). Desarrollo e implementación de modelo de predicción en procesos de temple por inducción para un acero AISI-SAE 1043 (Tesis de maestría). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.
- [3] Murygin, A., Tynchenko, V., Laptinok, V., Emilova, O. and Bocharov, A., 2017. Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 173(1), p.012023.
- [4] Apostolidis, P., Liu, X., van de Ven, M., Erkens, S., & Scarpas, T. (2019). Control the crosslinking of epoxy-asphalt via induction heating. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(8), 956-965. doi: 10.1080/10298436.2019.1652741
- [5] Choi, J., & Lee, S. (2020). High-frequency heat treatment of AISI 1045 specimens and current calculations of the induction heating coil using metal phase transformation simulations. *Metals*, 10(11), 1484.
- [6] Barglik, J., Smagór, A., Smalcerz, A., & Desisa, D. G. (2021). Induction Heating of Gear Wheels in Consecutive Contour Hardening Process. *Energies*, 14(13), 3885.
- [7] Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. L. (2017). *Handbook of induction heating*. CRC press.
- [8] Acevedo Plcón, A., Barrero Pérez, J., & Gélvez Figueredo, J. A. (2007). Calentamiento por inducción electromagnética: diseño y construcción de un prototipo. *UIS Ingenierías*, Volumen 6(Junio 2007), 69-76.
- [9] ASM International. (1991). *ASM handbook: Volume 4*. Materials Park, Ohio: ASM International.
- [10] Andreycak, B. (1990). Zero voltage switching resonant power conversion. In *UNITRODE Power Supply Design Seminar SEM-700*.