



Ingeniería Energética

ISSN: 1815-5901

Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae

Rodríguez Domínguez, Yandry; Gutiérrez Menéndez,
Armando M.; Fernández Correa, Alexander
Implementación de un sistema de detección de menaje para aplicaciones en cocinas de inducción
Ingeniería Energética, vol. XL, núm. 2, 2019, Mayo-Agosto, pp. 158-167
Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329159363008>

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

redalyc.org

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

Implementación de un sistema de detección de menaje para aplicaciones en cocinas de inducción

Design and implementation of pan detection system for application in electromagnetic induction cooking

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

¹ Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, CIPEL, Facultad de Ingeniería Eléctrica, CUJAE, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Federal de Roraima, Brasil.

E-mail: yandry@electronica.cujae.edu.cu

Recibido: septiembre del 2018

Aprobado: enero del 2019

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



RESUMEN/ABSTRACT

En el presente trabajo se presenta la implementación de un sistema de detección de menaje para aplicaciones de calentamiento por inducción electromagnética en la cocción de los alimentos. Son analizadas las características de los materiales utilizados en los recipientes, definiéndose cuales son las fundamentales para un calentamiento óptimo. Son estudiados los métodos de detección más empleados en cocinas de una zona de cocción y el comportamiento de diferentes menajes ante un estímulo determinado. Es propuesto un sistema de detección de menaje basado en la técnica de respuesta en el dominio del tiempo, empleando un microcontrolador de propósito general del fabricante Microchip, mediante el desarrollo de una instalación experimental con este propósito. Los resultados prácticos alcanzados ante diferentes estados de cargas son presentados, demostrando el correcto funcionamiento del sistema de detección, haciendo uso de instrumentos de medición profesionales como es el caso del osciloscopio digital TEKTRONIX TPS 2024B.

Palabras clave: Calentamiento; detección de recipiente ;inducción electromagnética; microcontroladores PIC.

In the present work, the implementation of a pan detection system for electromagnetic induction heating applications in the cooking of food is presented. The characteristics of the materials used in the containers are analyzed, defining which are the fundamentals for an optimum heating. The detection methods most commonly used in cookers in one cooking zone and the behavior of different items before a given stimulus are studied. A household detection system based on the time domain response technique is proposed, using a general purpose microcontroller from the manufacturer Microchip, through the development of an experimental facility for this purpose. The practical results achieved in different load states are presented, demonstrating the correct functioning of the detection system, making use of professional measuring instruments such as the digital oscilloscope TEKTRONIX TPS 2024B.

Key words: Heating;electromagnetic induction; PIC microcontroller; pan detection.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de calentamiento por inducción no son más que equipos que utilizan la inducción electromagnética para la generación de calor en un determinado objeto. Poseen diferentes características de operación según la aplicación, sin embargo, el principio de generación de calor es el mismo.El calentamiento por inducción es posible si se tiene un cuerpo metálico, sometido a un campo magnético intenso variable en el tiempo, creado por la circulación de corriente alterna en un inductor. En el cuerpo metálico se inducen corrientes por el fenómeno de la inducción electromagnética, conocidas como corrientes de Eddy o de Foucault. Las cuales producen altas temperaturas en el material, principalmente por las pérdidas producidas por el efecto Joule [1–3].

Los sistemas de calentamiento por inducción aplicados al sector doméstico, han atraído especial atención de la sociedad moderna. Un producto que se ha integrado de forma completa en este tema son las cocinas de inducción, pues brindan enormes ventajas como son tiempo de cocción reducido, potencia y temperatura ajustables, 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 de desarrollo humano (IDH), el índice de pobreza multidimensional (IPM), el bienestar de dicha sociedad y la eficiencia energética del sistema energético.

Una cocina de inducción no puede alcanzar altos valores de eficiencia energética, aunque la electrónica de potencia esté optimizada, es imprescindible además para ello que se realice la correcta selección de la forma del inductor y el material de los recipientes.

El presente trabajo expone la importancia que tienen los recipientes empleados en el calentamiento por inducción electromagnética, se explican las propiedades físicas de los mismos, definiéndose cuáles son más favorables a tener en cuenta en las cocinas de inducción. Son tratados los métodos de detección más utilizados y el comportamiento que posee uno de ellos ante diferentes menajes. Con el fin de documentar el funcionamiento del método de detección basado en la respuesta en el dominio del tiempo ante un estímulo se propone un sistema electrónico para la detección e identificación de un recipiente, donde se determina si es apto para su utilización en cocinas de inducción electromagnética, lo cual es verificado a través de resultados prácticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de los materiales

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 [4].

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 y se determina por la ecuación (1).

