

Evolución histórica de los circuitos electrónicos de inducción magnética

Jesús Guamán, David Guevara, Alberto Ríos

Estudiante de pregrado, Profesor Titular e Investigador Prometeo, Universidad Técnica de Ambato, Avenida los Chasquis y Río Payamino, Ambato, Ecuador, 593.

Autores de correspondencia: /j.guaman, d.guevara, a.rios/@uta.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 20 de octubre de 2014

RESUMEN

Los dispositivos electrónicos empleados en los sistemas de calentamiento por inducción magnética han evolucionado aceleradamente gracias al desarrollo de la electrónica de potencia. Actualmente, el gobierno del Ecuador apuesta decididamente por la transformación del modelo energético. Por tanto, la sustitución de sistemas de calentamiento de agua sanitaria, que consumen importantes cantidades de recursos fósiles, por dispositivos de inducción magnética es una de las apuestas más importantes en la estrategia de transformación energética y del Plan del Buen Vivir. En el presente artículo, se presenta una clasificación y un estudio comparativo de las diferentes topologías de circuitos electrónicos empleadas en los procesos de calentamiento por inducción en los últimos 20 años. La evolución de los circuitos electrónicos de inducción magnética se debe al gran avance tecnológico de los dispositivos de conmutación suave. Los diferentes tipos de topologías existentes y su aplicación en circuitos electrónicos comerciales demuestran el creciente interés por el estudio de los sistemas de inducción magnética y su constante mejora e incremento de la eficiencia energética. En este artículo, se propone una descripción detallada de las diferentes topologías empleadas en la industria del calentamiento por inducción. En el estudio se comparan las frecuencias de resonancia, las potencias de trabajo y los datos más relevantes para el diseño y dimensionado de circuitos electrónicos de calentamiento por inducción magnética. El estudio realizado servirá como fundamento teórico para la selección y diseño de un prototipo de calentamiento de agua sanitaria por inducción electromagnética para usos domésticos. La futura propuesta de sistema de inducción magnética permitirá sustituir a los sistemas convencionales, basados en el consumo de recursos fósiles.

Palabras clave: Resonancia, inversor, conmutación.

ABSTRACT

The electronic devices used in heating systems thanks to the development of power electronics rapidly evolved to magnetic induction. Currently, Ecuador's government is firmly committed to transform the country's energy model. This will involve replacement of the classic gas-based heating systems for hot water by magnetic induction devices. The article presents a comparative study of different topologies of electronic circuits used in the induction heating process in the last 20 years. The evolution of electronic circuit's magnetic induction is due to the technological breakthrough of soft switching devices. The existing topologies and their application in commercial electronic circuits demonstrate the growing interest in magnetic induction systems and the search for continuous improvement and increase in energy efficiency. The paper provides a detailed description of the different topologies used in the induction heating industry, and provides a comparison of the resonance frequencies, the powers of labor and the most relevant designs and dimensioning of electronic circuits for magnetic induction heating. The study pretends to serve as a theoretical basis for the selection and design of prototype domestic water heating systems by electromagnetic induction for domestic use.

Keywords: Resonance, inverter, switching.

1. INTRODUCCIÓN

En el siglo XX, el fenómeno de inducción magnética se empezó a investigar con fines industriales. Entre las aplicaciones industriales más importantes destacan los equipos de fundición y endurecimiento de metales. No fue hasta 1940, durante la II Guerra Mundial, cuando el fenómeno de inducción adquirió un uso industrial en la producción de proyectiles y partes de automóviles. Las aplicaciones industriales del fenómeno de inducción magnética abrieron las posibilidades de un nuevo campo de investigación con fines domésticos.

En la actualidad, los sistemas de inducción magnética tienen una gran aplicación en sistemas domésticos. Entre esas aplicaciones destacan: las cocinas de inducción, planchas de inducción, calefactores de inducción y calentadores de agua por inducción (Ponce, 2003). Una de las principales ventajas de los sistemas de inducción magnética es su gran eficiencia energética, reduciendo la emisión de gases invernadero y evitando así el calentamiento global.

En el Ecuador, existe una gran preocupación por parte del Gobierno en iniciar un proceso de transformación del modelo energético actual. La creación de un nuevo módulo energético implica la implementación de innovadoras políticas de sustitución del consumo de combustibles fósiles. Entre los combustibles fósiles que se deberán sustituir, especial importancia tiene al gas licuado de petróleo, GLP, empleado en usos domésticos. El actual gobierno del Ecuador ha iniciado un agresivo plan de sustitución de las cocinas de gas licuado por cocinas de inducción eléctrica. La reducción de consumo de GLP evitará la importación del mismo, aportando así un gran ahorro económico al país.

En el Ecuador, en los próximos años se conectarán al sistema eléctrico nacional un gran volumen de energía eléctrica de origen renovable, procedente de varias centrales hidroeléctricas en construcción. Por tanto, las cocinas de inducción y sistemas de calentamiento de agua por inducción magnética podrán funcionar en base a electricidad proveniente de energía renovable y limpia.

El ahorro económico debido a la sustitución de sistemas de calentamiento de agua caliente sanitaria, basados en GLP, por modernos sistemas de inducción magnética permitirá al país disponer de recursos económicos adicionales y abordar la construcción de moderna infraestructura de transporte, educación, salud y vivienda, tan necesarias para la gran mayoría del pueblo ecuatoriano.

