



Ingeniería Energética

ISSN: 1815-5901

Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae

Rodríguez Domínguez, Yandry; Gutiérrez Menéndez,
Armando M.; Fernández Correa, Alexander
Sistema de calentamiento por inducción aplicado a la cocción
Ingeniería Energética, vol. XXXIX, núm. 2, 2018, Mayo-Agosto, pp. 91-99
Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329158801005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UDEM 

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto



APLICACIONES INDUSTRIALES

Sistema de calentamiento por inducción aplicado a la cocción

Induction heating system applied to cooking

Yandry Rodríguez Domínguez¹
Armando M. Gutiérrez Menéndez¹
Alexander Fernández Correa².

¹ Universidad Tecnológica de La Habana, Cujae. Cuba.

² Universidade Federal de Roraima, Brasil

Correo electrónico: yandry@electronica.cujae.edu.cu

Recibido: marzo del 2017 Aprobado: octubre del 2017

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional



RESUMEN/ABSTRACT

En el presente trabajo se realiza el diseño e implementación de un inversor medio puente, para que sea utilizado en aplicaciones de calentamiento por inducción electromagnética. La etapa de control del convertidor de potencia está basada en un microcontrolador PIC de propósito general. Se estudian los principios físicos de la inducción electromagnética y las características de los materiales utilizados para estos fines. Es explicado el método utilizado en la identificación de recipientes y modelado de la carga eléctrica. Es propuesto un diagrama en bloques de potencia y control para lograr el calentamiento por inducción en recipientes ferromagnéticos. Es presentado un programa en MATLAB para que se utilice como interfaz de usuario, brindando control total sobre la frecuencia de operación del inversor. Las simulaciones de las etapas de potencia fueron validadas mediante los resultados prácticos alcanzados, demostrando el correcto funcionamiento de todas las etapas de potencia y control.

Palabras clave: Calentamiento, inducción electromagnética, inversor medio puente, microcontroladores PIC.

In the present work the design and implementation of a half bridge inverter is realized, so that it is used in applications of heating by electromagnetic induction. The control stage of the power converter is based on a general purpose PIC microcontroller. We study the physical principles of electromagnetic induction and the characteristics of the materials used for these purposes. The method used in vessel identification and electric charge modeling is explained. A block diagram of power and control is proposed to achieve induction heating in ferromagnetic containers. A program is presented in MATLAB to be used as a user interface, providing total control over the frequency of operation of the inverter. The simulations of the power stages were validated by the practical results achieved, demonstrating the correct functioning of all the power and control stages.

Key words: Heating, electromagnetic induction, bridge inverter, PIC microcontrollers.

INTRODUCCION

La aparición de modernos dispositivos electrónicos semiconductores de potencia, posibilitó el abaratamiento de los sistemas de calentamiento por inducción y la consiguiente introducción en el mercado de los electrodomésticos. Su aplicación a cocinas de inducción, brindan enormes ventajas como son reducido tiempo de cocción, potencia y temperatura ajustable, fácil limpieza y ahorro energético respecto a otras tecnologías de cocción. Las cocinas eléctricas de inducción son equipos que aumentan la calidad de vida de una sociedad, mejorando el índice sobre el desarrollo humano (IDH), el índice de pobreza multidimensional (IPM), el bienestar de dicha sociedad y la eficiencia energética del sistema energético [1].

El presente trabajo se exponen los principios físicos teóricos que explican los procesos de inducción electromagnética, así como los métodos existentes para el modelado de la carga. Son diseñados e implementados los circuitos de potencia y control, basados en un inversor medio puente, para su aplicación en la cocción de alimentos a través del calentamiento por inducción. Las simulaciones realizadas a el sistema de potencia son mostradas y validadas a partir de los resultados prácticos obtenidos.

Características de los materiales

Los sistemas de calentamiento por inducción de aplicación doméstica han atraído especial atención de la sociedad moderna. Un producto que se ha integrado de forma completa en este grupo son las cocinas de inducción, por toda una serie de ventajas que presenta. Sin embargo, una cocina de inducción no puede alcanzar elevados valores de eficiencia energética, aunque su electrónica de potencia este optimizada. Para ello es necesario realizar una correcta selección de la forma del inductor y el material de los recipientes.

Es importante definir que el material de los recipientes utilizados en los sistemas de calentamiento por inducción no es seleccionado solamente por la resistividad y altos valores de permeabilidad relativa, puesto que el fenómeno conocido como efecto pelicular juega un papel importante en la generación de calor [2].

El fenómeno del efecto pelicular limita la profundidad de penetración de las corrientes inducidas en un material conductor. La profundidad de penetración es la distancia desde la superficie de un material conductor infinitamente grueso, para la cual la corriente inducida ha alcanzado alrededor del 38% de su valor en la superficie [2-3], está dada por la ecuación (1).

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \cdot 10^{-7}}} \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} \quad (1)$$

En la ecuación (1), se tiene que ρ es la resistividad del material, μ_r , la permeabilidad magnética relativa del material y f , la frecuencia de la corriente eléctrica.

A partir de este parámetro es posible realizar el cálculo de la resistencia de la superficie del material (R_s) a altas frecuencias, el cual se efectúa a través de la ecuación (2).

$$R_s = \frac{\rho}{\delta} \sqrt{4\pi^2 \cdot 10^{-7}} \sqrt{f \cdot \mu_r \rho} \quad (2)$$

El análisis de la ecuación (2), permite identificar que la selección de la frecuencia de operación, es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta, para el diseño de un sistema de calentamiento por inducción. Se puede tener un rango de valores de resistencia superficial para un mismo material, solamente variando la frecuencia de operación de la corriente. Por lo tanto, para lograr un sistema eficiente en cuanto a la generación de calor en el recipiente, la selección del material a calentar es basada fundamentalmente en los parámetros siguientes: profundidad de penetración, permeabilidad magnética relativa y resistividad del material. Los materiales ferromagnéticos poseen altos valores de resistencia superficial frente a los no ferromagnéticos, lo que posibilitan un mismo valor de potencia a menores valores de corriente. Esto provoca que la eficiencia energética de las cocinas de inducción este comprometida grandemente para materiales no ferromagnéticos [4].

