

# PROYECTO IDH-IIAT: COCINA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

## Aplicación circuito inversor resonante de medio puente con IGBT (Transistor bipolar de puerta aislada), y control PIC16F887

### IDH-IIAT PROJECT: ELECTROMAGNETIC INDUCTION COOKER Application of half bridge resonant inverter circuit with IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor), and control PIC16F887

Luís Fernando Pocorey Choque\*  
Carlos Eduardo Andrade Mallea\*\*

RESUMEN	ABSTRACT	RESUMO
<p>El presente artículo describe aspectos referidos al proyecto de investigación financiado con recursos IDH, para el diseño y construcción de una cocina de inducción electromagnética que permita la utilización más eficiente de la energía eléctrica.</p> <p>El circuito utilizado en el proyecto para el manejo de corriente alterna de alta frecuencia se basa en un inversor resonante medio puente compuesto principalmente de IGBT cuyas señales de activación (PWM) provienen de un microcontrolador de media gama (PIC16F887). Para la validación del prototipo se realizaron pruebas comparativas que determinaron la eficiencia de éste, en relación con una cocina eléctrica convencional y una cocina de inducción comercial.</p> <p>La ejecución del proyecto permitió además cumplir con el rol de investigación aplicada referente a una tecnología poco estudiada en nuestro medio (Inducción electromagnética) como aporte académico de investigación.</p> <p><b>PALABRAS CLAVE:</b> Inducción electromagnética, IGBT, PWM, inversor resonante.</p> <p><b>History of the article:</b> Received 15/05/2019. Style review 17/05/2019. Accepted 24/05/2019.</p>	<p>This article describes the development of the research project funded with IDH resources for the design and construction of an electromagnetic induction cooker that allows the most efficient use of electric energy.</p> <p>The circuit used in the project for the operation of high frequency alternating current is based on a resonant medium bridge inverter composed mainly of IGBT whose activation signals (PWM) come from a medium-range microcontroller (PIC16F887). For the validation of the prototype, comparative tests were performed that determined the efficiency of this, in relation to a conventional electric cooker and a commercial induction cooker.</p> <p>The execution of the project also allowed fulfilling the role of applied research regarding a new technology little studied in our environment (Electromagnetic Induction) as an academic research contribution.</p> <p><b>KEYWORDS:</b> Electromagnetic induction, IGBT, PWM, resonant inverter.</p>	<p>El presente artigo descreve o desenvolvimento do projeto de investigação financeira com recursos IDH, para o desenho e a construção de uma cela de indução eletromagnética que permite a utilização mais eficiente da energia elétrica.</p> <p>O circuito utilizado no projeto para o manejo alternativo de alta frequência é baseado em um inversor de ressonância média incorporado principalmente de IGBT cuyas señales de activación (PWM) de um microcontrolador de media gama (PIC16F887). For the validation of prototype se executionon probabilidades comparatives that determined on the efficiency of thesteurent, en relocation con una cocina electric convencional and una cocina de inducción comercial.</p> <p>A ejeção do projeto permitiu também permitiu cumprir o papel de pesquisa aplicada em relação a uma nova tecnologia pouco estudada em nosso meio (indução eletromagnética) como um contribuição acadêmica de investigação.</p> <p><b>PALAVRAS-CHAVE:</b> Inducción eletromagnética, IGBT, PWM, inversor resonante.</p>

