

ANÁLISIS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE COCINA A INDUCCIÓN

Jairo Bermeo C.
Universidad Internacional SEK
jairobermeo89@gmail.com

Andrés Cárdenas Y.
racardenasy@istx.edu.ec
Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi

Edwin Chamba M.
Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC) EP
echamba.monar1989@gmail.com

Recibido: 08/03/21
Aceptado: 14/06/21
Publicado: 01/07/21

RESUMEN

A partir de una investigación acerca del funcionamiento de las cocinas de inducción, sus partes (tanto internas como externas) y los materiales de los cuales se conforman, se efectuaron los cálculos y análisis necesarios para la construcción de un prototipo de cocina de inducción de una hornilla. Después de hacer la estructura (aluminio), se diseñaron los circuitos y se seleccionaron sus componentes, tanto para la alimentación de energía, el circuito de potencia y el circuito de disparo del transistor IGBT. Se realizaron mediciones y pruebas para comprobar aspectos como la funcionabilidad de los circuitos, los procesos de rectificación, la frecuencia generada, la disipación de calor en las partes cercanas a la bobina, la correcta selección de semiconductores y demás componentes necesarios para la polarización correcta de cada etapa. Se ensambló y realizó una evaluación final para comprobar el correcto funcionamiento de la cocina, efectuándose una breve comparación entre cocinas de inducción, de resistencia eléctrica y de gas licuado de petróleo.

PALABRAS CLAVE: inducción electromagnética, construcción, circuitos, polarización, cocina inducción.

ANALYSIS, DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN INDUCTION KITCHEN PROTOTYPE

ABSTRACT

Based on an investigation about the operation of induction cookers, their parts (both internal and external) and the materials of which they are made, the necessary calculations and analysis were carried out for the construction of a prototype of an induction cooker of a burner. After making the structure (aluminum), the circuits were designed and their components were selected, both for the power supply, the power circuit and the trigger circuit of the IGBT transistor. Measurements and tests were carried out to check aspects such as the functionality of the circuits, the rectification processes, the frequency generated, the heat dissipation in the parts near the coil, the correct selection of semiconductors and other components necessary for the correct polarization of each stage. A final evaluation was assembled and carried out to check the correct functioning of the cooker, making a brief comparison between induction cookers, electric resistance and liquefied petroleum gas cookers.

KEYWORDS: electromagnetic induction, construction, circuits, polarization, induction cooker

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo efectúa el diseño, análisis y construcción de un prototipo de cocina de inducción, con el objeto de conocer el funcionamiento y su tecnología. Además, comprender los beneficios y utilidad, aportando al fortalecimiento de la capacidad tecnológica nacional, a fin de un desarrollo auto sustentado.

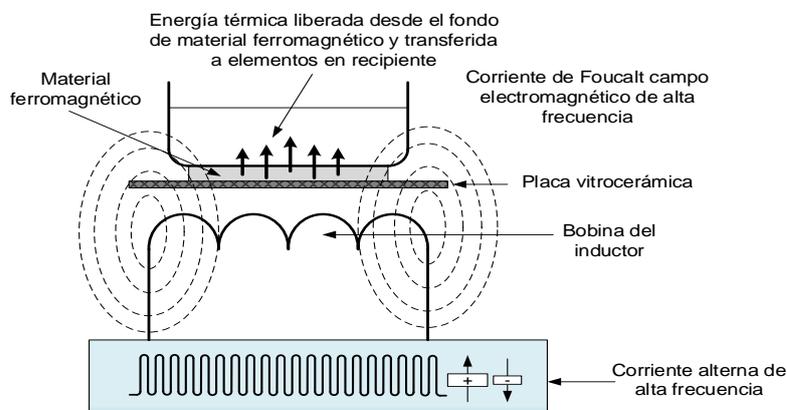
Michael Faraday analizó y enunció los principios de la inducción en el siglo XIX. El científico determinó, en síntesis, que todo campo magnético induce una corriente eléctrica (Hugh & Freedman, 2009). Usando dicho principio, la cocina de inducción fue sacada al mercado por primera vez en 1973 por la empresa norteamericana White Consolidated Industries Inc., (Estados Unidos Patent No. 4163139, 1972).

El calentamiento por inducción, se produce básicamente por un recipiente que es calentado mediante la generación de un campo electromagnético; esto se basa en la creación de un campo magnético aplicando una corriente en un inductor (Ley de Ampere) (Alonso & Finn, Física, 1995). La corriente que se aplica es variable, generando una fuerza electromotriz de inducción que tendrá un sentido opuesto al flujo, lo que hace que cuando se corte la corriente, la bobina se mantenga cargada (ley de Faraday-Lenz) (Máximo & Alvarenga, 2008). El calentamiento se da después de este punto ya que, partículas (corrientes parasitas o de Foucault) se desprenden hacia un material ferromagnético cercano produciendo calor, por el efecto Joule, (Pocorey & Andrade, 2019).

Por este motivo, se necesita el recipiente ferromagnético sobre la placa para iniciar el funcionamiento, ya que actúa como un transformador con la bobina y así, la bobina entra en resonancia con el condensador, si no existe este contacto no se iniciará el intercambio de calor, aunque la cocina esté encendida.

Figura 1

Esquema de cocina de inducción.



Fuente: adaptado de Pocorey & Andrade (2019).

Las placas vitrocerámicas son materiales que combinan la naturaleza de los vidrios y cerámicos cristalinos; mientras el material aún está en su forma vítrea se

Bermeo, J. Cárdenas, A. y Chamba, E. (2021). *Análisis, diseño y construcción de prototipo de cocina a inducción*. Revista Cotopaxi Tech, 1(1), pp. 22 - 43.

<http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/21>

julio - diciembre (2021)

ISSN 2806-5573

da la forma requerida, luego mediante un tratamiento térmico se cristaliza cerca del 90% del material vítreo. Por este motivo, la pequeña cantidad de vidrio que sobra, rellena el volumen obteniendo un producto sin porosidades. Esto le da una viscosidad más grande y un coeficiente de dilatación bajo; se dilata 0.025 mm a 500 °C; 90 veces menos que el vidrio y 190 veces menos que el acero inoxidable. Poseen una excelente resistencia al choque térmico por causa de la eliminación de los poros que actúan como concentradores de tensiones, soporta diferencias de temperaturas de 650 °C entre dos zonas del cristal, tienen una elevada durabilidad química y al tener bajos coeficientes de dilatación tiene mayor resistencia térmica que el vidrio convencional (Bender & Hellerstein, 1998).

Debido a estas características permite el paso de la luz visible e infrarroja pero no se calientan lateralmente; por esto, pueden coexistir zonas a 500 °C y otras a temperatura ambiente (Electricidad IESELBOHÍO, 2017).