Un aspecto a tener en cuenta para la selección de los materiales del recipiente es la conductividad térmica que presentan los metales, pues a mayor medida de este parámetro más uniforme será la temperatura en el recipiente. Los metales que poseen las mejores características de conductividad térmica son los que más baja resistencia superficial tienen. Por esta razón, muchas compañías producen recipientes especiales, los cuales están diseñados para absorber la energía magnética y esparcir rápidamente el calor. De esa manera se obtiene un sistema de elevada eficiencia, en donde no se producen puntos calientes que queman la comida en un área, mientras que en otras permanece cruda [5].

MATERIALES Y MÉTODOS

Diagrama en bloques de potencia y control

Los sistemas de calentamiento por inducción poseen varias etapas, por lo general se dividen en la etapa de potencia y control, para explicar el funcionamiento de un sistema de inducción se propone el siguiente esquema (figura 1), cabe notar que el mismo sigue el patrón acorde a una cocina de inducción comercial. Primeramente, como circuito supresor de armónicos se tiene un filtro capacitivo de entrada y como rectificador se tiene un puente de diodos con un filtro LC a la salida. El inversor medio puente es la topología seleccionada para crear la tensión de alta frecuencia que es suministrada al sistema inductor-recipiente, el cual se representa como una carga equivalente variable del tipo RL, existen además otras topologías como son el inversor puente completo o la topología cuasi-resonante (poner referencia). Las tensiones requeridas por el control se obtienen a partir de la fuente de alimentación conmutada de 5 V y 18 V. En la etapa de monitoreo y detección de recipientes se encuentran varios circuitos utilizados para medir tensión, corriente y temperatura en puntos esenciales de los convertidores según su función. El sistema de control está basado en dos etapas fundamentales. La primera tiene en cuenta todas las variables medidas y los procesos presentes en los circuitos de potencia, y está basada en un microcontrolador. La segunda etapa radica en la interfaz de usuario, que es realizada a través de un programa desarrollado en la PC y que posibilita el control de la frecuencia de operación del inversor.

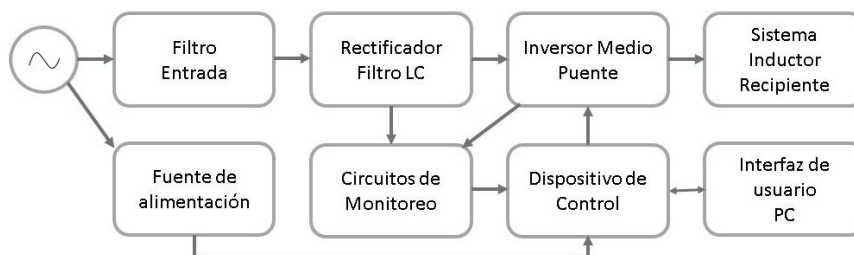


Fig. 1. Diagrama en bloques de la etapa de potencia y control.

La teoría de funcionamiento y cálculo de todos los elementos de las etapas de potencia, control y monitoreo del esquema propuesto, para una potencia de 1000 W y tensión de red de 110 V rms a 60 Hz, puede verse en [6]. Los resultados teóricos obtenidos de los elementos del inversor medio puente son los mostrados en la tabla 1, la obtención de los valores de la impedancia de carga utilizada en el cálculo del inversor es explicado en las próximas secciones.

Tabla 1. Parámetros de diseño del inversor medio puente.

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia	28 kHz
Resistencia equivalente del sistema inductor-recipiente a 28 kHz	3,379 Ω
Inductancia equivalente del sistema inductor-recipiente a 28 kHz	42,14 μ H
Factor de calidad	2,19
Capacitancia de los condensadores resonantes	383 nF
Tensión de red	110 Vrms $\pm$ 10%
Tensión máxima en el transistor	171 V
Corriente máxima en el transistor	35,21 A

Métodos utilizado en la identificación de recipientes.

La identificación de recipientes es un aspecto extremadamente importante en las cocinas de inducción. Su función es la de diferenciar cual menaje cumple con los requisitos necesarios para la correcta operación del electrodoméstico. La inexistencia del mismo pone en peligro el funcionamiento del equipo, incluso su rotura. Para ello es vital, que la cocina cuente con un sistema de reconocimiento del material predominante con el que está fabricado el caldero. Los sistemas de identificación utilizan la información presente en los parámetros eléctricos de los materiales usados en los recipientes, para diferenciarlos. La idea de que cada metal posee una resistencia eléctrica equivalente, a una frecuencia determinada, es utilizada para lograr la identificación. En la literatura se describen varias técnicas para lograr diferenciar los materiales no ferromagnéticos de los que sí lo son. Los métodos más utilizados para identificación de recipientes son la medición de corriente en alta frecuencia [7] y la respuesta en el dominio del tiempo ante un estímulo [5].