## INTRODUCCIÓN

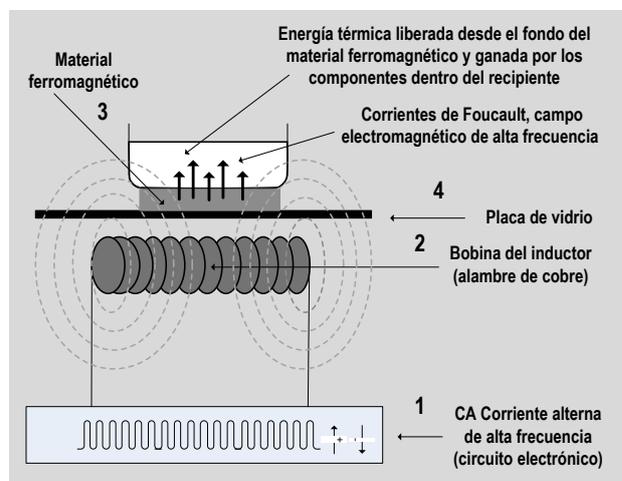
El artículo describe los principios, circuitos electrónicos y simulaciones de la cocina de inducción electromagnética desarrollada en el proyecto IDH-IIAT<sup>1</sup>, y además ofrece un balance comparativo de eficiencia energética entre: una cocina eléctrica, una cocina de inducción comercial y el prototipo en cuestión.

## DESARROLLO

### Cocina de inducción electromagnética<sup>2</sup>

En los aparatos de cocina<sup>3</sup>, que utilizan energía eléctrica, el elemento que define esta conversión energética, es el calefactor, constituido habitualmente por resistencias de alambre (níquel y cromo), o halógenas (en cocinas más modernas). Ambas transfieren el calor por radiación hacia

los recipientes de cocción. Sin embargo, para esta misma fuente de energía eléctrica actualmente se tiene un nuevo elemento calefactor designado inductor y que es instalado para generar en un dispositivo de material ferromagnético, calor por inducción electromagnética de alta frecuencia, ganando por el contenido existente en los recipientes de cocción. En la figura 1, se muestra un esquema de este sistema de inducción electromagnética, destacando sus cuatro componentes principales.



Fuente: Elaboración propia, sobre información de [13], [14]

Figura 1: Esquema sistema de inducción y componentes principales

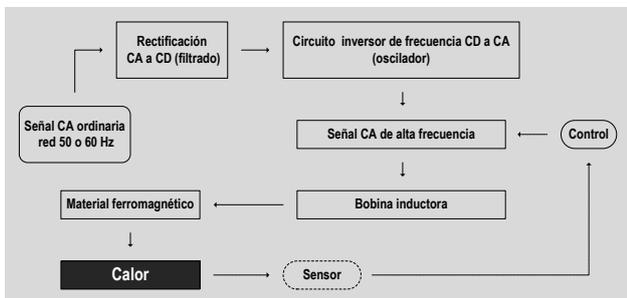
<sup>1</sup> Proyecto de investigación UMSA, financiado con recursos estatales IDH (Impuesto Directo a los Hidrocarburos) que es ejecutado por el IIAT (Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas), Facultad de Tecnología.

<sup>2</sup> Fenómeno eléctrico descubierto en 1831 experimentando con cables y circuitos por M. Faraday y J. Henry. En posteriores años H. Lenz consideró el sentido de la corriente (Ley de inducción de Faraday) demostrando que el campo magnético producido por una fuerza electromotriz (f.e.m.) o voltaje de CA al circular por un alambre de cobre (bobina primaria), cercana a otra bobina secundaria sin conexión física ni eléctrica directa, crea una CA de igual frecuencia (Hz), pero con distinto valor en el voltaje de salida de la bobina secundaria que puede ser igual, menor o mayor, de acuerdo con el número de vueltas de alambre que tiene esta bobina. [14]

<sup>3</sup> Segunda acepción DRAE: Aparato que hace las veces de fogón, con hornillos o fuegos y a veces horno. Puede calentar con carbón, gas, electricidad, etc.

El componente principal de este sistema calefactor, es el inductor conformado por una bobina de alambre de cobre enrollado o plano, y cuando a través de esta bobina pasa corriente eléctrica alterna de alta frecuencia, provoca en la base del material ferromagnético una corriente alterna de similar frecuencia. Pese a que este material no exhibe el mismo comportamiento de una bobina secundaria en un transformador, funciona de manera semejante, haciendo que las corrientes circulares o de Foucault<sup>4</sup> originadas en el material ferromagnético, no teniendo posibilidades de movimiento al igual que en una bobina secundaria ligada a un circuito eléctrico normal, convierta la energía en flujo calórico. Fenómeno físico propio de los ferromagnéticos (hierro o sus aleaciones con cobalto, wolframio, níquel, aluminio y otros materiales), que presentan conductividad eléctrica mínima, ofreciendo así, resistencia al movimiento de corriente eléctrica, y la constante vibración electrónica (alta energía) que se disipa en forma de calor.