La cocina a inducción ha causado gran expectativa en Ecuador ya que, enmarcado en los planes estratégicos del país, el Gobierno Nacional planteó la sustitución de las cocinas convencionales por las de inducción. En el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035, PLANEE, se establece la continuación de los planes referentes a la eficiencia energética (PLANEE, BID, MER, 2017) que tuvieron aplicación en el periodo 2007-2015, donde se contempló en el sector residencial la actualización a cocinas de inducción, basándose en características del equipo como su menor precio y costo de consumo energético y su capacidad para calentar en menor tiempo que las cocinas convencionales (Dirección de Análisis y Estrategia de Energía (DAEE), 2016). En el 2010 se implementa el Proyecto Piloto de Cocinas de Inducción que pretende determinar el impacto de la sustitución de cocinas tradicionales por cocinas de inducción. En la primera etapa se entregaron un total de 2.870 cocinas.

Entre las ventajas de utilización, se tiene la seguridad, ya que se eliminan riesgos de incendios o quemaduras del usuario, debido a que el campo electromagnético actúa solamente sobre el área del recipiente, induciendo el calor al interior de este (Benítez, Roble, Vanegas, Rodríguez, & D'Armas, 2015).

Otro de los puntos principales es la reducción de costos en los inicios del proceso de sustitución, debido al menor precio de mercado (subsidiadas) en comparación a las demás cocinas. En la actualidad, por su mayor tecnología y eliminación de subsidio, su costo relativo es mayor (Salas, 2018). Sin embargo, su uso representa un ahorro, al reducir el uso energético en el momento de cocción ya que al concentrarse el calor solo en el recipiente no existen desperdicios de energía, lo que acorta el tiempo de utilización energética optimizando su uso y ahorrando tiempo. La limpieza y el confort también son factores esenciales, si se produce un derramamiento accidental sobre la placa, este no se quemará, ni los recipientes y al no existir gran dispersión de calor, se genera un ambiente agradable (Benítez, Roble, Vanegas, Rodríguez, & D'Armas, 2015), (BOSCH, 2018). El aumento a futuro en el costo del cilindro de gas, será alrededor de 20 dólares, lo que promueve e incentiva a cambiar a una cocina de inducción (Muñoz, 2013). De

los inconvenientes, se tiene el uso solo de menaje ferromagnético y un voltaje de 220 V.

2. ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS / MATERIALES Y MÉTODOS

Se sigue la metodología general de diseño (Milani, 1997), esquematizada en la figura 2.

Figura 2

Proceso de diseño.



Fuente: adaptado de Milani (1997).

Necesidad

Crear una alternativa a los diseños comerciales y evaluación de factibilidad de construcción de modelo autóctono de una cocina de inducción.

Análisis

Por medio de la investigación de información, datos y valores se analizan los parámetros que intervienen en el diseño de elementos de componentes eléctricos, establecidos en las ecuaciones que describen el fenómeno de electromagnetismo, lo que permite realizar un diseño eficiente de un sistema de cocina por inducción, en este proceso se hace uso del método deductivo, así como el inductivo.

Definición

La cocina de inducción es un tipo de cocina vitrocerámica que calienta directamente el recipiente mediante un campo electromagnético. Estas cocinas utilizan un campo magnético alternante que magnetiza el material ferromagnético del recipiente en un sentido y en otro. Este proceso tiene menos pérdidas de energía. El material se agita magnéticamente, la energía absorbida se desprende en forma de calor y calienta el recipiente. Los recipientes deben contener un material ferromagnético al menos en la base.

Especificaciones

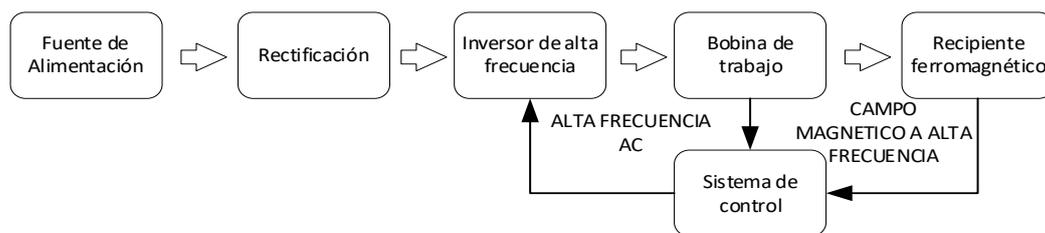
A partir de los análisis de los componentes, se consiguen los parámetros intervinientes en el diseño, procediendo a la recopilación de la información técnica, y ensamble de los componentes intermedios y producto final.

Concepción del sistema

Los componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción son: sistema de alimentación eléctrica, etapa de rectificación, inversor de alta frecuencia, bobina(s) de trabajo, sistema de refrigeración, sistema de control, carga o elemento a calentar, como lo describe la figura 3.

Figura 3

Componentes sistema de calentamiento por inducción.



Factibilidad

Se considera un proyecto factible, donde se pretende diseñar y construir un prototipo experimental con la potencia y los componentes necesarios, para constituirse en un equipo demostrativo.

Consideraciones de los componentes

Bobina

La bobina electromagnética es la parte esencial en este proceso inductivo. La selección se efectúa basándose principalmente en la frecuencia que genera el IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) y la potencia máxima requerida según el diseño. Se efectuó una investigación en el mercado y centros de servicios técnicos, concluyendo que lo necesario para la cocina sería una potencia de 1500 watts aproximadamente, para lo que se necesita una frecuencia de trabajo de 24 KHz. Se decidió esto ya que no será de uso cotidiano, la potencia escogida es aceptable y la frecuencia, es la que se necesita para generar la inducción mediante los disparos del IGBT, para lograr la resonancia entre el condensador y la bobina.

La bobina (Figura 4), posee 6 núcleos de ferrita. Está conformada por 14 alambres de cobre diamagnético entorchado y posee 40 espiras. Los núcleos de ferrita ayudan principalmente para generar la misma inductancia sin la necesidad de más espiras; además, ayuda a redireccionar el campo magnético y así evitar daños en el circuito. El efecto piel es la tendencia que poseen las corrientes de alta frecuencia a viajar por la superficie o los bordes del conductor, este fenómeno se intensifica a medida que se incrementa la frecuencia. Debido a esto se eligió una bobina de varios cables entorchados y no un cable sólido. Así, en lugar de ocupar

un cable rígido número 10 AWG, que desperdiciaría el flujo, se usa multi cables que juntos llegan a este calibre (necesario para soportar la corriente de la cocina que está entre 7 y 9 A), consiguiendo una capacidad más elevada de la corriente.

La formulación de las variables físicas, se basa en las ecuaciones que relacionan el campo eléctrico, el campo magnético y sus respectivas fuentes materiales (corriente eléctrica, polarización eléctrica y polarización magnética), conocidas como ecuaciones de Maxwell.