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

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).

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

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 posibilita un mismo valor de potencia a menores valores de corriente. Esto provoca que la eficiencia energética de las cocinas de inducción esté comprometida grandemente para materiales no ferromagnéticos.

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, muchos fabricantes producen recipientes especiales, los cuales están diseñados para absorber la energía magnética y esparcir rápidamente el calor. De esa forma se obtiene un sistema altamente eficiente, en donde no se producen puntos calientes que queman la comida en un área, mientras que en otras permanece cruda [5].

Para realizar una adecuada selección de materiales del menaje, hay que tener en cuenta la interrelación entre los requisitos de diseño, material y procesado. Es por ello que la selección de materiales para el menaje de las cocinas de inducción es un tema muy amplio y complejo. En se presenta una metodología para lograr la correcta selección teniendo en cuenta todos los aspectos anteriormente mencionados.

Variación de la corriente e impedancia del sistema inductor-recipiente en función de la frecuencia

Un aspecto importante a tener en cuenta es la carga que posee el sistema electrónico de las cocinas de inducción, la cual hay que tratarla como un sistema inductor-recipiente. Esta carga posee dos elementos esenciales, uno corresponde a la resistencia superficial del recipiente, mientras que el segundo responde a las características del inductor. Aunque existe gran variedad de inductores para cocinas de inducción, en cuanto a la geometría y construcción, todos cumplen con el requisito fundamental, crear un campo magnético variable al circular por ellos una corriente alterna.

El proceso de transferencia de energía entre un inductor y un material a calentar es similar por su principio, al de un transformador [1, 3, 6–8]. El primario está constituido por el enrollado del inductor y la superficie de la pieza representa un secundario de una sola espira, con una resistencia de carga, que representa la resistencia superficial. En la figura 1, se muestra el modelo eléctrico del sistema formado por el inductor y el recipiente. Por tanto, el sistema inductor-recipiente puede ser asumido como el equivalente de una resistencia (R_{eq}) en serie (o en paralelo) con una inductancia (L_{eq}). La resistencia equivalente de la pieza a calentar es de valor muy pequeño por lo que para generar pérdidas apreciables por efecto Joule son necesarias grandes corrientes.

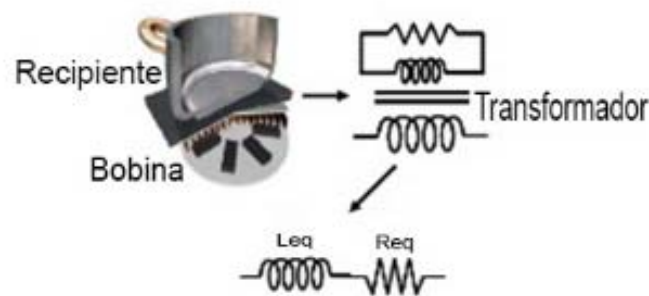


Fig. 1. Modelo eléctrico equivalente del sistema formado por el inductor y el recipiente [8].

Sin embargo, esta red equivalente posee un elemento más, en serie o paralelo, según la topología que presente el inversor. Este componente se conoce como condensador resonante y es el causante de que ocurra la resonancia en el sistema cuando coincide su reactancia con la del inductor equivalente. En este estado, la corriente por el inductor alcanza su máximo valor, pues solamente es limitada por la resistencia equivalente, alcanzándose para esta condición la mayor generación de calor en el recipiente [8–10]. La ecuación (3), corresponde a la frecuencia de resonancia natural para un circuito RLC.

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{CL_{eq}}} \quad (3)$$

En la ecuación (3), se tiene que ω_n es la frecuencia angular natural, L_{eq} la inductancia del inductor equivalente y C , la capacitancia del condensador resonante.

Para que los valores de reactancia inductiva y capacitiva sean iguales tiene que ocurrir la coincidencia de la frecuencia natural del sistema con la de operación del inversor, solo en este caso ocurre la resonancia. El comportamiento de la corriente y la impedancia en función de la frecuencia de un circuito RLC serie, son presentados en la figura 2. Es importante resaltar que, para valores de frecuencia por encima de la frecuencia de resonancia, el sistema presenta un comportamiento inductivo, mientras que para valores menores el sistema sigue un comportamiento capacitivo. Las cocinas de inducción operan en el lado inductivo. Puede apreciarse que a medida que la frecuencia de operación se va acercando a la de resonancia la corriente tiende a alcanzar su máximo valor.