En este sentido, se considera de especial interés realizar investigaciones relacionadas con los avances tecnológicos de los sistemas de calentamiento de agua por inducción magnética. El objetivo de estas investigaciones consiste en el diseño e implementación de sistemas de agua caliente sanitaria de inducción magnética y el ensayo y prueba de innovadores circuitos electrónicos de inducción magnética.

El objetivo principal de este artículo es realizar una revisión de la evolución histórica de los circuitos electrónicos empleados en sistemas de inducción y evaluar sus principales ventajas y deficiencias como fase inicial del desarrollo de un prototipo de sistema de calentamiento de agua sanitaria por inducción magnética.

El presente artículo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2 se presentan los fundamentos teóricos del fenómeno de inducción magnética, y en la Sección 3 se describen las diferentes aplicaciones del fenómeno de inducción magnético, desde las aplicaciones industriales hasta las aplicaciones de uso doméstico. La Sección 4 se centra en la realización de una clasificación de los circuitos de calentamiento de inducción magnética en función del tipo de topología del inversor resonante, mientras la Sección 5 se presenta un estudio detallado de la evolución histórica de los circuitos electrónicos, empleados en los sistemas de calentamiento por inducción magnética en los últimos 20 años. Finalmente, en la Sección 6 se presentan las principales conclusiones del estudio y análisis de la evolución de los circuitos electrónicos de inducción magnética y se definen los circuitos a emplear en el diseño y puesta a prueba de un prototipo de sistema de calentamiento de agua sanitaria para el uso doméstico, basado en el fenómeno de inducción magnética.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA

El fenómeno de calentamiento por inducción magnética consiste en la creación de un campo magnético, que al entrar en contacto con un material metálico generan corrientes parásitas, o llamadas también corrientes de Eddy (corrientes de Foulcalt), provocando el calentamiento del material, Fig. 1 (Hincapíe & Trejos, 2013; Gómez, 1999; Álvarez, 2009; Segura, 2012; Sarnago *et al.*, 2012).

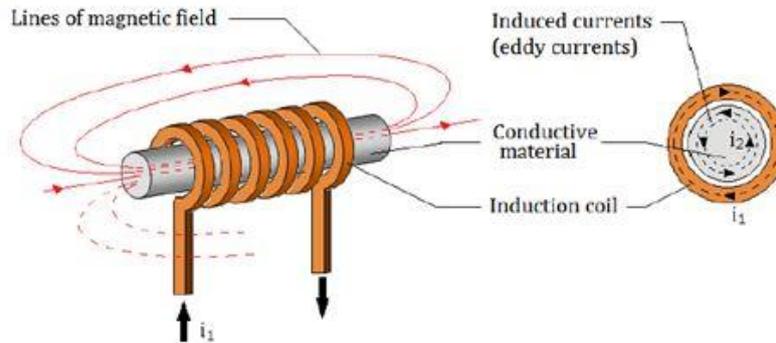


Figura 1. Principio del calentamiento por inducción (Gómez, 1999).

La distribución de la corriente, que genera el campo magnético, se representa matemáticamente con ayuda de la ley de Amper (ec. 1):

$$Ni = \oint Hdl = Hl \quad (1)$$

donde i es la corriente que circula por el conductor; N es el número de espiras; l es la longitud del circuito y H es el Campo magnético.

Si se aplica una corriente variable en el tiempo, el campo magnético que se genera tendrá esa característica. La ley de Faraday aplicada a un conductor, sometido a un flujo magnético variable, dará como resultado una fuerza electromotriz representada por la expresión matemática (ec. 2):

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

donde ε es la fuerza magnetomotriz inducida; N es el número de espiras y ϕ es el flujo del campo magnético.

Esta corriente inducida genera la corriente de Foulcalt, responsable del calentamiento por el efecto Joule disipando la potencia en forma de calor (ec. 3):

$$P = i^2 \cdot R \quad (3)$$

El funcionamiento de un sistema de inducción magnética es similar al de un transformador. La bobina de inducción representa al devanado del primario mientras que el material metálico, a calentar, sería el devanado secundario. La carga en el devanado secundario se representa por una sola espira cerrada, que simula el comportamiento un transformador en corto circuito.

El calentamiento por inducción se realiza sin contacto físico entre el generador del campo eléctrico y el material metálico. Se proporciona una conversión de energía limpia que transforma la energía eléctrica en energía térmica. Los modernos sistemas de inducción generan calor aprovechable, continuo, rápido y con un rendimiento energético elevado. Así, a diferencia de los métodos de calentamiento tradicional, como los sistemas basados en GLP y resistencias eléctricas que presentan un 45 y 65%, respectivamente, los innovadores sistemas de calentamiento por inducción, CPI, alcanzan un 90% de eficiencia energética. Además, los sistemas convencionales, basados en resistencias eléctricas, vitrocerámicas y dispositivos de combustión a GLP presentan tiempos de calentamiento significativamente elevados en comparación con los innovadores sistemas de CPI. En efecto, para una potencia dada, el tiempo de calentamiento de los sistemas de resistencias eléctricas es

de 587 segundos, vitro cerámicas igual a 537 segundos y GLP 480 segundos. En cambio, para la misma potencia dada, los sistemas de CPI no superan 278 segundos.

En la Fig. 2, se observa la eficiencia energética de distintos sistemas de calentamiento de agua (Alba, 2010; Ponce, 2003).