El método de identificación a partir de la medición de corriente en el inductor es uno de los más antiguos utilizados. En [7], se describe como a partir de un control basado en el lazo cerrado de fase (PLL, por sus siglas en inglés) se busca la frecuencia de resonancia del sistema inductor-recipiente. Para cada ajuste de frecuencia, se efectúa la medición de corriente por el inductor a partir de un transformador de corriente y en dependencia del valor obtenido, se conoce el tipo de material. Esto se basa en lo planteado anteriormente, los metales no ferromagnéticos al tener una resistencia mucho menor que los ferromagnéticos, al aplicar una misma tensión al inductor, se obtiene una mayor corriente. En este caso, la tensión de entrada del inversor fue reducida a 20 V, con el fin de que la corriente circulante por el sistema no afectara a los semiconductores de potencia. La teoría del método respuesta en el dominio del tiempo ante un estímulo establece, que la impedancia equivalente se puede representar a través de un circuito RLC serie. En [8], se plantea que la respuesta natural que posee este tipo de circuito es subamortiguada cuando la frecuencia natural es mayor que el coeficiente de amortiguamiento exponencial. En [9], se puede ver el efecto de 5 recipientes de diferentes materiales metálicos, ante un pulso de activación a uno de los semiconductores de potencia. Se evidencia como la respuesta natural del sistema para todos los casos es subamortiguada.

Siendo el coeficiente de amortiguamiento mucho menor cuando no existe recipiente sobre la cocina. En cuanto a los recipientes, el tiempo de oscilación, al igual que la magnitud de la misma, es mucho mayor para el aluminio que para los restantes materiales ferromagnéticos, lo mismo ocurre para la frecuencia de las oscilaciones. Por lo tanto, para identificar el tipo de material es necesario realizar el procesamiento de la respuesta, en donde se obtenga una señal con una frecuencia proporcional a la de las oscilaciones. En el caso de ser mayor el número de pulsos que una referencia fijada, se está en presencia de recipientes no ferromagnéticos o sin recipiente, entonces el sistema de control toma la decisión de apagar el sistema de potencia. En la figura 2, se evidencia lo antes expuesto.

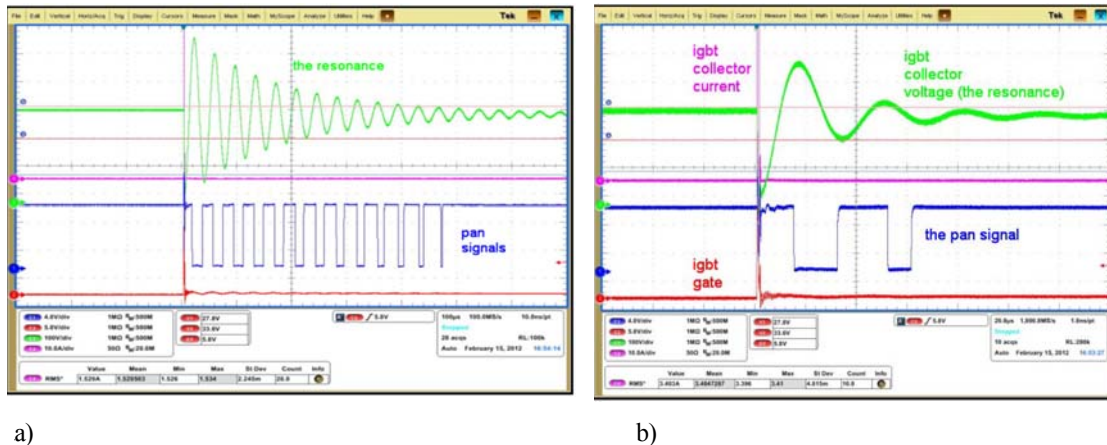


Fig. 2. Señales utilizadas para identificación de recipiente [5]. a) Recipiente de aluminio. b) Recipiente ferromagnético modelado de la carga eléctrica.

Modelado de la carga eléctrica

En los últimos 25 años, es posible encontrar gran variedad de métodos para el cálculo de la impedancia equivalente del sistema inductor-recipiente. Algunos de estos son complejos, pues tienen en cuenta todos los parámetros físicos, eléctricos y geométricos del inductor, garantizando una aproximación bastante precisa. Sin embargo, existen otros que simplemente tienen en cuenta algunos parámetros esenciales del sistema-inductor recipiente. Estos no son tan exactos, pero es posible obtener resultados favorables en el comportamiento de las variables eléctricas del sistema.

A continuación, se mencionan algunos de los métodos más utilizados para el cálculo de la impedancia equivalente:

- Análisis a través del modelo análogo del transformador [9].
- Análisis de simulación del campo electromagnético con el método de los elementos finitos (FEA tool, por sus siglas en inglés) [10].
- Modelado a través de la adquisición de datos de las mediciones de tensión y corriente del sistema inductor-recipiente en un rango de frecuencia [11].

Para el diseño de las etapas de potencia del sistema, específicamente el inversor, es necesario conocer las características de la carga, la cual es variable en dependencia de la frecuencia de conmutación. Por ello en este trabajo se utilizan la combinación de los métodos análisis a través del modelo análogo del transformador y modelado a través de la adquisición de datos de las mediciones de tensión y corriente del sistema inductor-recipiente en un rango de frecuencia, para el cálculo de la carga. La metodología utilizada para obtener las características de resistencia e inductancia equivalente respecto a la frecuencia, para dos recipientes diferentes es expuesta en [6], estos resultados se presentan en la figura 3. Queda demostrado con las curvas obtenidas, la variación presente en la impedancia equivalente, que posee como carga el inversor. El rango de frecuencia a la que va a ser operada la carga es de 22 kHz a 45 kHz.