Por lo tanto, en las cocinas de inducción electromagnética la activación del material ferromagnético y su capacidad generadora de calor necesario para cocer alimentos, se necesita CA de alta frecuencia<sup>5</sup>. Condición que se puede lograr variando la frecuencia de la CA que alimenta la red (50 ó 60 Hz.), en conexión con circuitos electrónicos que proporcionen corrientes alternas de alta frecuencia, rango (20 a 100 kHz) y muy bajos voltajes de salida ( $\pm 1V$ ). En la figura 2, se presenta el proceso que debe seguir la señal CA ordinaria de red, hasta convertirse en una señal CA filtrada de alta frecuencia que llegue a la bobina inductora, produzca la inducción en el material ferromagnético (calor a través de corrientes Foucault), que finalmente es cedido hacia el contenido de los recipientes de cocción. Además de un subsistema de automatización y control.



Fuente: Elaboración propia, sobre información de [2]

Figura 2: Proceso seguido por la señal de CA ordinaria de red, hasta convertirse en una señal CA filtrada de alta frecuencia para inducción

**Diseño y conformado de circuitos**

**a) Fuentes de alimentación**

- De acuerdo con los estándares de fuentes reguladas<sup>6</sup>, para el circuito de control y potencia, se necesitó voltajes de 5, 12 y 15 V – DC, adicionalmente se consideró mantener estable la temperatura de los componentes de potencia, incluyendo un ventilador de 12V para disipar el calor durante su trabajo.

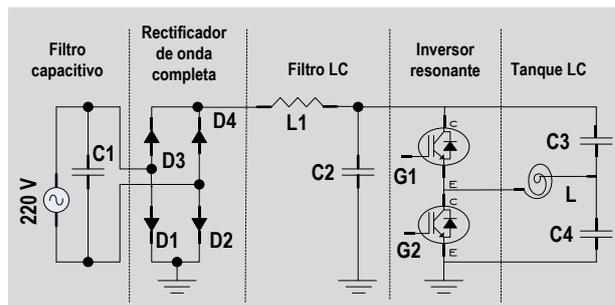
<sup>4</sup> Se produce cuando un conductor pasa por un campo magnético variable, o viceversa. Estas corrientes crean electroimanes con campos magnéticos opuestos al efecto del campo magnético aplicado (Ley de Lenz). Las corrientes de Foucault y los campos opuestos generados, aumentan proporcionalmente con: el campo magnético aplicado, la conductividad del conductor y la velocidad relativa de movimiento. [«https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Corriente\\_de\\_Foucault&oldid=11335033»](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Corriente_de_Foucault&oldid=11335033)3.

<sup>5</sup> En el SI, la frecuencia se mide en hercios (Hz) y sus múltiplos, representa la repetición de (n) eventos por segundo, ejemplo 100Hz repite el evento 100 veces por segundo.

<sup>6</sup> Circuito provisto de un regulador de tensión y un condensador que reduce el rizado de la señal, suministra tensión estable y constante para la corriente requerida por la carga. [10].

**b) Circuito de potencia**

- La figura 3, presenta el circuito de potencia utilizado, se basa en un inversor resonante de medio puente que funciona por conmutación, produciendo una señal de salida de corriente alterna. En la parte izquierda del gráfico se tiene la etapa de rectificación de AC/DC, y un filtro LC que absorbe armónicos producidos por los elementos de conmutación. [4]
- Al extremo derecho está el circuito tanque compuesto por la bobina de carga y capacitores que producen el efecto de resonancia en el recipiente de material ferromagnético. El circuito inversor resonante incorpora dos transistores IGBT<sup>7</sup>, que trabajan de manera alternada tras las señales de disparo emitidas por el circuito de control PIC 16F887 terminales de entrada puertas (G1 – G2).