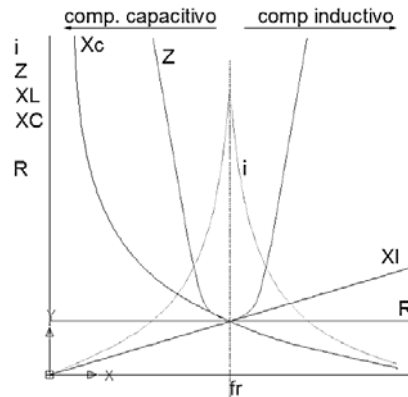


Fig. 2. Curva de resonancia para un circuito RLC serie.

Un parámetro adicional a tener en cuenta es el factor de calidad resonante (Q), que no es más que la relación entre la potencia reactiva y activa, el cual puede definirse a través de la ecuación (4), para sistemas RLC series [16]. Este elemento es un parámetro de diseño para seleccionar el condensador resonante adecuado al sistema inductor-recipiente. Hay que tener en cuenta que Q no permanece constante cuando la frecuencia de operación varía, debido al cambio de los términos L_{eq} y R_{eq} .

$$Q = \frac{\omega_r L_{eq}}{R_{eq}} = \frac{1}{\omega_r C R_{eq}} \quad (4)$$

En [10] se describe un método para estimar el comportamiento de Q en función de L_{eq} . La figura 3, presenta la relación de tensión que posee el sistema RLC serie, a diferentes valores de factor de calidad, en dependencia de la razón de la frecuencia natural y de operación. A partir del comportamiento de las formas de ondas mostradas es apreciable que Q debe ser seleccionado cuidadosamente. Un factor de calidad bajo trae consigo que sea requerido un rango de frecuencia de operación muy grande para realizar la regulación de potencia, mientras que uno muy elevado provoca una no linealidad y una gran sensibilidad a la frecuencia de operación.

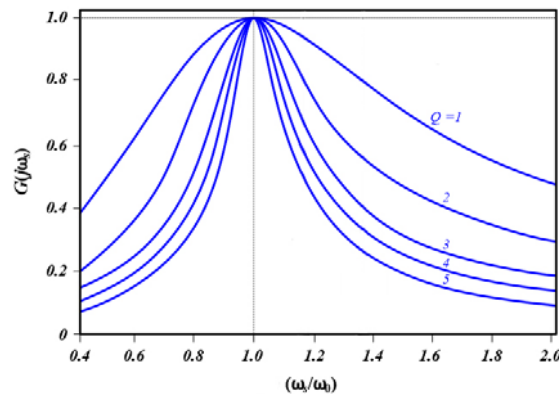


Fig. 3. Características de la ganancia de tensión del circuito resonante [10].

Métodos de detección de los 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 recipiente.

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. La figura 4, presenta el comportamiento de la admitancia del circuito RLC, formado por el sistema inductor-recipiente y el condensador resonante para un recipiente de aluminio (AL) y para uno ferro magnético (FeMag). Verificándose que, en la frecuencia de resonancia, los materiales no ferromagnéticos, como el aluminio, brindan una mayor facilidad al paso de la corriente que los ferromagnéticos, esto se debe a que en el aluminio su resistencia equivalente puede llegar a ser hasta 10 veces menor que para un material ferromagnético. 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 la magnitud de la corriente en alta frecuencia [11] y la del comportamiento de la respuesta en el dominio del tiempo ante un estímulo [5].

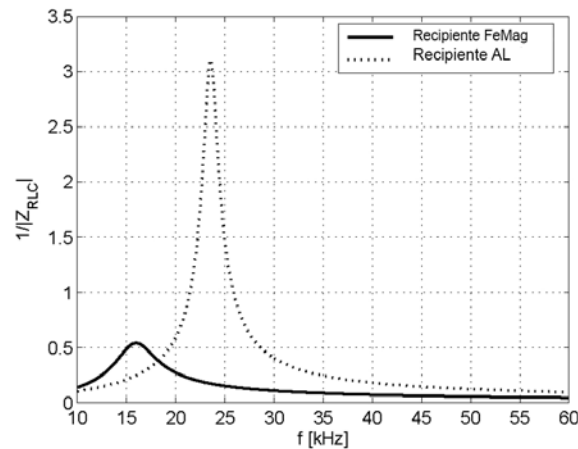


Fig. 4. Admitancia que presenta un recipiente de aluminio y uno ferromagnético [5].

Medición de corriente en alta frecuencia

El método de identificación a partir de la medición de corriente en el inductor es uno de los más antiguos utilizados. En [11] 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 para los que presenten una baja resistencia. 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.