Figura 4

Bobina



La ley de Ampere para la distribución de un campo magnético que se genera al aplicar una corriente a un inductor o bobina se expresa en la Ecuación (1).

$$NI = \oint \vec{H} d\vec{l} = HI \quad (1)$$

Donde

N :	número de espiras del inductor
I :	corriente que lo atraviesa
H :	campo magnético
l :	longitud del circuito

La Ecuación (2) representa la ley de Faraday. Esta enuncia que cuando por una bobina circula una corriente eléctrica que es variable (alterna), se genera un campo magnético también variable que se corta y a su vez a los conductores de la bobina. Esto origina una fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida, que, según la ley de Lenz, tiene un sentido tal que siempre se opondrá al flujo (Alonso & Acosta, Inducción Electromagnética, 1978). Cuando el flujo magnético aumenta, la bobina se carga y al cortar la corriente, el flujo tiende a desaparecer y la bobina queda cargada por la energía acumulada (Alcalde, 1995).

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2)$$

Donde

ε :	f.e.m. inducida
Φ_m :	número de espiras del inductor

Al colocar un material ferromagnético en contacto con el campo magnético generado, la f.e.m. inducida, genera una corriente (corriente de Foucault). Estas son corrientes también llamadas parásitas, que tienen mayor concentración hacia el

Bermeo, J. Cárdenas, A. y Chamba, E. (2021). *Análisis, diseño y construcción de prototipo de cocina a inducción*. Revista Cotopaxi Tech, 1(1), pp. 22 - 43.
<http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/21>
 julio - diciembre (2021)
 ISSN 2806-5573

material y son las generadoras de calor por acción del efecto Joule (Alcalde, 1995). La potencia disipada se calcula con estas variables de la ecuación (3).

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

Donde

P	: Potencia disipada
I	: Corriente de Foucault
R_{eq}	: Resistencia equivalente de la pieza a calentar

Al no ser uniforme la distribución de las corrientes, la energía transferida hacia el recipiente ferromagnético se calcula con la ecuación (4)

$$P = \pi \phi h H^2 \sqrt{\pi \rho \mu_0 \mu_r} f C F \quad (4)$$

Donde

ϕ	: Diámetro cilindro
H	: Altura de cilindro
ρ	: Resistividad del material
μ_0	: Permeabilidad magnética en vacío $4\pi \times 10^{-7} H/m$
μ_r	: Permeabilidad magnética relativa del material
f	: Frecuencia Hz
C	: Factor de acoplamiento
F	: Factor de transmisión de potencia

La eficiencia energética en el inductor se estima mediante la Ecuación (5).

$$n_e = \frac{P}{P + P_i} \quad (5)$$

Donde

n_e	: Eficiencia energética
P	: Potencia inducida en la carga
P_i	: Potencia disipada en el inductor

El efecto piel es un fenómeno producido en el conductor debido a la f.e.m. inducida que se forma por el flujo de corriente variable que lo circula, la corriente deja de repartirse uniformemente y tiende a concentrarse en la parte externa del conductor.

La profundidad de penetración, para una carga cilíndrica se estima con la Ecuación (6)

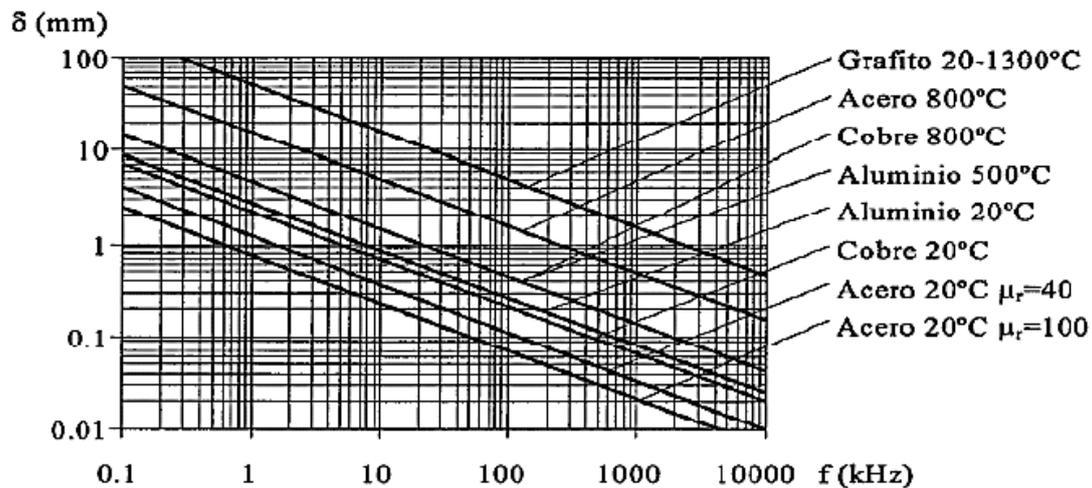
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (6)$$

Donde ρ : Resistividad del material

Utilizando la Figura 5 para la profundidad de penetración de conductores en función de la frecuencia y los otros valores conocidos (González, González, & Hernández, 2018), se obtiene un 87% de potencia total disipada, dado que la densidad de corriente que fluye a la superficie es del 63% para una capa δ .

Figura 5

Profundidad de penetración para varios materiales en función de la frecuencia.



Fuente: Gómez (1999).

La corriente inducida que circula por el conductor posee una resistencia equivalente que depende de su número de espiras y su forma geométrica, si es cilíndrica se usa (7), si es plana (8)

$$R_{eq} = k_R N^2 \rho \frac{2\pi r}{l\delta} \tag{7}$$

$$R_{eq} = k_R S \rho \frac{N^2}{l^2 \delta} \tag{8}$$

Donde

S :	Superficie calentada de la pieza
N :	Número de espiras
L :	Longitud del inductor
δ :	Profundidad de penetración

La Ecuación (9) define el valor de K_R :

$$k_R = 1 - e^{-\frac{2r}{\delta}} \tag{9}$$

Es necesario generar frecuencias en el rango 20 KHz y 30 KHz para un espesor estándar del recipiente ferromagnético (entre 0,5 mm y 3,0 mm). Para permitir la máxima transferencia de potencia son indispensables las características del material como la resistividad (ρ) y permeabilidad relativa (μ_r).

Esto también ayudará a que no existan pérdidas en la fuente cuando se tengan altas temperaturas. Se necesitan estas altas frecuencias de corriente ya que, mientras más grande sea la corriente, la concentración será mayor en la superficie debido al efecto piel.

Circuitos

La construcción de los circuitos y selección de componentes, se efectúa según el esquema generalizado en la Figura 3. Se inicia con la alimentación de energía, pasando al circuito de potencia donde se convierte la corriente alterna en continua y se amplifica la señal de la frecuencia de entrada para la magnetización de la bobina a fin de llegar a la resonancia.