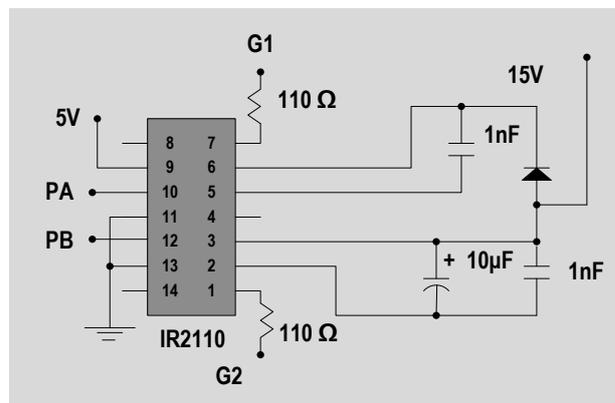


Fuente: Elaboración modificada para impresión [3] p.16

Figura 3: Circuito de Potencia de la Cocina de Inducción

**c) Circuito de disparo**

- El inversor resonante descrito previamente fue diseñado de manera tal que se garantiza que los dos IGBT no entran en conducción al mismo tiempo. La señal de conmutación que se utiliza es PWM<sup>8</sup>, la cual de acuerdo al porcentaje ancho de pulso (ciclo de trabajo) utilizado, determina los diferentes niveles de potencia de la cocina de inducción.
- Para la generación de la señal PWM, se utilizó como etapa de control dos de los pines de salida digital del (PIC16F887) microcontrolador de ocho bits programable, el cual entrega una señal de 0 a 5V que debe ser convertida a niveles de 15V para poder excitar adecuadamente a los IGBT, razón por la cual se utilizó el circuito driver IR2110<sup>9</sup> [11] como etapa de acoplamiento de niveles de voltaje (figura 4).



Fuente: Elaboración modificada para impresión [11] p.13

Figura 4: Configuración Circuito driver IR2110 para IGBT

<sup>7</sup> (Isolated Gate Bipolar Transistor), Transistor bipolar de puerta aislada.

<sup>8</sup> (Pulse Width Modulation) Modulación por Ancho de Pulso.

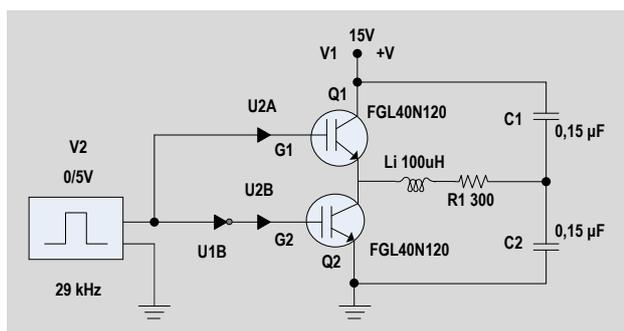
<sup>9</sup> (Controlador MOSFET de Potencia para Nivel alto y bajo).

**d) Cálculos de diseño**

El inversor resonante de medio puente utilizado fue implementado considerando los valores del inductor (L = 100uH) y capacitores resonantes (C = 0,3uF), tomando como referencia una potencia máxima de 1200W.

<b>Cálculo de la frecuencia resonante</b>	$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 1/[2(3,1416)\sqrt{(100).(0,3)}] = 29 \text{ kHz}$
<b>Cálculo de la corriente resonante para la P = 1200W, y V = 220 v</b>	$I_R = (2\pi P)/(V\sqrt{2}) = 24,23 \text{ A}$
<b>Tensión en los capacitores</b>	$V_c = I_R/2\pi f C = 24,23/[2(3,1416).(29).(0,3)] = 443,25 \text{ V}$
<b>Cálculo para el IGBT a utilizar</b>	$I_{max} = 5,45 \text{ A}\sqrt{2} = 7,70 \text{ A}$ $V_{CEmax} = V_{rect} + V_c = 2(V\sqrt{2}) + V_c = 2(220\sqrt{2}) + 443,25 = 1065,51 \text{ V} = 1066 \text{ V}$