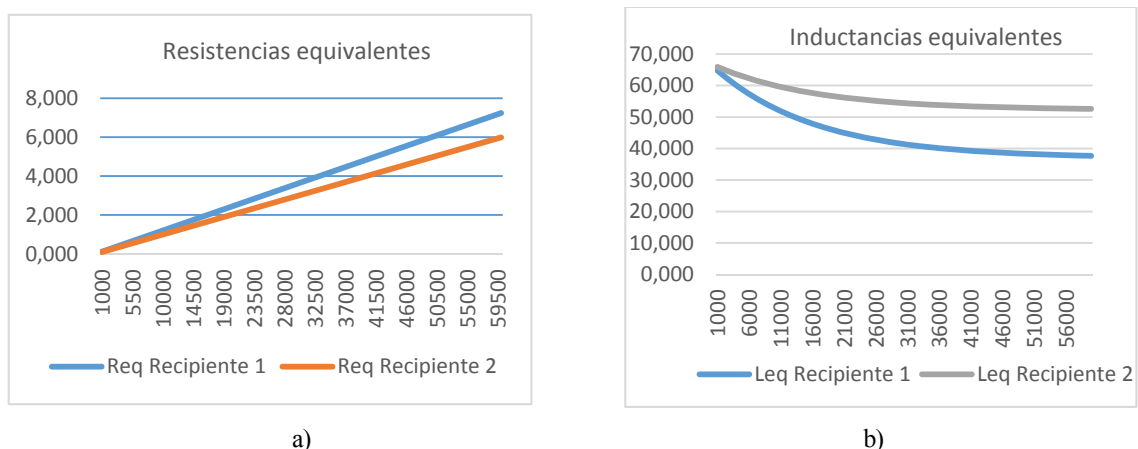


Fig. 3. Parámetros de la impedancia equivalente estimada. a) Resistencia equivalente. b) Inductancia equivalente.

Estrategia de la Etapa de control

El sistema de control de la instalación experimental propuesta está compuesto por la interfaz de usuario y el dispositivo de control de los circuitos de potencia. A través de un programa desarrollado en el computador se envían los datos necesarios, para fijar el punto de operación que se desee en el inversor. El dispositivo de control tiene que ser capaz de mantener de forma estable el punto de operación fijado. El elemento que rige toda la estrategia de control del sistema de potencia es el microcontrolador PIC18F4580, del fabricante Microchip.

El microcontrolador es el encargado de realizar varias funciones entre las que se encuentra el monitoreo de las protecciones, por ejemplo la tensión de la red para dar comienzo al proceso si este se encuentra dentro de los parámetros indicados, de lo contrario se muestra el mensaje de fallo de tensión. Después realiza el proceso de detección del recipiente según el algoritmo implementado en [6]. En caso que no sea posible, es mostrado un mensaje de error, por lo contrario, si es ferromagnético se guardan los valores del punto de operación establecido y se dan las señales de control al inversor. Cada medio ciclo de la red se ejecuta un número de tareas en un orden específico. Estas consisten en la medición tensión de red y temperatura de los semiconductores y recipiente. Todas estas señales son comparadas con una referencia, en caso de que haya alguna anomalía se refleja a través de un mensaje, y se apaga el inversor. Todo está coordinación de eventos se encuentra sincronizada con el cruce por cero de la tensión de red. Cada una de ellas es comparada con una referencia, y comprueba si está en el límite posible, de lo contrario se apaga el sistema. El máximo valor de corriente alcanzado en el rango posible es enviado a la PC. Este proceso se repetirá durante el tiempo que el usuario estableció para el funcionamiento del sistema y una vez agotado, se apaga automáticamente y queda listo para ajustar los valores nuevamente. En cualquier momento el usuario tiene la posibilidad de apagar el equipo manualmente para comenzar el proceso desde el inicio.

Implementación de las etapas del diagrama propuesto.

Los circuitos de las etapas de potencia, monitoreo y control son diseñados en un mismo PCB, en donde los elementos de potencia son agrupados en el lado izquierdo de la tarjeta, mientras que los de monitoreo y control a la derecha. La figura 4 a) presenta la tarjeta electrónica, a la cual se conecta la alimentación de red, los terminales del inductor y el cable USB, para conexión con la computadora. Es posible realizar el traspaso del código de programa al microcontrolador, sin tener que retirarlo de la tarjeta, pues se hace uso de la técnica ICSP (In Circuit Serial Programming). Una vista general de como queda confeccionada el sistema implementado, es mostrada en la figura 4 b). La que se encuentra operando a una frecuencia de 35 kHz después de haber realizado un barrido de frecuencia.

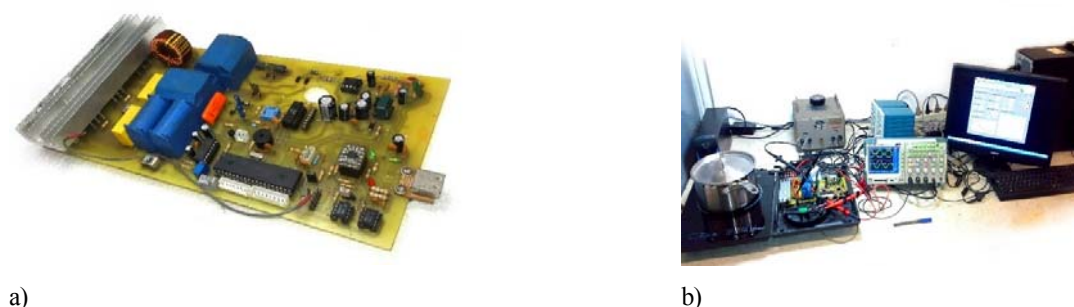


Fig. 4. a) Tarjeta electrónica con los circuitos de potencia, monitoreo y control de la instalación experimental. b) Sistema de potencia y control implementado operando a 35 kHz.