Sistema de alimentación eléctrica

Proporcionado directamente desde la red de distribución eléctrica, 220 V de corriente alterna, con frecuencia de 60 Hz. Para el rectificador principal se consideró el voltaje de entrada y la potencia máxima de trabajo. La cocina se diseñó para una potencia de 1500 W (basado en las cocinas comerciales y estufas portátiles), con la Ecuación (10) se procedió a calcular la corriente.

$$P = VI \quad (10)$$

$$I_{in} = \frac{1500}{220} = 6,8A$$

Etapa de rectificación

Por medio de un puente rectificador de diodos, se convierte la corriente alterna en continua. A esto le sigue un filtro (inductor - condensador) que ayuda a tener una señal más lineal y evitar las tensiones de rizado (Miyara, 2002). Para realizar cálculos prácticos, es indispensable el empleo de valores eficaces de la tensión y de la corriente. Para hallar este valor se debe multiplicar por $\sqrt{2}$, estos valores se obtienen únicamente en corriente continua, es decir, al rectificar la alterna (Hambley, 2001).

El rectificador requiere del cálculo del voltaje pico inverso (eficaz) y de la corriente que lo circula con las Ecuaciones (11) y (12) respectivamente.

$$V_{pico_inv} = 2 \times 220\sqrt{2} \quad (11)$$

$$V_{pico_inv} = 620,4V$$

$$I_{rectificador} = 1,5 \times I_{in} \quad (12)$$

$$I_{rectificador} = 12,6A$$

Se usa el filtro Inductor-Condensador, ya que cuando pasa corriente por la bobina, esta se opone a la variación de corriente debido al efecto de autoinducción, provocando una caída de tensión en el componente que corresponde a la tensión de rizado. El efecto combinado de la inductancia y el condensador, da como resultado una tensión sin apenas rizado (Alcalde, 1995). Las corrientes armónicas que genera el inversor están entre 20 KHz y 30 KHz, por lo que para el cálculo de f_c (13), se toma a los 20 KHz como la frecuencia de corte y se asume de 1 μF al valor del condensador, ya que esto es lo usado en estos filtros para su polarización.

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}} \quad (13)$$

A partir de (13), se seleccionó la inductancia L_2 :

$$L_2 = \frac{1}{C(f_c\pi)^2} = \frac{1}{10(\pi 20)^2} = 230\mu H$$

Inversor de alta frecuencia

Para convertir la frecuencia de la red eléctrica a la frecuencia necesaria para alimentar la bobina o inductor de calentamiento, se necesita un inversor de alta frecuencia (cuasi resonante) (Salazar, 2010); se considera la potencia de trabajo y la frecuencia de resonancia. La frecuencia varía de acuerdo al nivel de potencia, ya que la profundidad de penetración depende de las características propias del material. Para evitar frecuencias de audio se requiere una frecuencia mayor a la de corte, por lo que se toma 24 KHz como frecuencia de trabajo. Mientras se entra en resonancia se pueden alcanzar hasta 30 KHz. Según el data sheet del IGBT se asume el valor del capacitor en $0,33\mu F$ para polarizar correctamente. Esto se expresa en la Ecuación (14)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (14)$$

$$L_1 = \frac{1}{C(2f_0\pi)^2} = \frac{1}{0,33(2 \times 24\pi)^2} = 163\mu H$$

La corriente resonante se estima con (15)

$$I_{resonante} = \frac{2\pi P}{V} \quad (15)$$

$$I_{resonante} = \frac{2\pi \times 1500}{220 \times \sqrt{2}} = 30,29 A$$

El voltaje en el capacitor, se calcula con (16)

$$V_c = \frac{I_{resonante}}{C2\pi f_0} \quad (16)$$

$$V_c = \frac{30,29}{0,33 \times 2\pi \times 24000} = 608,70 V$$

El factor de seguridad del 50 %, se consigue con (17)

$$V_c = 608,70 \times 1,5 \quad (17)$$

$$V_c = 913,05 V$$

Bobina(s) de trabajo

Mediante un circuito tanque L-C, la bobina, que es la encargada de generar el campo magnético, lo consigue al lograr que el circuito entre en resonancia, el valor del condensador es de 0,270 μF ya que el de la bobina es de 230 μH .

Sistema de refrigeración

Se adiciona un ventilador o un disipador para evacuar calor en las cercanías de la bobina, el ventilador trabaja directamente con los 220 V.

Sistema de control:

Se encarga de generar los pulsos de disparo del conmutador electrónico, el IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) se comportará como conmutador generando pulsaciones de disparo. Para la selección del IGBT se considera la corriente máxima, que es el valor eficaz de la corriente de entrada ya calculada con (10). El otro parámetro a considerar es el voltaje colector - emisor máximo, que es igual a la suma del voltaje de salida del rectificador y el voltaje del capacitor del inversor calculado según (17). La corriente máxima para el cálculo del voltaje colector - emisor se efectúa con la Ecuación (18)

$$I_{max} = I_{in} \sqrt{2} \quad (18)$$

$$I_{max} = 6,81\sqrt{2} = 9,63A$$

Considerando el factor de seguridad de 50%, se tiene (19):

$$I_c = 9,36 \times 1,5 \quad (19)$$

$$I_c = 14,44A$$

El voltaje colector - emisor, se consigue con (20)

$$V_{ce} = V_{rectificador} + V_c \quad (20)$$

$$V_{ce} = 220\sqrt{2} + 913,05 = 1224,18V$$

Se necesitan dos fuentes de corriente continua de baja. La primera fuente es de 12 V y alimenta el control mediante un transformador que reduce 220 V a 12 V. La segunda fuente de 5 V sirve para alimentar el sistema digital usando otro transformador para mayor reducción. Una corriente de 100 mA para el regulador de 12 V es suficiente para el control de todo el sistema, la cual se encuentra entre el disipador y el operacional. Además, es necesario un filtro capacitivo de 100 μF para eliminar el rizado, y otro capacitor de 0.1 μF para evitar los transitorios, que son respuestas que se extinguen en el tiempo. Este capacitor hace que el régimen sea permanente.

Aparte del circuito de disparo existe un sensor de realimentación de corriente que actúa únicamente cuando no está el recipiente ferromagnético, evitando que se inicie la etapa de potencia. Este sensor es un transformador que se Bermeo, J. Cárdenas, A. y Chamba, E. (2021). *Análisis, diseño y construcción de prototipo de cocina a inducción*. Revista Cotopaxi Tech, 1(1), pp. 22 - 43. <http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/21>
julio - diciembre (2021)
ISSN 2806-5573

encuentra al ingreso de una de las fases, al encender la cocina se tiene un voltaje muy pequeño de 0,15 mV, mientras que, al no tener el recipiente en la placa vitrocerámica, el sensor lo detecta y se encarga de que la corriente que circule sea mínima y aumenta únicamente a 400 mV. Sin embargo, cuando se coloca el recipiente, este actúa como un transformador secundario y llega al sensor un voltaje de 23 V, que permite iniciar el funcionamiento.