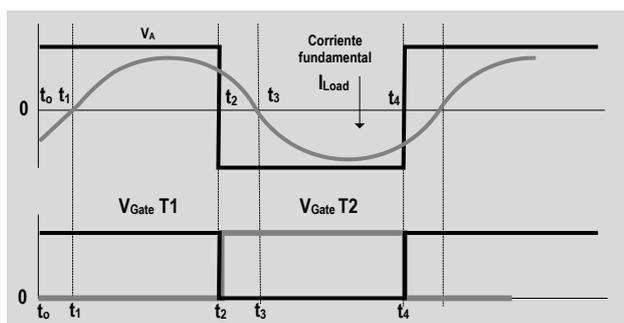
- En base a estos cálculos, el IGBT de prueba tiene que soportar corrientes de colector de 7,7A y voltajes colector emisor de 1066V, por lo que se seleccionó el IGBT modelo FGL40N120 que tiene los siguientes límites de trabajo:  $I_{max} = 40 \text{ A}$  y  $V_{CEmax} = 1200 \text{ V}$ . [12]
- La figura 5, muestra el circuito simplificado del inversor de medio puente para simulación. C = 0,3μF para un inversor resonante de medio puente, C se divide y C/2 = 0,15μF.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5:** Circuito resonante medio puente

En la Figura 6, se muestra la señal alterna resultante de la conmutación de los IGBT el ciclo positivo dependerá del tiempo de disparo en Gate1 y el ciclo negativo estará en función del Gate 2, como se observa en la gráfica, el control sincronizado de los dos IGBT es de suma importancia para evitar que puedan ser activados al mismo tiempo. Bajo estas condiciones la señal activa el circuito tanque en resonancia con el elemento de carga recipiente (ferromagnético) para generar calor en su interior por efecto de corrientes Foucault inducidas presentes en el sistema.



Fuente: Elaboración propia sobre información de [3] y [13] p.10

**Figura 6:** Formas de onda del circuito resonante de medio puente

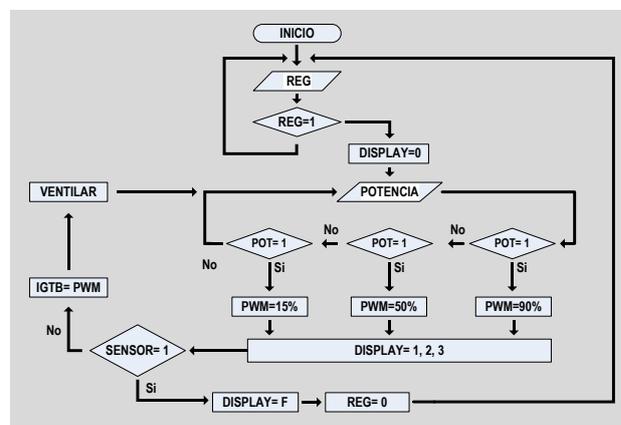
**e) Circuito de control**

El diagrama básico de conexiones del circuito de control posee tres niveles de potencia de funcionamiento, y representan el porcentaje del ciclo de servicio de la señal PWM, para potencias: P1 (Baja 15%), P2 (media 50%) y P3 (alta 90%). La selección de niveles se visualizan en un display de siete segmentos para cada potencia a través de un circuito TTL multiplexor, adicionalmente el display permite observar señales de error que pudieran producirse durante el funcionamiento.

Otros parámetros para el control del funcionamiento de la cocina de inducción son los niveles de voltaje en IGBT, temperatura de los componentes de potencia, sobretensiones y la presencia o ausencia de carga (recipiente ferromagnético).