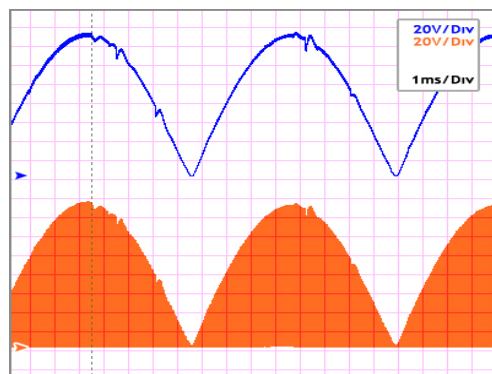
RESULTADOS

Simulaciones y resultados prácticos.

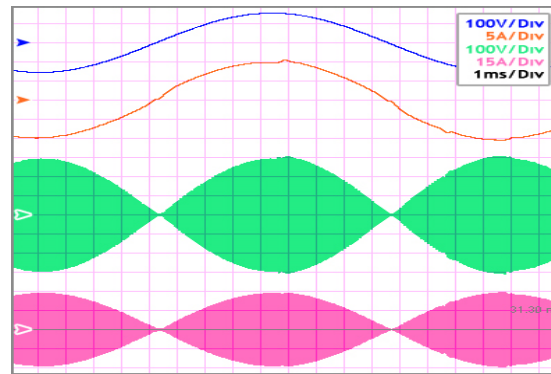
A continuación, son presentados los resultados de las simulaciones obtenidas de las etapas de potencia y control de la instalación experimental propuesta. La herramienta utilizada es el ISIS (Intelligent Schematic Input System), perteneciente al programa profesional de simulación PROTEUS, de la compañía Labcenter Electronics. Los semiconductores de potencia utilizados en el análisis son IGBTs.

La figura 5, presenta el comportamiento de varias variables a 28 kHz. En la figura 5 a), la tensión de entrada del inversor (azul), tiene un comportamiento similar al de la tensión de salida del rectificador, sin embargo, existen pequeñas perturbaciones debidas a las conmutaciones en la carga. Estas conmutaciones se reflejan en la tensión colector emisor del IGBT inferior (naranja), que posee dos componentes a baja y alta frecuencia, la que se aprecia es la de baja frecuencia. El valor máximo de tensión a soportar los IGBTs es de 155V, para una tensión de red de 110 VRMS. En cuanto a la figura 5 b), las variables presentadas son la tensión (azul) y corriente (naranja) de entrada del sistema y la tensión (verde) y corriente (rosado) de salida del inversor. El comportamiento de la corriente de entrada es prácticamente sinusoidal y se encuentra en fase con la tensión, lo que garantiza un factor de potencia cerca de la unidad. El máximo valor de corriente obtenido para este caso es de 10 A, lo que equivale a 7,07 ARMS. En cuanto a la tensión de salida del inversor (verde) es mucho mayor (287 V pico) que la correspondiente a valores teóricos. Esto se debe a la oposición de la inductancia equivalente a los cambios bruscos de corriente, cuando ocurre la conmutación, lo que produce picos de tensión que no pueden ser alisados por los condensadores del inversor, el valor de capacitancia de estos no es lo suficientemente grande para contrarrestar las variaciones bruscas de la tensión.

Todo lo expuesto ocurre, porque se encuentran operando cerca de la frecuencia de resonancia. La corriente de salida sigue la envolvente de la tensión de entrada del inversor, alcanzando un valor máximo de 27,5 A. Es apreciable también, como las señales de salida del inversor son alternas, como es de esperar según la teoría. La componente visible en la figura es la correspondiente a baja frecuencia.



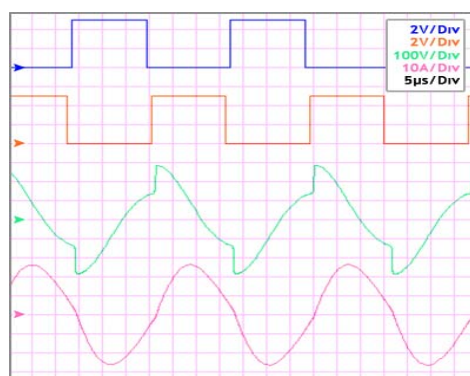
a)



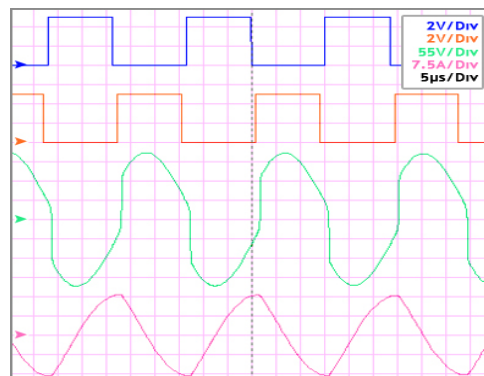
b)

Fig. 5. a) Tensión de entrada del inversor (azul) y tensión colector emisor del IGBT inferior (naranja). b) Tensión (azul) y corriente (naranja) de entrada del sistema y tensión (verde) y corriente (rosado) de salida del inversor.

En la figura 6, son expuestos los comportamientos en alta frecuencia de las señales de control del PIC18F4580 (azul y naranja) y la tensión (verde) y corriente (rosado) de salida del inversor, para 28 kHz (figura 6 a) y 35 kHz (figura 6 b). Se aprecia como las señales de control se encuentran complementarias entre sí, con un pequeño tiempo muerto entre ellas ($1\mu\text{s}$), para ambos puntos de operación. En cuanto a las señales de tensión y corriente de salida del inversor se observa como los valores máximos son alcanzados para 28 kHz. En ese caso, se aprecia como la corriente sigue un comportamiento prácticamente sinusoidal, indicando que se está, cerca de la frecuencia de resonancia, el valor máximo alcanzado es de 27,5 A. La tensión posee picos en el momento de conmutar los IGBTs, provocando valores máximos cercanos a los 300 V. Sin embargo, a 35 kHz la tensión y corriente poseen valores menores, pues se está operando a una frecuencia mayor que la natural del sistema RLC. El comportamiento de la corriente se aproxima más a una exponencial creciente y decreciente, según sea el pulso de activación, el valor pico es de 16 A. En cuanto a la tensión, aún el valor pico alcanzado es mayor que el teórico, porque el valor de corriente demandado es relativamente elevado, por lo que los condensadores resonantes no pueden contrarrestar las variaciones de tensión. A medida que aumente la frecuencia, tanto la reactancia inductiva equivalente como la resistencia equivalente van aumentar y por ende la corriente va a disminuir, de igual forma ocurre con la tensión de salida hasta que su valor se establece en los valores teóricos.