Para protección de la cocina existe un control de sobre voltaje a la entrada del colector, el voltaje máximo permitido se calcula con (21):

$$V_{max} = V_{in} \times 1,15 \quad (21)$$

$$V_{max} = 220V \times 1,15 = 253V$$

Con la Ecuación (22) se calcula el voltaje eficaz o pico máximo, que interrumpe el funcionamiento si es sobrepasado.

$$V_{pico_max} = 253\sqrt{2} \quad (22)$$

$$V_{pico_max} = 357,8V$$

Es necesario un rectificador de onda completa con dos pares de diodos para mejorar la continuidad de la corriente. La Ecuación (23) representa los parámetros para su selección; el voltaje pico inverso en uno de los pares de diodos y el voltaje que está circulando.

$$V_{pico_inv} = 2 \times 220\sqrt{2} \quad (23)$$

$$V_{pico_inv} = 622,25V$$

Debido a que existen dos pares de diodos, el voltaje pico será igual al voltaje pico inverso dividido para dos como se define en la Ecuación (24)

$$I_0 = \frac{V_{pico}}{R_{eq}} \quad (24)$$

$$I_0 = \frac{311,12V}{270k\Omega} = 1,15mA$$

Se usa la Ecuación (25) para el factor de seguridad del 50%

$$I_{diodo} = 1,5I_0 \quad (25)$$

$$I_{diodo} = 1,72mA$$

Carga o elemento a calentar

El menaje, debe estar construido con materiales ferromagnéticos, otro aspecto a tener en cuenta en relación a la pieza a calentar es la distancia entre el

Bermeo, J. Cárdenas, A. y Chamba, E. (2021). *Análisis, diseño y construcción de prototipo de cocina a inducción*. Revista Cotopaxi Tech, 1(1), pp. 22 - 43.

<http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/21>

julio - diciembre (2021)

ISSN 2806-5573

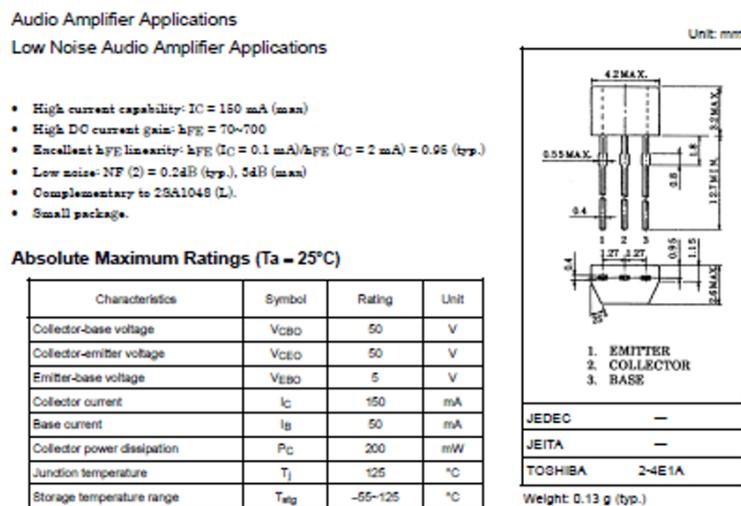
inductor que genera los campos magnéticos y el material a calentar. Mientras más pequeña sea esta distancia mayor será la corriente inducida sobre dicho material a calentar y por esta razón la cantidad de calor es mayor.

El circuito de disparo, que se encuentra antes del circuito de potencia, es manejado por un JFet (Figura 6) que se encarga de elevar los niveles de voltaje de los pulsos de disparo del IGBT. El voltaje baja en el controlador y entra en la etapa de disparo, amplificando la señal de 5V a 12 V (lo requerido por el gate del IGBT). Además, censa los niveles de voltaje con comparadores para que la corriente se mantenga constante, según la potencia seleccionada.

Al lado del disipador se transforman los 220 VAC con ayuda de un puente rectificador en 267 VDC para alimentar el IGBT. Según data sheet, este es el voltaje que debe ingresar en el emisor y el colector.

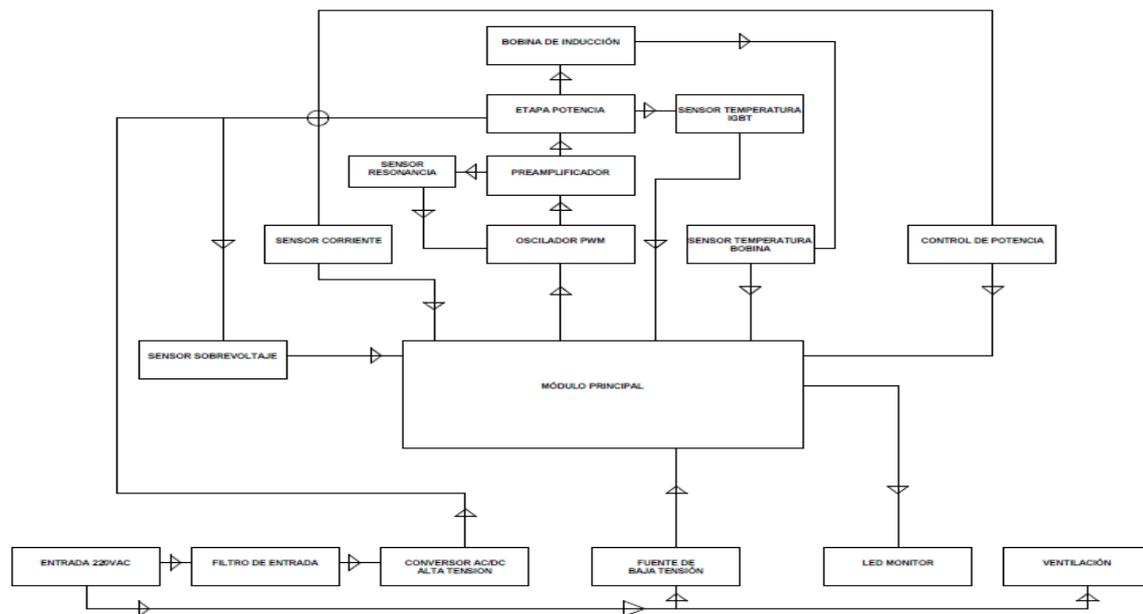
Figura 6

Data Sheet JFet



Micro Controlador

El control se efectúa con un micro controlador (Figura 7), cuya función es controlar los excesos de corriente en el IGBT y la bobina, así como generar los pulsos al IGBT mediante un potenciómetro de ajuste que se fija a la frecuencia requerida. También, recibe la realimentación para los circuitos de sobre voltaje, operacionales y el transistor de disparo. En el mando (potenciómetro principal) se ordena al relé que envíe los 220 voltios al puente rectificador. Su función principal es modificar el ancho del pulso para variar el tiempo de trabajo, posee un led con una resistencia limitadora para evitar que se queme, y una resistencia de 4300 Ω para que el voltaje se mantenga entre 0 y 5 V.