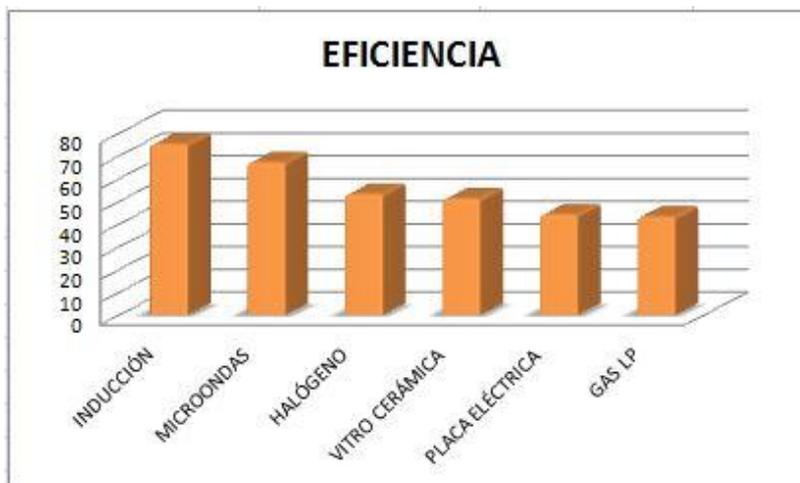


Figura 2. Comparación de eficiencia de los sistemas de calentamiento de agua.

En los materiales magnéticos como el acero, el hierro y el níquel, además, es necesario considerar el fenómeno de histéresis magnética, que depende de la intensidad del campo magnético aplicado al material y del área del mismo. El fenómeno de histéresis introduce un retardo en el tiempo de calentamiento, provocando elevadas pérdidas de energía para periodos continuos de uso de los sistemas de inducción.

Los sistemas de calentamiento por inducción trabajan a altas frecuencias que oscilan entre los 20 hasta 100 KHz. El aumento de la frecuencia de funcionamiento de los sistemas de inducción es uno de los principales puntos de innovación de los sistemas electrónicos de inducción magnética.

3. APLICACIÓN DEL FENÓMENO DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

Hoy en día las aplicaciones del calentamiento por inducción magnética son varias, destacan especialmente su utilización en la industria metalúrgica y en los electrodomésticos. Entre las diferentes aplicaciones del fenómeno de inducción magnética destacan (Álvarez, 2009; Duran-Reus *et al.*, 2012; Flores, 1998; Hernandes, 2011; Picon *et al.*, 2007).

- **Fusión:** Los materiales metálicos se calientan a altas temperaturas, hasta su fusión en el interior de hornos de crisol.
- **Forja:** Se calienta el material de forma homogénea para posteriormente utilizarlo en un proceso mecánico.
- **Tratamiento térmico:** La pieza metálica es sometida a un calentamiento rápido, posteriormente a un enfriamiento con lo que se consigue una transformación de estructura y composición del material con objeto de aumentar su dureza.
- **Soldadura:** Debido a las altas temperaturas de inducción magnética es posible realizar soldaduras de alta calidad.
- **Sellado de envases:** Es posible sellar la embocadura de algunos envases plásticos, añadiendo una fina cubierta metálica que se calienta por inducción. Se obtiene un sellado debido a la fusión del envase que está en contacto con la base metálica.
- **Electrodomésticos de inducción:**
 - **Cocinas:** Gracias al fenómeno de inducción magnética es posible construir cocinas, que permiten el calentamiento de ciertos utensilios metálicos con gran rapidez y seguridad.

- *Planchas*: Un sistema de inducción magnética que permite el calentamiento de la placa de la plancha.
- *Sistemas de calefacción*: La aplicación del fenómeno de inducción magnética en sistemas que requieren alto consumo de potencia para calentar el aire, permite reducir significativamente el consumo de electricidad.
- *Sistemas de agua caliente sanitaria*: El buscar nuevas tecnologías para eliminar la energía por combustión es uno de los principales motivos para realizar investigación en este tipo de sistemas, y promover una energía limpia a través de la energía eléctrica.

Los hornos de inducción tienen un funcionamiento similar a un transformador en régimen de corto circuito donde la carga representa el devanado secundario del transformador. La desventaja de los circuitos de inducción de los hornos es que poseen bobinas, reduciendo la eficiencia energética y el factor de potencia del proceso de inducción magnética. Los diodos de potencia al igual que los dispositivos electrónicos de potencia juegan un factor importante en la conversión de la energía (Goya & Garza, 2013).

En los últimos años el gran desarrollo de materiales semiconductores de potencia ha permitido aumentar la eficacia y sencillez de estos circuitos, haciendo posible la fabricación de los circuitos de inducción a baja escala e introducirlos en equipos para el hogar (Ponce, 2003).

El método de calentamiento por inducción se ha convertido en uno de los métodos más eficientes e innovadores, puesto que presenta características de calentamiento directo al objeto de interés y generación de temperaturas muy altas. Estas características permiten su introducción en los electrodomésticos, sustituyendo el consumo de energías fósiles y maximizando el aprovechamiento de la energía eléctrica (Flores, 2007).

Las cocinas de inducción representan un ejemplo indiscutible del aprovechamiento del fenómeno de calentamiento por inducción magnética en aplicaciones domésticas comunes. En estos electrodomésticos, el sistema de inducción consiste en un embobinado de generación de un campo magnético variable, que tiene una incidencia directa en el recipiente metálico sobre una placa cerámica, induciendo la cocción de los alimentos en el interior del recipiente (Alba, 2010).

4. CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS PROPUESTOS DE LOS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

En esta sección, se presenta una clasificación y descripción de los circuitos electrónicos, empleados en los sistemas de calentamiento por inducción magnética, en los últimos 20 años. La clasificación propuesta se basa en la topología de los inversores más utilizados comercialmente en la fabricación de equipos de inducción magnética. La propuesta de clasificación permite definir las siguientes topologías: inversor de terminación única; inversor resonante en serie de puente completo; inversor resonante en serie de medio puente; y convertidor AC/AC.

4.1. *Inversor de terminación única (SE)*

El sistema de inducción con una topología de inversor resonante directo tiene una mayor utilidad en circuitos de cocción, debido a su estructura de costos más baja, así como su eficiencia relativamente alta (Yeon *et al.*, 2003). El diagrama de circuito básico del (SE) inversor resonante se ilustra en la Fig. 3, respectivamente.

El rectificador, bobina de choque y el condensador de entrada (C_{in}), Fig. 3, comprenden una etapa de filtro de paso bajo (LPF). Mientras tanto, la bobina de trabajo puede ser representada como una combinación en serie de la inductancia (L_r) y la resistencia (R_{eq}), que se combinan con el condensador C_r para formar un circuito resonante tipo tanque.

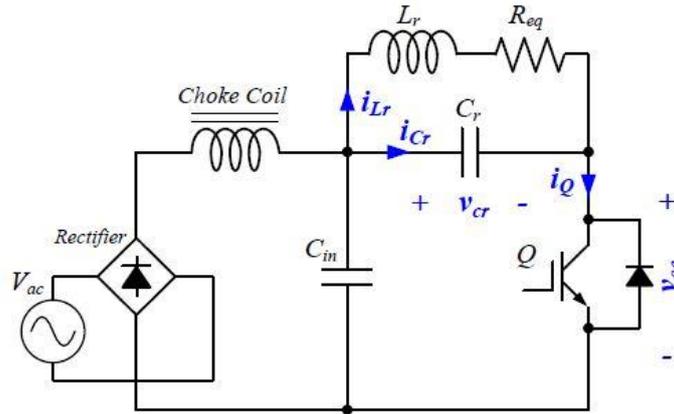


Figura 3. Diagrama esquemático del inversor resonante de terminación única.

De esta forma actúa directamente sobre el recipiente. En los últimos años, en este tipo de inversor se emplean nuevos dispositivos semiconductores como los field-stop IGBT (FS). Los IGBT son dispositivos que utilizan una tecnología denominada de ánodo cortocircuitado para su funcionamiento. Esta tecnología se caracteriza por combinar las ventajas de PT (punch-through) y NPT (non-punch-through) en el dispositivo de conmutación. Estos dispositivos funcionan de mejor manera en una topología de inversor de terminación única (Yeon *et al.*, 2003).

4.2. Inversor resonante serie de puente completo

El inversor resonante de puente completo es una de las topologías que se usan en aplicaciones de calentamiento por inducción. Esta topología permite reducir las pérdidas de potencia en los conmutadores, consiguiendo así frecuencia de operación por encima de la frecuencia de resonancia.

La utilización de un inversor resonante en serie de puente completo presenta una variación esquemática cuando utiliza un rectificador tipo Vienna, en lugar de rectificadores de diodos convencionales, proporcionando así una entrada de corriente sinusoidal con un factor de potencia unitario y una baja distorsión respecto a la fuente (Avellaneda *et al.*, 2012). El mencionado esquema se puede observar en la Fig. 4.

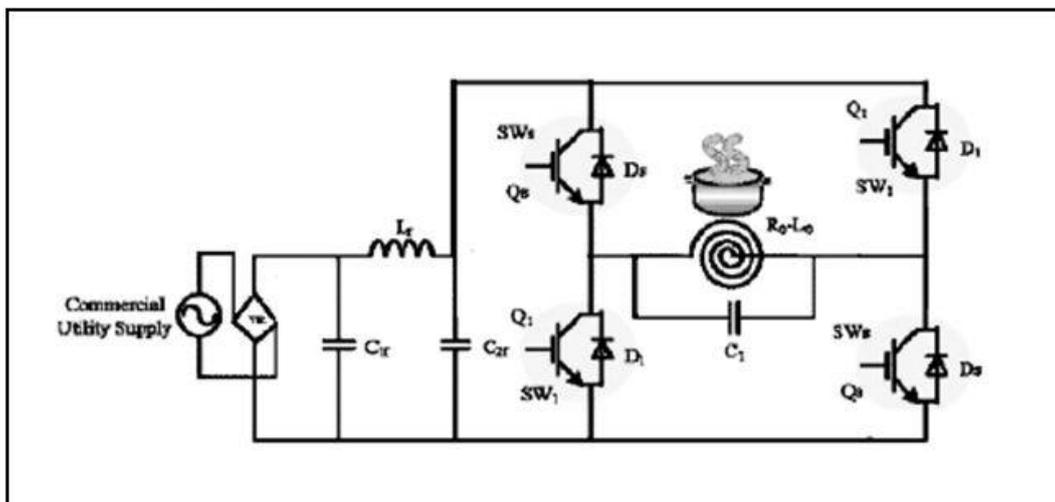


Figura 4. Etapa de conmutación de la topología del inversor de puente completo con rectificador Vienna en el extremo frontal (Shaan, 2012).

La topología de inversor resonante de puente completo tiene un amplio campo de aplicaciones, pero suele emplearse especialmente en cocinas de inducción. Los diferentes dispositivos de

conmutación permiten la existencia de diferentes frecuencias de funcionamiento y tipo de modulación.