a)



b)

Fig.6. Señales de control del PIC18F4580 (azul y naranja), tensión (verde) y corriente (rosado) de salida del inversor. a) A 28 kHz. b) A 35 kHz.

Con el fin de validar los circuitos implementados, se procede a obtener las formas de ondas de las variables analizadas en la simulación, tanto de las etapas de potencia como las de control. Los puntos de operación fijados son los mismos que en las simulaciones. El inversor puede operar una vez que el recipiente cumpla con los requisitos de la técnica de identificación de recipientes, los resultados obtenidos de esta prueba pueden verse en [6].

Las primeras señales eléctricas a analizar son las presentadas en la figura 7, y corresponden a la tensión (amarillo) y corriente (azul) de entrada del sistema, tensión de salida del rectificador (rosado) y la corriente (verde) por el inductor, a las frecuencias de 28 kHz (figura 7 a) y 35 kHz (figura 7 b). Similar a como sucede en las simulaciones, los valores máximos de corrientes ocurren a una frecuencia de 28 kHz. A esa frecuencia, puede apreciarse como la corriente de entrada alcanza un valor pico de aproximadamente 9,75 A, lo que equivale 6,9 ARMS. Es notable, como la corriente (azul) sigue un comportamiento sinusoidal y se encuentra en fase con la tensión de red, lo que garantiza un factor de potencia cercano a la unidad. Sin embargo, para 35 kHz el valor pico es de 5,09 A, correspondiéndole 3,61 ARMS y se observa como existe unas deformidades en la forma de onda, producidas por los armónicos presentes en la señal. Además, se tiene un ligero desfase entre la corriente y tensión de entrada.

En cuanto a la tensión de salida del rectificador su valor máximo es de 158 V pues la tensión de la red tiene una magnitud de 112 VRMS. Los valores picos que alcanza la corriente de salida del inversor son de 26 A y 16,8 A para 28 kHz y 35 kHz, respectivamente.

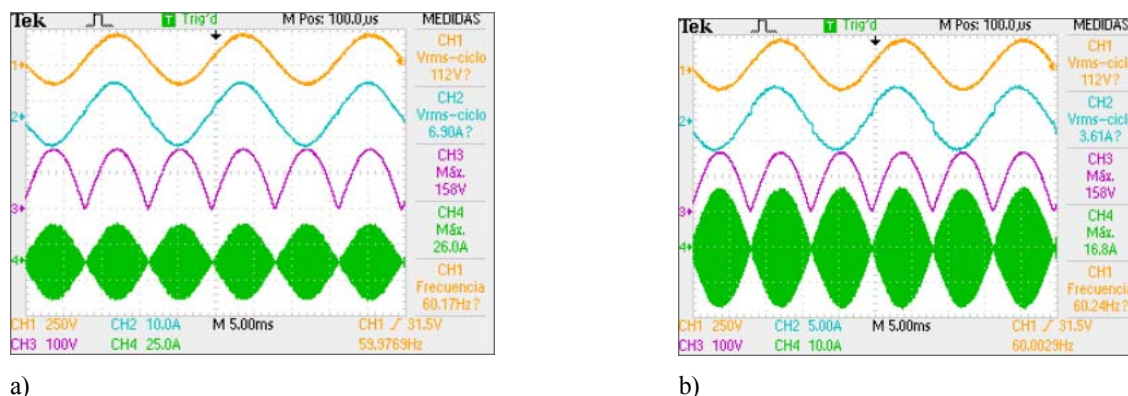


Fig. 7. Parámetros eléctricos de tensión (amarillo) y corriente (azul) de entrada, tensión de salida del rectificador (rosado) y corriente de salida del inversor (verde). a) A 28 kHz. b) A 35 kHz.

En el inversor medio puente la máxima tensión que deben soportar los IGBTs es de 158 V, para una tensión de red de 112 VRMS, lo cual es apreciado en la figura 8. En la misma se presenta la tensión de salida del inversor para una frecuencia de 28 kHz, la que posee un valor pico de 330 V. La componente mostrada de estas dos señales de tensión es la de baja frecuencia.

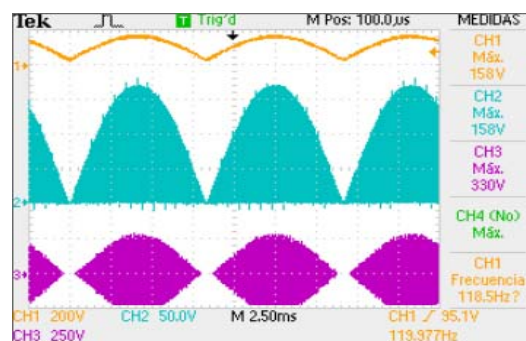


Fig. 8. Parámetros eléctricos de tensión de entrada del inversor (amarillo), tensión colector emisor del IGBT inferior (azul) y tensión de salida del inversor (rosado) a 28 kHz.