Figura 6*Microcontrolador**Estructura soporte Construcción*

La estructura que soportará a los componentes de la cocina, es de aluminio de forma cubica hueca (32,2 cm x 34,2 cm x 16,8 cm). El valor de permeabilidad relativa en vacío para el aluminio es de 1.000023 cuando está aislado (Hummel, 2001), en contacto con el aire es de toma 1.0000004 (Gonzáles, Cesari, & Viciole, 2009); el resultado con cualquiera de estos dos valores no se altera significativamente, por lo que, se toma el valor de la permeabilidad relativa del aluminio como 1.

3. RESULTADOS

Según la potencia, corriente y frecuencia estimados, se consiguió una bobina compuesta de 14 multi cables de cobre diamagnético entorchados 10AWG, que forman 40 espiras con un diámetro externo de 140 mm y un diámetro interno de 42 mm, posee 6 núcleos de ferrita en la base, que sirven para redireccionar el campo magnético y evitar daños en los circuitos.

Se obtuvo un 87% de potencia total disipada y una densidad de corriente del 63%; esto se debe a las características del material a calentar y al efecto piel. La corriente se concentrará en los bordes y no en el centro gracias a la densidad de flujo de corriente a la superficie ya mencionada, dado que la corriente es variable.

Se utilizaron materiales ferromagnéticos para el recipiente, ya que poseen una permeabilidad relativa alta. Los materiales óptimos son acero y hierro debido a que disipan mayor energía a medida que crece su temperatura. En la Figura 5, para acero de permeabilidad relativa 40, a la frecuencia de trabajo de 24 KHz, se obtuvo una profundidad de penetración de 0,2 mm. Esto es aceptable ya que, con

esa profundidad de penetración, el espesor varía entre 0,5 mm y 3 mm. Este rango de espesor es el de la mayoría de ollas en el mercado.

Como se observa en la Tabla 1, del filtro capacitivo, al tener una frecuencia entre 20 KHz y 30 KHz la resistencia es de aproximadamente 32 ohmios. Si existiera 20 KHz de frecuencia se utilizaría un capacitor de 2,5µF. Se consideró 2µF porque, con el capacitor, se obtiene esta resistencia para 24 KHz de frecuencia de trabajo.

Tabla 1

Selección de filtros capacitivos con respecto a la frecuencia y la resistencia.

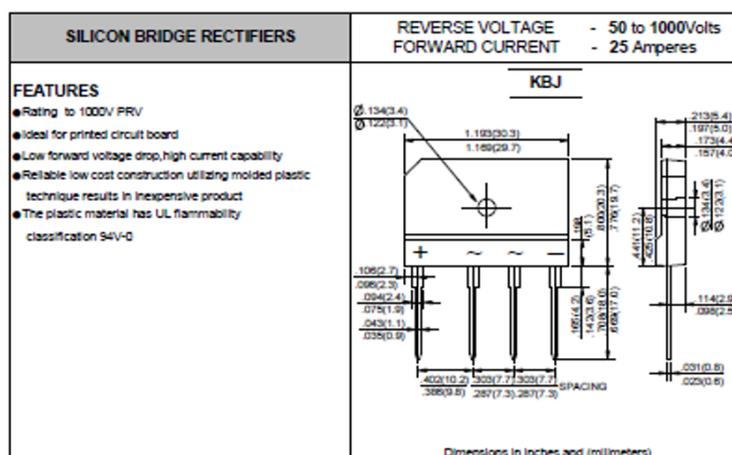
f (kHz)	1 uF	1,5 uF	2 uF	2,5 uF
10	159,236	106,157	79,618	63,694
20	76,618	53,079	39,809	31,848
30	53,079	35,836	26,539	21,232
40	39,809	26,540	19,905	14,924
50	31,847	21,230	15,924	12,740
60	26,539	17,693	13,270	10,616
70	22,748	15,165	11,374	9,098
80	19,905	13,270	9,953	7,962
90	17,693	11,795	8,847	7,078
100	15,924	10,615	7,962	5,370

Fuente: Instituto Newton Braga (2016).

Para el rectificador principal, acorde al cálculo efectuado y según la información del *Data Sheet* (Figura 7), se seleccionó un puente rectificador de 25 Amperios y hasta 1000 V, modelo KBJ2510.

Figura 7

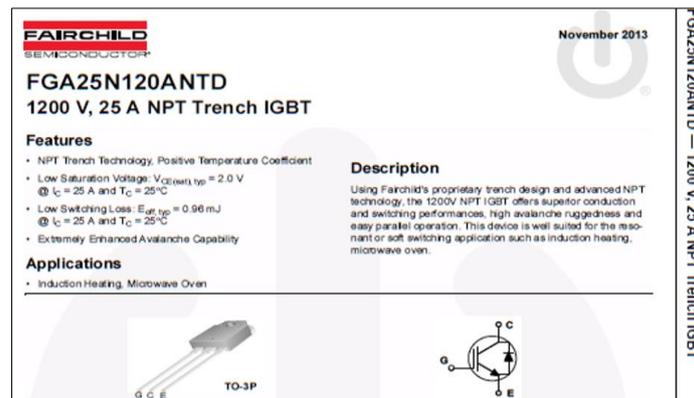
Data Sheet Puente Rectificador.



Para la selección del IGBT (Figura 8), se escogió uno que siga los parámetros de selección comprobados en las ecuaciones. Con estos datos se concluyó que el más óptimo es el modelo FGA25N120ANTD de 25 A y 1200 V.

Figura 8

IGBT



Para censar la temperatura, se utilizó un termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*), pues cumple con las características y los rangos de temperatura que podría alcanzar el sistema. Además de ser más sensible que termómetros y termopares convencionales, se maneja con el control y se encuentra sobre la bobina a 2 mm de separación de la placa vitrocerámica.

Placa vitrocerámica

La placa vitrocerámica de dimensiones (26 cm. x 28 cm. x 0,4 cm.), posee un coeficiente de dilatación térmica muy bajo (cerca de cero), lo cual ayuda para que en el momento de calentarse el recipiente, no sufra cambios en su estructura interna.