Tabla 1. Comparación por dispositivos de utilizados en topología de puente completo (Duran-Reus *et al.*, 2012; Bhaskarl *et al.*, 2014; Borage & Tiwari, 2013).

Inversor Puente Completo		
Dispositivos de conmutación	Modulación	Frecuencia de Resonancia
IGBT	PDM/AVC	41KHz
Rectificador Tipo Vienna	PWM	20KHz
MOSFET	PFM	100KHz

4.3. Inversor resonante serie de medio puente

Los convertidores resonantes de medio puente, también conocidos como de tensión conmutada, es una topología muy empleada en sistemas de electrodomésticos. Una de las ventajas de esta topología, en comparación de la topología de inversor resonante de puente completo, es que este utiliza una menor cantidad de componentes, lo que le permite abaratar costos de fabricación. A diferencia de los puentes sencillos, en los cuales la eficiencia es relativamente baja, por la creación de una mayor cantidad de corrientes parásitas debido al número de dispositivos que utilizan. La utilización de una topología de medio puente con diodos de carburo de silicio, SiC, proporciona una gran sencillez en su construcción, Fig. 5.

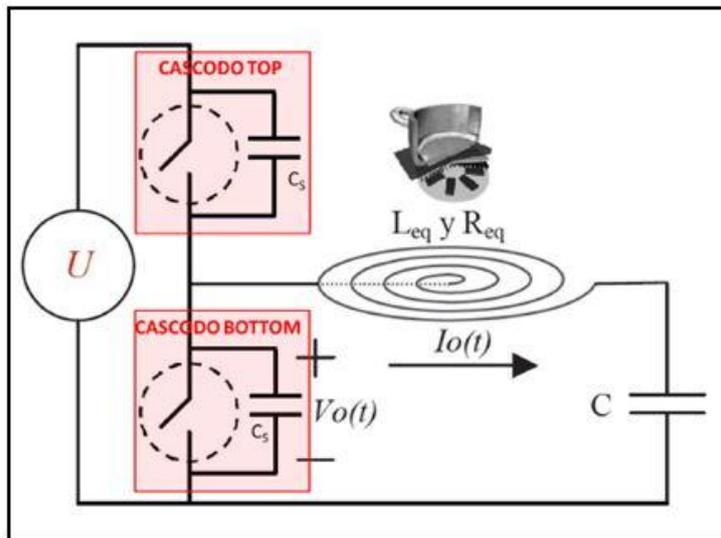


Figura 5. Estructura básica de un resonador de medio puente para calentamiento por inducción (Avellaned *et al.*, 2012).

Este esquema presenta una tendencia al calentamiento a bajas frecuencias. Al ser un circuito con dos dispositivos de conmutación tiene un menor número de corrientes parásitas. Al emplear dispositivos de conmutación en carga, permite aprovechar el rendimiento del circuito sobre un 50% (Segura, 2012). Esta topología trabaja cada medio periodo de conmutación permitiendo mejorar el factor de potencia.

4.4. Conversor AC/AC

Un conversor es básicamente un dispositivo electrónico que permite transformar una tensión o corriente continua en otra con una mayor amplitud, o a su vez pasar de una tensión o corriente alterna en una continua.

El convertor AC/AC tiene como finalidad suministrar tensión y corriente variable a partir de fuentes alternas. El convertor está conformado por 2 semiconductores de potencia colocados en anti paralelo, que controlan la desconexión de la fuente en cada semiciclo (Alba, 2010). Una de las propuestas más innovadoras en los circuitos electrónicos de inducción magnética es la topología AC/AC.

Esta topología permite simplificar el convertor y mejorar la eficiencia del mismo. Se basa en la simplificación de la etapa de rectificación conocida como medio-puente rectificador de impulso. La topología del inversor resonante de medio puente requiere tan solo de dos diodos rectificadores, duplicando la salida de tensión de la fuente como se observa en la Fig. 6 (Haye, 2011; Flores, 2007).

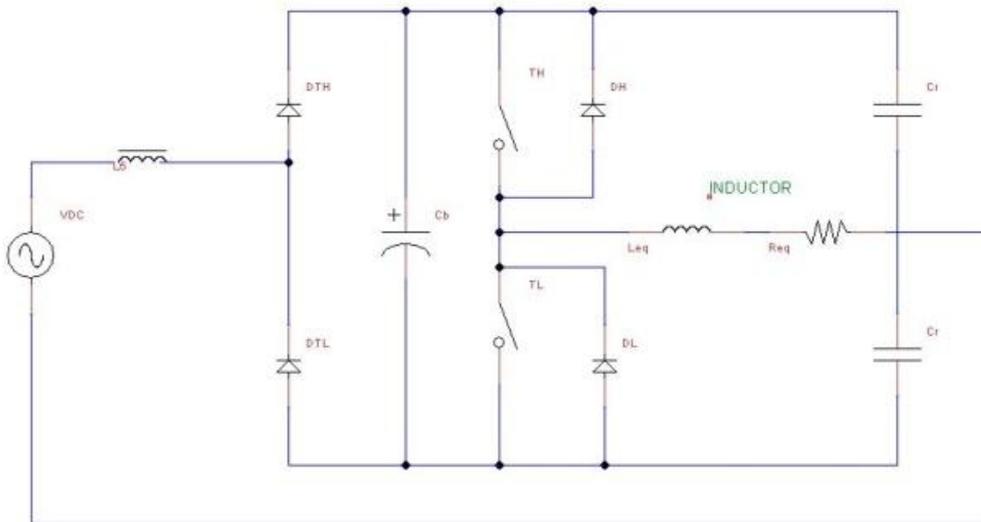


Figura 6. Propuesta de convertor AC-AC (Flores, 1998).