La figura 9, recoge las formas de onda de los pulsos de activación de los IGBTs (amarillo y azul), la tensión (rosado) y corriente (verde) de salida del inversor, a 28 kHz y 35 kHz. Como es de esperar los valores máximos de tensión y corriente ocurren para 28 kHz, en donde se aprecia como la corriente posee un comportamiento sinusoidal. Esto evidencia, que se está operando al inversor, cerca de la frecuencia natural del circuito RLC, formado por el sistema inductor-recipiente y los condensadores resonantes. El comportamiento de las magnitudes de tensión y corriente, para ambos puntos de operación, son consistentes con los obtenidos en las simulaciones. La diferencia radica en los valores picos de las señales, que puede ser atribuido a la variación de la inductancia equivalente producto al calentamiento del recipiente y su contenido.

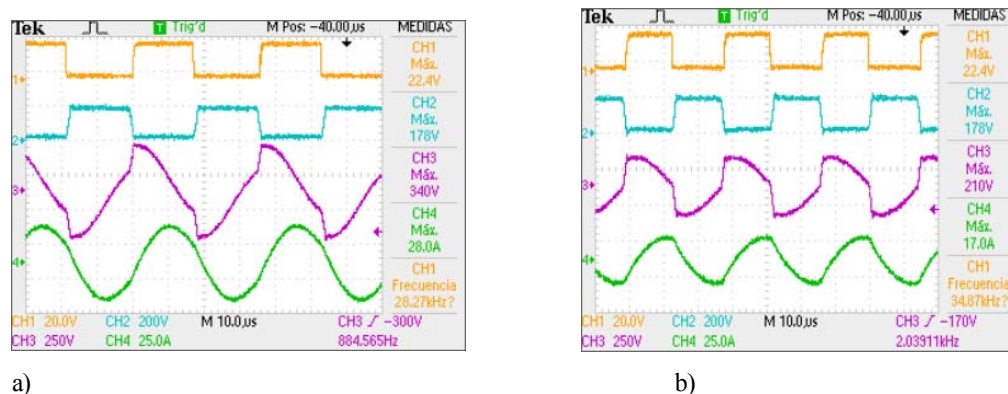


Fig. 9. Parámetros eléctricos de tensión (amarillo) y corriente (azul) de entrada, tensión de salida del rectificador (rosado) y corriente de salida del inversor (verde). a) A 28 kHz. b) A 35 kHz.

Interfaz de usuario con MATLAB

La interfaz de usuario, que permite el ajuste de la frecuencia de operación del inversor, se realiza a través de un programa desarrollado en el GUIDE del MATLAB, versión 7.7.0.471 de la compañía The MathWorks. Es nombrado Programa para Instalación Experimental de la Cocina de Inducción (PIECI).

El propósito principal de PIECI es obtener la característica de corriente contra frecuencia, que posee el recipiente, frente al inversor implementado. Es decir, mostrar el espectro de frecuencia en el que ocurre la resonancia del circuito RLC. El programa permite fijar diferentes puntos de operación del inversor, a través de un barrido de frecuencia de forma manual o automática. Por ende, el encendido, apagado y el tiempo que va a estar en funcionamiento el inversor, es fijado desde la PC. Para lograr esto, es necesario tener conectado al puerto USB del computador, a la tarjeta electrónica, que haciendo uso del conversor Serie-USB se comunican por el protocolo USART. La información que le envía el programa al microcontrolador es el estado del inversor y la frecuencia de operación. La figura 10, presenta la interfaz de usuario de PIECI, en donde son presentados los resultados alcanzados de la característica de corriente contra frecuencia del recipiente 1, a través de la cual se puede conocer cuál es el valor de frecuencia de resonancia que posee para el inversor implementado. Con la característica de corriente contra frecuencia obtenida se puede realizar estimados de la potencia máxima que puede consumir el recipiente y permite verificar la sensibilidad de la corriente ante la variación de frecuencia. En el presente caso, se puede ver como la mayor corriente obtenida es aproximadamente de 10 A, acontecida a los 28 kHz. La mayor sensibilidad al cambio de frecuencia se encuentra en el rango de 29 kHz a 33 kHz, para la zona inductiva.

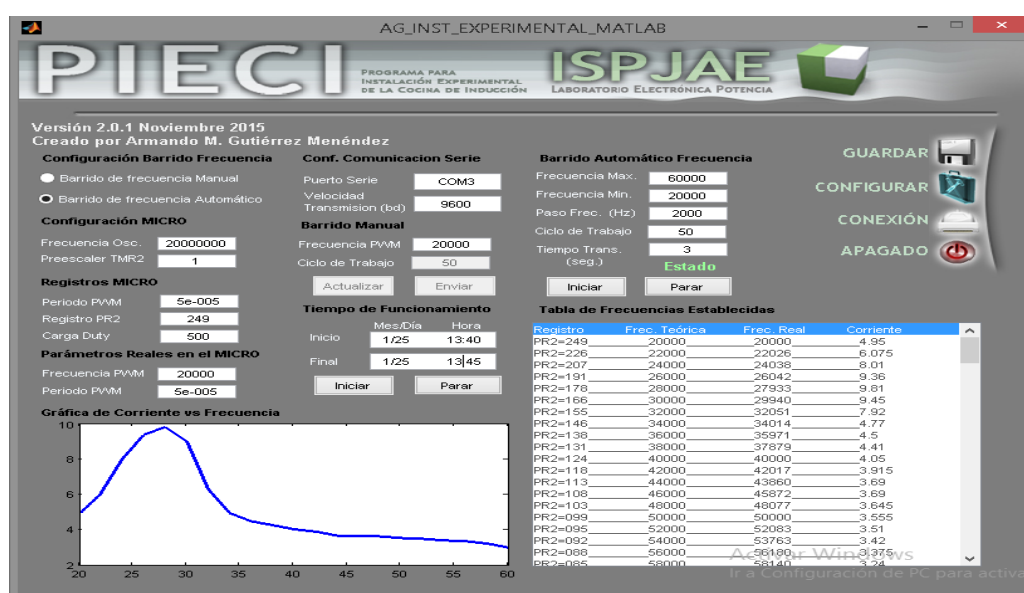


Fig. 10. Interfaz de usuario del programa de control de la instalación experimental una vez ejecutado un barrido de frecuencia.