**Lógica de programación**

- Para el control de funcionamiento del prototipo, el diagrama de flujo de la figura 7, representa la marcha del equipo en forma simplificada, el proceso de funcionamiento se inicia con la designación de una variable REG en la memoria del PIC16F887, que controla el circuito de potencia (condiciones óptimas). Cuando REG=0, el prototipo esta energizado pero aún no están activados los IGBT para generar la señal CA de alta frecuencia que fluirá en la bobina de inducción.
- Para REG=1, el usuario puede seleccionar uno de los tres niveles de potencia de trabajo que están relacionados con el ciclo de servicio (señal PWM requerida). Constantemente se indaga sobre el estado de los sensores de (Temperatura, Tensión, Carga) del circuito para determinar si se puede entregar señales excitación a los IGBT y activar el ventilador como parte del sistema de refrigeración. De presentarse alguna falla durante el funcionamiento, el display muestra la letra F como señal de error y se cambia el estado de la variable a REG=0, retornando inmediatamente al estado inicial de operación dejando inactivos a los IGBT.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7:** Diagrama de Flujo

**Análisis comparativo del funcionamiento**

Se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento de la cocina de inducción, frente a dos tipos de cocinas:

- 1) cocina eléctrica Fornax duo 2000W
- 2) cocina de inducción Iris Ohyama 1400W.

Para las condiciones experimentales de funcionamiento se utilizó 1L de agua contenido en un recipiente de material ferromagnético, y calentado hasta 80°C, probando los tres niveles de potencia del prototipo construido. La Tabla 1, detalla los resultados obtenidos tomando en cuenta como

parámetros de análisis la potencia consumida y factor de potencia, temperatura inicial del agua y tiempo requerido hasta alcanzar los 80°C.

**Tabla 1**  
**Datos comparativos pruebas de funcionamiento**  
**(Calentar 1L de agua a 80°C)**

	C. eléctrica			CC. Inducción			Prototipo		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Nivel potencia	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Potencia (W)	1400	900	450	1250	800	550	980	700	460
F. de potencia	1	1	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
T <sub>o</sub> H <sub>2</sub> O (°C)	26	26	26	27	26	26	27	26	27
Tiempo (min)	12	17	23	7	13	17	10	15	19
CEE (kWh)	0,28	0,26	0,17	0,15	0,17	0,16	0,16	0,18	0,15
Ahorro EE (%)				-46	-35	-6	-43	-31	-12
Aumento de energía EE <sub>IBC</sub> (%)				+7	+6	-6			

**Referencias:** (1) Potencia alto, (2) Potencia medio, (3) Potencia bajo,  
**CEE:** Consumo de energía eléctrica. **Ahorro EE** =  $[(EE_{Inducción} / EE_{Eléctrica}) - 1] \cdot 100$ ,  
**Aumento de energía EE<sub>IBC</sub>** =  $[(EE_{Inducción\ prototipo} / EE_{Inducción\ comercial}) - 1] \cdot 100$ .

Fuente: Elaboración propia

El consumo de energía mayor afecta a la cocina eléctrica, (Calentamiento a través de resistencias), disipando calor sin ningún tipo de sistema de control lo que la hace menos eficiente. La Tabla 1, también determina el porcentaje de incremento energético de la cocina prototipo respecto a la cocina de inducción comercial.

## CONCLUSIONES

- Lo central de la cocina de inducción electromagnética está en la construcción del circuito inversor resonante medio puente y circuito tanque LC (bobina inductora y material ferromagnético) razón por la cual, se estudio estas dos etapas con mayor énfasis, controlando el funcionamiento antes de usar el prototipo por periodos mayores a 30 minutos, evitando así, la posibilidad de sobre calentamiento en los componentes de potencia.
- En el proceso de ensamblado del circuito, se constató que al manejar corrientes elevadas, existe el peligro de fundir algunas pistas de la placa PCB, por lo que se consideró incrementar el ancho de las pistas en las etapas de potencia.
- El análisis energético comparativo, permitió establecer que la cocina de inducción prototipo, utiliza la energía eléctrica más eficientemente, respecto a la cocina de resistencia convencional (Fornax Duo), pero, no se pudo lograr la eficiencia de la cocina de inducción (Iris Ohyama comercial).
- La cocina prototipo tiene buen rendimiento a niveles bajos de potencia, reflejado en el menor consumo de energía eléctrica, sin embargo al trabajar con niveles de corriente mayores, los IGBT del circuito resonante son afectados por sobre calentamiento, bajando el rendimiento considerablemente.
- En la siguiente fase del proyecto, uno de los objetivos es identificar los parámetros eléctricos de diseño que influyen en el rendimiento del equipo, y estabilizar su funcionamiento para diferentes niveles de potencia, hasta igualar o mejorar las prestaciones de un equipo comercial.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