Figura 9

Placa Vitrocerámica



Estructura

La estructura consta de dos partes empernadas entre sí, la parte superior con espesor de 3,8 cm, donde se pegó la placa vitrocerámica con silicona resistente al calor, actuando como tapa. Está atornillada a la parte inferior para facilitar el desmontaje y tener un rápido acceso al circuito cuando así se lo requiera. Se colocaron 4 patas de 3,8 cm x 3,8 cm x 6 cm. del mismo material y se utilizaron rejillas en la parte trasera para evitar el ingreso masivo de polvo que podría dañar el circuito. También se realizaron algunas perforaciones con taladro para una mayor

ventilación, y al ser el aluminio difícil de soldar, se unieron las paredes con remaches, Figura 10.

Existen 9 Amperios y entre 900 y 1200 Voltios en la etapa de potencia, que físicamente se encuentran entre el disipador y el punto de conexión de la bobina.

Sobre el tornillo de la mitad del disipador hay un sensor térmico bimetálico que se destruye a los 100 °C y actúa como protección para el circuito. En el circuito, además existe un diodo dámper que entra en paralelo y conduce cuando se apaga la fuente; es decir, cuando dejan de pasar los 220 V, este se encarga de desfogar la energía almacenada en la bobina y el condensador, evitando daños en los componentes del circuito. Los diodos zener del circuito sirven para fijar los 12 Voltios DC y evitar que se sobrepasen.

Figura 10

Estructura soporte



4. DISCUSIÓN

Inductancia

La bobina elegida es similar a las bobinas de cocinas de inducción comerciales. Se la comparó en base a criterios de selección, y se consideraron el número de vueltas y el diámetro de cada vuelta, dado que la inductancia es directamente proporcional a estos dos parámetros, a diferencia de la longitud, que cuando aumenta, disminuye la inductancia. Por esto, para evitar una mayor longitud se utilizan materiales ferromagnéticos como núcleo (en este caso ferrita) que ayuda para alcanzar la misma inductancia. Las bobinas de cocinas comerciales poseen entre 20 y 40 espiras, todas tienen el mismo diámetro exterior e inferior. El parámetro que no varía considerablemente es el calibre del conductor, el cual en todos los casos es cobre diamagnético 10 AWG, capaz de soportar la corriente.

Material Ferromagnético

El acero disipa de mejor manera el calor a medida que crece la temperatura. Por este motivo, la mayoría de ollas y sartenes para cocinas de inducción en el mercado están fabricadas de material ferromagnético. El espesor medido entre varias marcas y modelos varía entre 0,5 mm y 3 mm. Los espesores más comunes son de 1,5 mm en sartenes y de 2 o 2,5 mm en ollas.

Estructura externa

Fue concebida a partir del tamaño de la placa vitrocerámica, la separación necesaria de la bobina con el aluminio y la ubicación del ventilador, que funciona con 220 V. Se colocó el ventilador entre el circuito y la bobina con el objetivo que la ventilación disipe el calor. Es decir, que por la parte superior ingresa aire frío y por los orificios traseros se expulsa el aire caliente. En la prueba final, se calentó un litro y medio de agua durante 45 minutos. El punto de ebullición se alcanza entre los primeros 4 a 5 minutos, y así se comprobó el funcionamiento prolongado de la cocina.

Frecuencia

Al comparar cocinas de inducción de distintas marcas y calidad, se encontraron cocinas con frecuencias de hasta 60KHz, las cuales son las más costosas en el mercado. Sin embargo, el rango necesario y funcional para el calentamiento por inducción varía entre 20 KHz - 30 KHz. La mayoría de marcas poseen una frecuencia de trabajo de 24 KHz, por lo que se escogió este valor para el proyecto.

Circuitos

Los circuitos constituyen la parte más compleja del proyecto, por lo que se diseñaron con base en datos iniciales obtenidos de cocinas de inducción en el mercado. Lo primordial es el circuito de potencia, ya que es considerado el motor del sistema; también se seleccionaron filtros, se diseñó el inversor cuasi resonante y se seleccionó el rectificador principal de puente de diodos y el IGBT. Posterior a esto, se analizaron los aspectos requeridos para el funcionamiento del circuito. Se construyó una fuente de baja de corriente continua para el control, el sistema digital y transformadores y rectificadores para el Gate, Emisor y Colector del IGBT. Se efectuó la realimentación de corriente para controlar la potencia mediante comparación de voltajes a la entrada del convertidor de corriente. Además, por protección se realizó un sistema para sobre voltaje proveniente de la red de alimentación eléctrica, y así evitar daños en el equipo.

El circuito de disparo es esencial para la generación de los pulsos del IGBT, los cuales se sincronizaron mediante la medición en un potenciómetro de ajuste en la placa. El circuito funcionó correctamente.

Control

En principio se planeó realizar la programación con Arduino, finalmente se llevó a cabo la programación usando microcontrolador.

Comparación entre cocinas de inducción, resistencia eléctrica y Gas Licuado de Petróleo (GLP).

En potencia de entrada, al comparar la potencia de trabajo y la nominal, el porcentaje de diferencia entre estas dos magnitudes es menor en la cocina de inducción, seguido por la de resistencias y, por último, con una diferencia de alrededor de 10% con las cocinas de GLP.

En pruebas de velocidad para calentar un material, se determinó que la cocina de inducción alcanza una temperatura determinada en menor tiempo,

Bermeo, J. Cárdenas, A. y Chamba, E. (2021). *Análisis, diseño y construcción de prototipo de cocina a inducción*. Revista Cotopaxi Tech, 1(1), pp. 22 - 43.

<http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/21>

julio - diciembre (2021)

ISSN 2806-5573

seguida por la de GLP y la de resistencia eléctrica, sin mucha diferencia entre estas dos últimas.

Otra prueba realizada consistió en determinar la distribución de temperatura en la superficie a calentar. La cocina de resistencia eléctrica presenta mayor calentamiento, concentrando de mejor manera el calor a la superficie. La cocina de GLP posee características similares a la de resistencia, es decir, las dos desperdician considerablemente energía. La cocina de GLP quedó en último lugar. La cocina de inducción se acerca a la cocina de resistencia eléctrica, pero es levemente inferior por causa de las corrientes parásitas y su concentración en mayor cantidad en los bordes del material debido al efecto piel.

La prueba de eficiencia sirve para determinar qué cocina tiene una mayor capacidad al momento de trabajar. La cocina de inducción tiene una eficiencia de alrededor del 80%, siendo superior a las de resistencia eléctrica y a la GLP. Esto se comprueba cuando se induce a las cocinas a potencias máximas y mínimas, y con estos datos se analizó cual tiene un mayor porcentaje de trabajo al momento de cocinar. La cocina de inducción presenta mayor ahorro energético ya que consume casi la mitad de energía que una de resistencia eléctrica, y también presenta ahorro en el costo energético, siendo casi del 50% con respecto a la de GLP.