La cocina de inducción electromagnética debe verse como un sistema cocina recipiente, por la influencia que poseen las características de los materiales con los que está fabricado este último elemento, sobre el sistema electrónico de potencia. El programa desarrollado para interfaz de usuario brinda control total sobre el encendido, apagado y establecimiento del punto de operación deseado en el inversor. Además, permite obtener las características de corriente contra frecuencia para los recipientes utilizados en la instalación, lo cual posibilitará otros estudios en trabajos futuros. Por la similitud entre las simulaciones y los resultados prácticos obtenidos es posible validar el correcto funcionamiento de las etapas de fuerza diseñadas de la instalación experimental. La estrategia de control y la interfaz de usuario diseñada garantizan la operación exitosa de todo el sistema electrónico. Con los resultados alcanzados en el presente trabajo, queda vigente un material que explica el funcionamiento de esta tecnología aplicada a la cocción de los alimentos y es obtenida, una base experimental para el desarrollo de un prototipo de cocina de inducción.

- [1] MARTÍNEZ, Javier, Diego VACA, Marco OROZCO a Andres MONTERO. "Aplicación de Métodos Multicriterio para la Selección de Materiales para Menaje de Cocinas de Inducción". *Energía*. 2015, (11), p116–126. ISSN 1390-5074.Disponible en:<http://web.a.ebscohost.com/abstract?site=ehost&scope=site&jrnl=13905074&AN=100686350&h=lC8oMkvR3rB5w2sjlCiUuK4u%2fIglveIrW37vPGytimlsyXM4jey8oANEYugtsZsJupM8fVPlYrYYKO0kq8VFcTA%3d%3d&crl=f&resultLocal=ErrCrlnResults&resultNs=Ehost&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d13905074%26AN%3d100686350>
- [2] MORELAND, W C. "Induction Its Performance Development Problems". *IEEE Transactions on industry applications*. 1973, **9**(1), p81–85. DOI:10.13140/2.1.5018.9608.Disponible en: https://www.google.com/search?ei=7qeeWsbuOq-J5wKZhIWACw&q=%22Induction+Its+Performance+Development+Problems%22&oq=%22Induction+Its+Performance+Devlopment+Problems%22&gs_l=psy-ab.12...0.0.0.148382.0.0.0.0.0.0.0.0....0...1..64.psy-ab..0.0.0....0.6ws3j9E_S5c
- [3] MARTÍNEZ, Javier, A. J. Riofrio,S.P.Villacis "Heat transfer analysis in diferent cookware material". X Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2015, p575–581. ISSN 1390-4671.Disponible en: <http://journal.espe.edu.ec/index.php/cienciaytecnologia/article/view/44>
- [4] MILLÁN, I., D. PUYAL, J. M. BURDÍO, J. ACERO a Sergio LLORENTE. "Upgrading of double series-resonant half- bridge inverter to improve efficiency". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* 2013, p1091–1092. DOI: 10.1049/el.2013.1093.Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6583124/?denied>
- [5] TULU, Mehmet Emin a Deniz YILDIRIM. "Induction Cooker Design with Quasi Resonant Topology using Jitter Drive Method". *IEEE Transactions on industry applications* 2013, p 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2013.6549590.Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6549590/>
- [6] MENÉNDEZ, Armando Manuel Gutiérrez. "*Desarrollo de una instalación experimental para el estudio de las etapas de potencia en el prototipo cubano de cocina de inducción*". Tesis de Maestría 2016. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.Disponible en: <https://www.escavador.com/sobre/10691962/armando-manuel-gutierrez-menendez>
- [7] TANAKA, Teruya. "A new induction cooking range for heating any kind of metal vessels". *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 1989, 35(3), p635–641. DOI:10.1109/30.44329.Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/44329/>
- [8] HAYT, William H, Jack E KEMMERLY a Steven M DURBIN. "*Análisis de circuitos en ingeniería*". vol 6. v y d. B.m.: MacGraw-Hill, 2003. ISBN 970-10-3694-8.Disponible en: <http://redbiblio.unne.edu.ar/opac/cgi-bin/pgopac.cgi?VDOC=1.77470>
- [9] Seung-Hee Ryu; Dong-Gyun Woo; Min-Kook Kim; Byoung-Kuk Lee. "Analysis and Design of Modified Half-Bridge Series-Resonant"*IEEE Transactions on industry applications* 2016, p2282-2295 vol.31, DOI: 10.1109/TPEL.2015.2431376.Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7109174/>
- [10] IMA, Tetsuya, Kazuyuki SAKIYAMA, Izuo HIROTA a Hideki OMORI. "A Study of Impedance Analysis for an Induction Heating Device by Applying a New Interpolation Method". *IEEE Transactions on magnetics*. 1997, **33**(2), p2143–2146, DOI: 10.1109/20.582755.Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/582755/>
- [11] JIMÉNEZ, O, L A BARRAGÁN, D NAVARRO, O LUCÍA, J I ARTIGAS a I URRIZA. "Design and Evaluation of a Low-Cost High-Performance $\Sigma - \Delta$ ADC for Embedded Control Systems in Induction Heating Appliances". *IEEE Transactions on industry applications* 2014, p2601 - 2611, DOI: 10.1109/TIE.2013.2278524.Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6579672/?section=abstract>