Después del análisis de los diferentes sistemas de conversión AC/AC se ha realizado una tabla comparativa de este sistema con diferentes dispositivos de conmutación, Tabla 2.

Tabla 2. Comparación de dispositivos utilizados en topología AC-AC (Lasobras *et al.*, 2014; Haye, 2013).

Convertos AC/AC		
Dispositivos de Conmutación	Frecuencias de Trabajo	Rango de Potencia de salida
MOSFET	10KHz-100KHz	3,6kW
IGBT's	20KHz-100KHz	2,5kW

5. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS EN INDUCCIÓN MAGNÉTICA

En esta sección, se realiza una recopilación de los diferentes circuitos electrónicos, desarrollados específicamente para su empleo en sistemas de inducción magnética. En los últimos 20 años, el fenómeno de inducción magnética enfocado como sistema de calentamiento ha alcanzado importantes e indiscutibles avances. La introducción de sistemas de calentamiento por inducción en equipos electrodomésticos ha permitido el desarrollo de circuitos electrónicos que proporcionan mayor eficiencia energética y un reducido coste de construcción de los sistemas de CPI.

En la Tabla 3, se presenta una clasificación de los circuitos electrónicos de inducción magnética en función de las diferentes frecuencias empleadas, tipos de inversor, dispositivos de conmutación y potencias de cada uno de los circuitos analizados (Acero *et al.*, 2008; Alba, 2010; Avellaneda *et al.*, 2012; Bandyopadhyay *et al.*, 2011; Byun *et al.*, 1998; Duran-Reus *et al.*, 2012; Goya & Garza, 2013; Inayathullaah & Anita, 2010; Izaka *et al.*, 1997; Lasobras *et al.*, 2014; Jittakort *et al.* 2013; Kimmer, 2014; Llorente *et al.*, 2002; Sarnago *et al.*, 2012a; Sarnago *et al.*, 2012b; Sarnago *et al.*, 2013; Sarnago *et al.*, 2014).

Tabla 3. Características más relevantes de los circuitos electrónicos de los últimos 20 años.

Circuitos electrónicos utilizados en el calentamiento por inducción magnética de los últimos 15 años				
Año	Topología de inversor	Dispositivos de control	Potencia entregada	Frecuencia de resonancia
1995-2000	Half-Bridge ZVS-PWM	IGBT's	2,5 kW	-
	Half-Bridge	Transistores	500 W	-
2000-2005	Half-Bridge	IGBT's	3,5 kW	24 KHz
	Full-bridge	IGBT's	3 kW	-
	Full-bridge	MOSFET	350 W	-
	Single-ended Resonant	IGBT's	2,5 kW	20 KHz
2005-2010	Half-Bridge	MOSFET	4 kW	42,5 KHz
	Full-bridge	-	3,5 kW	25 KHz
	Full-bridge	IGBT's	60 kW	15 KHz
	Full-bridge	IGBT's	500 kW	15 KHz
2010-2014	Full-bridge	Rectificadores Vienna	600 W	20 KHz
	Hybrid Resonant	BJT's	150 kW	34,48 KHz
	Half-Bridge	IGBT's	92 W	30 KHz
	Half-Bridge	Sic MOSFET	2,3 kW	37 KHz
	AC-AC Resonant	IGBT's	3,6 kW	20 KHz
	AC-AC Resonant	IGBT's		25 KHz
	Half-Bridge	IGBT's	120 kW	12 KHz
	Full-bridge	-	110 W	17 KHz
	Single-ended Resonant	MOSFET	-	25,9 KHz
	Full-bridge	-	4,8 kW	128 KHz
	Full-bridge	IGBT's	25 kW	25 KHz
	Full-bridge	IGBT's	-	41 KHz
	Half-Bridge	IGBT's	3,8 kW	-
	DSRHB inverter	-	3,3 kW	-
	Half-Bridge	RB-IGBTs	1,2 W	25 KHz
	Half-Bridge	MOSFET	3,6 kW	98 KHz
Full-bridge	MOSFET	2,4 kW	150 KHz	
Full-bridge	IGBT's	-	67 KHz	
Half-Bridge	IGBT's	-	21 KHz	
AC-AC Resonant	IGBT's	2,5 kW	115 KHz	

En la Tabla 3, se puede observar las diferentes topologías utilizadas en circuito de calentamiento por inducción magnética y la variación que han tenido los diferentes circuitos de conmutación. Los dispositivos más utilizados son los IGBT's y los MOSFET. Desde 1995 hasta el año 2010 las

frecuencias de resonancia se encuentran por debajo de los 50 KHz debido a que los dispositivos de conmutación de potencia no soportaban altas frecuencias. A partir del año 2010 en adelante las frecuencias de resonancia se han incrementado en un 60% por la mejora en los diferentes dispositivos de conmutación, puesto que hoy en día existe una alta gama de dispositivos electrónicos con innovadores materiales constructivos. La frecuencia de resonancia se ha incrementado hasta un rango que oscila entre 20 y 100 KHz. Existen casos de frecuencias superiores a los 150 KHz. El incremento de la frecuencia permite aumentar la eficiencia en los tiempos de calentamiento de los sistemas de inducción magnética. La potencia de trabajo en los últimos años ha disminuido, de forma muy considerable, debido a que las aplicaciones son actualmente mayoritariamente domésticas.