5. CONCLUSIONES / CONSIDERACIONES FINALES

La cocina trabaja correctamente con los parámetros calculados ya discutidos (frecuencia de corte, eficiencias, profundidad de penetración, potencia disipada, densidad de corriente, voltajes picos). Además, fueron acertadas las selecciones hechas en los componentes de los circuitos puesto que no presentan fallas ni mal funcionamiento.

El uso del IGBT fue acertado ya que la frecuencia de trabajo de 24 KHz fue la óptima para generar el proceso de calentamiento por inducción. Además, de minimizar el espacio, funciona de mejor manera que semiconductores que podían utilizarse como *Mosfets*, y no presenta gasto mecánico.

En el potenciómetro de mando se obtiene una Potencia mínima del 10% de la Potencia máxima (1500 W), es decir 150W; además, todas las resistencias que se encuentran en el circuito son necesarias para su polarización. Sin el recipiente ferromagnético no se inicia el funcionamiento de la etapa de potencia, puesto que la corriente es baja gracias a un sensor. Esta cocina es solo un prototipo demostrativo. El JFet trabaja en el disparo para el gate del IGBT y conmuta al colector para permitir el paso de los 267 VDC.

Las cocinas de inducción son más eficientes, ahorran energía, tienen mayor capacidad y además representan un ahorro económico en el consumo energético.

6. REFERENCIAS

Alcalde, P. (1995). *Principios Fundamentales de ELECTRÓNICA*. Madrid: Paraninfo.

Bermeo, J. Cárdenas, A. y Chamba, E. (2021). *Análisis, diseño y construcción de prototipo de cocina a inducción*. Revista Cotopaxi Tech, 1(1), pp. 22 - 43.
<http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/21>
julio - diciembre (2021)
ISSN 2806-5573

- Alonso, M., & Acosta, V. (1978). Inducción Electromagnética. En M. Alonso, *Introducción a la Física* (pág. 252). Bogotá: Ediciones Cultural.
- Alonso, M., & Finn, E. (1995). *Física* (Primera ed.). Delaware, USA: Adison-Weley Iberoamericana.
- Bender, J., & Hellerstein, J. (1998). Vidrio, Cerámica y Materiales Afines. En J. Stellman, *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- Benítez, J., Roble, R., Vanegas, A., Rodríguez, O., & D'Armas, M. (2015). Sustitución de cocinas de gas licuado de petróleo por cocinas eléctricas a inducción. Un caso ecuatoriano. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 4(15), 35-46. Obtenido de sitio Web de Inco: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=215047546004>
- BOSCH. (Julio de 2018). *Blog Electrodomésticos*. (Web Oficial de Bosch Electrodomésticos) Recuperado el 5 de Octubre de 2020, de <https://innovacionparatuvida.bosch-home.es/5-ventajas-de-la-induccion/>
- Dirección de Análisis y Estrategia de Energía (DAEE). (2016). *Estado de la eficiencia energética en Ecuador: identificación de oportunidades*. Quito: Corporación Andina de Fomento. Obtenido de <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00385.pdf>
- Electricidad IESELBOHÍO. (15 de Enero de 2017). *Aplicaciones del electromagnetismo*. (Iselbohio) Recuperado el 20 de Noviembre de 2020, de <https://sites.google.com/site/electricidadieselbohio/system/app/pages/site-map/hierarchy>
- Gómez, E. (1999). *Influencia de los componentes parásitos en el análisis y diseño de inversores resonantes paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción*. Universidad de Valencia. Valencia: UV. Obtenido de http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UV/AVAILABLE/TDX-0211104-115858//esteve.pdf
- Gonzáles, A., Cesari, R., & Viciole, R. (2009). *Materiales magnéticos* (Vol. 1). Mendoza, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional. Recuperado el 2021
- González, S., González, R., & Hernández, C. (2018). *Diseño de un banco de pruebas para ensayo con equipos de bombeo y evaluación de la eficiencia aplicando variadores de frecuencia*. Universidad de El Salvador. EL Salvador: UDES. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12744/>
- Hambley, A. (2001). *Electrónica* (Segunda ed.). Madrid, España: Prentice Hall.
- Hugh, Y., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria, con física moderna* (Vol. II). Atlacomulco, México: Pearson Education, Inc.
- Bermeo, J. Cárdenas, A. y Chamba, E. (2021). *Análisis, diseño y construcción de prototipo de cocina a inducción*. Revista Cotopaxi Tech, 1(1), pp. 22 - 43. <http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/21>
julio - diciembre (2021)
ISSN 2806-5573

- Hummel, R. (2001). *Electronic Properties of materials* (Third ed.). New York, USA: Springer-Verlag New York.
- Instituto Newton Braga. (2016). Selección de filtros capacitivos. México DF, México: INCB. Obtenido de <http://www.incb.com.mx/index.php/articulos/77-tablas-formulas-y-calculos-de-circuitos>
- Malaerkey, T., & Moreland, W. (1972). *Estados Unidos Patente n° 4163139*.
- Máximo, A., & Alvarenga, B. (2008). *Física General con Experimentos Sencillos* (Cuarta ed.). México, D.F., México: Oxford University Press.
- Milani, R. (1997). *Diseño para nuestra realidad* (Primera ed.). Baruta: Equinoccio USB.
- Miyara, F. (2002). Rectificación. Rosario, Argentina. Obtenido de <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3>
- Muñoz, P. (Marzo de 2013). Analisis de la incidencia del uso de las cocinas electricas de inducción. Loja, Loja, Ecuador.
- PLANEE, BID, MER. (2017). *Plan Nacional de Eficiencia Energética del Ecuador 2016-2035*. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. Quito: Manthra Comunicación. Obtenido de https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2017/09/1.PLAN_NACIONAL_EFICIENCIA_ENERGETICA_maqueta-final-digital.pdf
- Pocorey, L., & Andrade, C. (2019). Proyecto IDH-IIAT: Cocina de inducción electromagnética - Aplicación circuito inversor resonante de medio puente con IGBT (Transistor bipolar de puerta aislada), y control PIC16F887. *Revista Tecnológica*, 15(21), 14-17. Obtenido de http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-75322019000100003&lng=es&nrm=iso
- Salas, K. (2018). *Análisis de la aplicación del programa nacional de cocción eficiente como medida para la sustitución de importaciones. Caso de estudio: Ciudad Esmeraldas*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Sede Esmeraldas. Esmeraldas: PUCE. Obtenido de <https://repositorio.pucese.edu.ec/bitstream/123456789/1538/1/SALAS%20BENAVIDES%20KARLA%20GUADALUPE%20.pdf>
- Salazar, J. (2010). *Estudio técnico-comparativo para la introducción de cocinas eléctricas de inducción magnética en el ecuador*. Escuela Politécnica Nacional. Quito: EPN. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2165>