### [ ] Referencias bibliográficas

- Cerezo, J., 2012, Bodo's power system –ZKZ647171, IGBT Induction Heating Cookers,
- Soe Thiri, 2010, Design and construction of power system for Inducting Heating (IH) cooker using resonant converter,
- FairChild. Semiconductor, 2000, Induction Heating System Topology Review, AN9012, USA. <https://scholar.google.com/scholar?um=1&ie=UTF-8&lr&cites=17231874940903280012> (Consulta: 15/05/2019),
- Talavera Villamarin, 2017, Impacto de las Corrientes armónicas de las cocinas de inducción en los transformadores de distribución, Escuela Politécnica Nacional – EPN, Ecuador. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17522> (Consulta:13/05/2019),
- Esteves, V., 1999, Influencia de los componentes parásitos en el análisis y diseño de inversores resonantes paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción, Universidad de Valencia, España. <https://scholar.google.com/scholar?um=1&ie=UTF-8&lr&cites=10700609320941916582> (Consulta:13/05/2019),
- Zidong Liu, 2011, High Frequency Inverter Power stage design consideratins for Non-magnetic Materials Induction Cooking, Induction cooking, USA,
- Aguirre F.,2015,Diseño y construcción de una cocina de inducción electromagnética de una zona de calentamiento basado en un inversor monofásico de alta frecuencia y un microcontrolador, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil–Ecuador
- Bolaños D, Introducción a osciladores. <http://www.bolanosdj.com.ar/TEORIA/OSCILADORES1.PDF> (Consulta:13/05/2019),
- Alvares, J., 1999, Inversores resonantes de alta frecuencia, Universidad de Oviedo, España. <http://www.ieee-pels-ies.es/Pels/Pdf/Inversores%20Resonantes.pdf> (Consulta:13/05/2019),
- Cebek, EDU-009, Fuentes de alimentación lineales, módulos educacionales. <https://www.electan.com/datasheets/cebek/Edu-009.pdf> (Consulta: 13/05/2019),
- Palak Trivedi, 2016, Design of a driver IC-IR2110 for mosfet in half bridge drive, Laljibhai Chaturbhai Institute of Thecnology, Bhandu, India [https://www.academia.edu/23420416/Design\\_of\\_a\\_Driver\\_IC-IR2110\\_for\\_MOSFET\\_in\\_Half\\_Bridge\\_Drive](https://www.academia.edu/23420416/Design_of_a_Driver_IC-IR2110_for_MOSFET_in_Half_Bridge_Drive) (Consulta: 13/05/2019),
- Fairchild Semiconductor,2008,FGL40N120AND NPT-IGBT[http://biakom.com/pdf/FGL40N120AND\\_Fairchild.pdf](http://biakom.com/pdf/FGL40N120AND_Fairchild.pdf) (Consulta: 13/05/2019),
- On Semiconductor, 2014, Application Note – AND9166JP/D, Japón <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9166JP-D.PDF> (Consulta:13/05/2019),
- García, A. JA., Así funciona la cocina de inducción electromagnética. Recuperado de: [www.asifunciona.com/af\\_cocina/af\\_c...](http://www.asifunciona.com/af_cocina/af_c...)

### Fe de autores

(\*) Licenciado en Electrónica y Telecomunicaciones, MSc. Gestión de Tecnología, Docente Investigador – IIAT, Facultad de Tecnología – UMSA.

(\*\*) MSc. Ingeniero Mecánico, Docente carrera de Construcciones Civiles, Director Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas IIAT, Facultad de Tecnología – UMSA.