Otro aspecto destacable en el estudio propuesto es que no fue hasta el 2010 cuando empezaron a surgir nuevas propuestas tecnológicas, como por ejemplo, la topología de conversión directa AC/AC.

6. CONCLUSIONES

La mayoría de los circuitos que se han utilizado en los últimos años se basan en las tres primeras topologías expuestas en el presente trabajo: el inversor de terminación única y los inversores resonantes de media puente y puente completo. Una de las topologías que muestra un mejor desempeño, menos complejidad y menor coste es el inversor de medio puente resonante en comparación con la topología de inversor de terminación única y la topología de puente completo.

El desarrollo de nuevas y más eficientes propuestas tecnológicas en relación a los circuitos de calentamiento por inducción magnética permite la construcción de dispositivos de inducción con mayor eficiencia y costo reducido. El convertidor AC/AC permite la disminución de elementos puesto que elimina la parte de rectificación del sistema. No obstante, esta propuesta sólo se encuentra en fase de desarrollo teórico, aunque se espera que su aplicación práctica, en un futuro no muy lejano, lo que implicará un avance significativo en la investigación de los circuitos electrónicos de calentamiento por inducción magnética.

Asimismo, el gran desarrollo de los dispositivos electrónicos de potencia, utilizados en los inversores, ha permitido disponer de circuitos electrónicos con menores dimensiones y una mayor eficiencia. Entre los dispositivos de conmutación más usados se encuentran los IGBT's y los MOSFET por las altas temperaturas y corrientes que estos pueden soportar.

Los sistemas de inducción magnética en el país son muy necesarios para la transformación de la matriz energética. Los innovadores circuitos electrónicos desarrollados en los últimos años y aplicados en los sistemas de agua caliente sanitaria en aplicaciones domésticas permitirán al país ahorrar un importante volumen de combustibles de origen fósil y un considerable ahorro económico.

En trabajos futuros, se prevé la simulación de las topologías de inversores más empleados en circuitos electrónicos de calentamiento por inducción magnética. Las simulaciones permitirán evaluar las diferencias existentes entre los diferentes circuitos electrónicos y se determinará el circuito electrónico más eficiente para el diseño y dimensionado de un sistema de agua caliente sanitaria por inducción magnética y su aplicación en fines domésticos en el Ecuador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, SENESCYT, y al Consorcio Ecuatoriano para el Desarrollo de Internet Avanzado, CEDIA, por su especial apoyo en el desarrollo de la presente propuesta, gracias a la financiación del proyecto PROMETEO: "Evaluación Técnico y Económica de la Integración de Energías Renovables en la Provincia de Tungurahua", y del proyecto CEPRA VIII-2014-05: "Diseño e Instalación de un Sistema Remoto de Monitoreo de Evaluación y Análisis del Comportamiento de Instalaciones Fotovoltaicas en el Ecuador", respectivamente.

REFERENCIAS

- Acero, J., J. Burdío, L. Barragán, D. Navarro, R. Alonso, J. García, F. Monterde, P. Hernández, S. Llorente, I. Garde, 2008. The domestic induction heating appliance: an overview of recent research. *IEEE ASSP Magazine*, 7 pp. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4522791>.
- Alba, M.C., 2010. Preestudio para el desarrollo de un equipo de calentamiento por inducción. *Segainvex*, 5 pp. Descargado de http://www.uam.es/personal_pas/mcuenca/mifiles/Desarrollo%20de%20un%20equipo%20de%20calentamiento%20por%20induccin.pdf.
- Álvarez, M.S.S., 2009. Modelación y control de un sistema piloto de calentamiento de fluidos por inducción magnética. Tesis de maestría, Universidad de Chile. Disponible en <http://www.captura.uchile.cl/handle/2250/120273>.
- Avellaned, J., C. Bernal, A. Otín, P. Molina, J.M. Burdío, 2012. Half bridge resonant inverter with SiC cascode applied to domestic induction heating. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Twenty-Eighth Annual IEEE meeting*, 122-127. Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6520196&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F6516132%2F6520164%2F06520196.pdf%3Farnumber%3D6520196>.
- Bandyopadhyay, A., P.K. Sadhu, N. Pal, R. Swaroop, 2011. Hybrid resonant inverter fed induction heating using fuzzy logic based PWM. *Int. J. Comp. Appl. Eng. Sci.*, 1(3), 320-325.
- Bhaskarl D.V., N. Yagnyaseni, T. Mait, 2014. Comparison of control methods for high frequency IH cooking applications. *Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, IEEE*, 34-40. Disponible en [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6805272&sortType%3Dasc_p_Sequence%26filter%3DAND\(p_IS_Number%3A6805249](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6805272&sortType%3Dasc_p_Sequence%26filter%3DAND(p_IS_Number%3A6805249).
- Byun, J.-K., H. Jung, Song-yop Hahn, K. Choi, II.-H. Park, 1998. Optimal temperature control for induction heating devices using physical and geometrical design sensitivity. *Magnetics, IEEE Transactions*, 34(5), 3114-3117.
- Collaguazo, E.A.C., 2009. Diseño y construcción de un prototipo de una cocina de inducción electromagnética. Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional, Quito. Disponible de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1113>.
- Duran-Reus, X., F.J. Quiro, D. Montesinos-Miracle D, 2012. Design of a high-frequency transformer for an induction heating system. *11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Barcelona, 5 pp.
- Flores, A.C.L., 2007. Diseño y construcción de un horno de crisol para fusión de metales por inducción. *Tesis de maestría, Universidad San Francisco de Quito*, Ecuador.
- Flores, I.R.O., 1998. Aspectos tecnológicos en el diseño de inversores resonantes aplicados al calentamiento por inducción. Tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), 124 pp. Descargado de http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-elec/tesis_mc/82MC_rof.pdf.
- Gómez, V.E., 1999. Influencia de los componentes parásitos en el análisis y diseño de inversores resonantes paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción. *Disertación doctoral (PhD), Universitat de València*, 237 pp. Descargado de <http://www.uv.es/~vesteveg/Tesis.pdf>.
- Goya, T.N., M.M. Garza, 2013. Calentamiento por inducción. *Congreso Estudiantil de Investigación*.
- Hatanaka, Y., C. Kunitake, 1995. Investigation of high frequency induction heating power supply for reduction. *Journal of MESJ*, 31(6), 30-38. Descargado de <http://www.jime.jp/publication/bulletin/english/pdf/mv25n011997p30.pdf>.
- Haye, E., 2013. Industrial solutions for inductive heating of steels. *Master thesis, Luleå University of Technology*, Sweden.

- Hernandes, I.M.E., 2011. Diseño de un concentrador de energía magnética utilizado en temples superficiales por inducción. *Master thesis, Universidad Michoacana De San Nicolas de Hidalgo, México.*
- Hincapié, J.N., A. Trejos, 2013. Electrónica de potencia para el calentamiento por inducción doméstico revisión del estado del arte. *Ing. Cienc.*, 9(18), 237-262. Descargado de <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v9n18/v9n18a14.pdf>.
- Borage, M., S. Tiwari, 2013. A 25 kW, 25 kHz induction heating power supply for MOVPE system using L-LC resonant inverter. *Advances in Power Electronics*, Vol. 2013, 10 pp.
- Inayathullaah, M.A., R. Anita, 2010. Single phase high frequency ac converter for induction heating application. *Int. J. Eng. Sci. Tech.*, 2(12), 7191-7197.
- Izaka, K., L. Hirota, H. Yamashita, H. Omori, 1997. Soft-switched PWM high-frequency load-resonant inverter for induction heating cooking appliance. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems, IEEE*, Vol. 1, 169-173. Disponible en http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=618689&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D618689.
- Jittakort, J., S. Yachiangkam, A. Sangswang, S. Naetiladdanon, C. Koompai, 2013. A combined PWM and AVC control for induction cooking appliances. *10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), IEEE*, 486-489. Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6527067>.
- Kimmer, T., 2014. Reverse conducting IGBT for induction cooking and resonant applications. *Infineon Technologies Austria AG, Application Note*, 15 pp. Descargado de http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN2014_01_Reverse_Conducting_IGBT-AN-v2.0-en.pdf?folderId=db3a3043440adf7501440c3576f70141&fileId=db3a30434441da19014445a1e7560135.
- Lasobras, J., R. Alonso, C. Carretero, E. Carretero, E. Imaz, 2014. Infrared sensor-based temperature control for domestic induction cooking. *Sensors*, 14(3), 5278-5295.
- Llorente, S., F. Monterde, J.-M. Burdio, J. Acero, 2002. A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers. In: *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002, 7th Annual Meeting IEEE*, Vol. 2, 1168-1174.
- Picon, A.A., J. Barrero, J.A. Gélvez, 2007. Calentamiento por inducción electromagnética diseño y construcción de un prototipo. *UIS Ingeniería*, 6(1), 71-75.
- Ponce, L.B., 2003. Estudio y diseño de un calentador por inducción magnética en alta frecuencia para el montaje de rodamientos. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica De Valparaíso, Chile, 113 pp. Descargado de <http://lep.eie.pucv.cl/TesisLeoFinal.pdf>.
- Sarnago, H., A. Mediano, O. Lucia, 2012a. High efficiency AC-AC power electronic converter applied to domestic induction heating. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(8), 3676-3684.
- Sarnago, H., O. Lucia, A. Mediano, J. Burdio, 2012b. High-efficiency power converters for domestic induction heating applications. *38th Annual Conference on Industrial Electronics Society, IEEE /IECON*, 3268-3273.
- Sarnago, H., O. Lucia, A. Mediano, J. Burdio, 2013. A comparative evaluation of high-efficiency resonant converters for domestic induction heating. In: *39th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON*, 5016-5022. Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6699948>.
- Sarnago, H., O. Lucia, A. Mediano, J. Burdio, 2014. Direct AC-AC resonant boost converter for efficient domestic induction heating applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(3), 1128-1139.
- Segura, G.M., 2012. Induction heating converters design, control and modeling applied to continuous wire heating. PhD dissertation, Universidad Politécnica de Catalunya, Spain, 262 pp. Disponible en <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/83346/TGMS1de1.pdf;jsessionid=F969620A623AF8824A808924487CD17B.tdx2?sequence=1>.

- Shaan, M.M.H., 2012. Design, simulation and implementation of embedded controller for induction melting machine employing optimal resonant converter. *PhD dissertation, The Maharaja Sayajirao University of Baroda, India.*
- Yeon, J.-E., M.-Y. Park, K.-M. Cho, H.-J. Kim, 2003. A new high voltage shorted-anode IGBT with intrinsic body diode improves performance of single-ended induction cooker. *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 9 pp.