En muchos trabajos es implementado este método de identificación, que al igual que el caso anterior, la medición de corriente la realizan a través de un transformador de corriente de alta frecuencia. La diferencia entre un prototipo y otro radica en el algoritmo de control que se utiliza. Una vez que es encendido el sistema es aplicada la señal de control al circuito activador de los transistores del inversor, a una frecuencia de 60 kHz por medio segundo. Como el sistema de control se encuentra monitoreando constantemente la corriente por el inductor, si esta sobrepasa el valor límite que tiene fijado, es apagado el sistema.

Respuesta en el dominio del tiempo ante un estímulo

La teoría del método de respuesta en el dominio del tiempo ante un estímulo establece, que la impedancia equivalente se puede representar a través de un circuito RLC serie. 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. Este último es una medida de lo rápido que decae la respuesta natural hasta su valor final permanente, el cual es directamente proporcional a la resistencia e inversamente proporcional al doble de la inductancia. Las oscilaciones presentes en la respuesta natural se deben a la transferencia de energía entre el condensador resonante y el inductor, mientras que la atenuación de las mismas va a estar influenciada grandemente por el valor de la resistencia.

En [5], es desarrollado lo antes planteado, y describen como identificar el tipo de recipiente a partir de la respuesta natural. El inversor utilizado es un cuasi resonante en modo ZVS (Zero Voltage Switching), con un transistor del tipo IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor). Las señales a monitorear son la tensión a la entrada del inversor y la tensión colector emisor del transistor. Estas señales son comparadas a través de un amplificador operacional (AMPOP), el cual da como resultado un tren de pulsos en dependencia de las oscilaciones presentes. El dispositivo de control que utilizaron para este fin fue un microcontrolador, el cual cuenta la cantidad de pulsos de la señal proveniente del AMPOP. En el caso de ser mayor el número de pulsos que la referencia fijada, se está en presencia de recipientes no ferromagnéticos o sin recipiente, entonces el sistema de control toma la decisión de apagar los pulsos del inversor. La figura 5, muestra las formas de onda de la tensión colector emisor del IGBT (verde), el pulso de activación del transistor (rojo), la corriente por el IGBT (rosado) y la señal de salida del AMPOP (azul), para dos condiciones de carga. Puede apreciarse como para el caso del recipiente ferromagnético, la cantidad de pulsos son menores que para el menaje de aluminio, en la señal que va al microcontrolador.

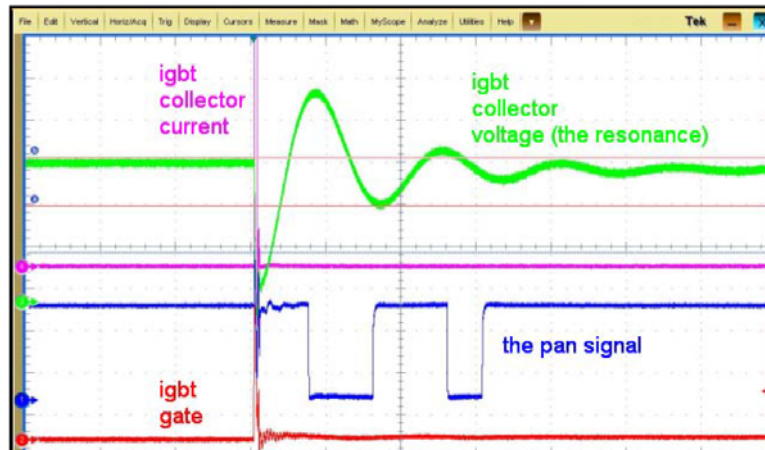


Fig. 5 a). Señales utilizadas para identificación de recipiente de aluminio.

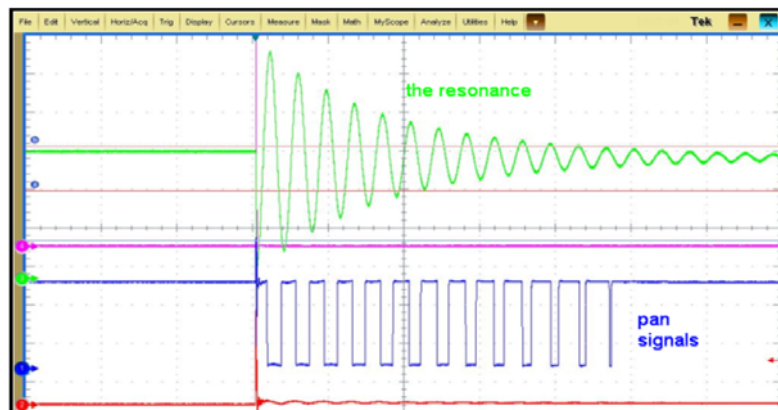


Fig. 5 b). Señales utilizadas para identificación de recipiente ferromagnético [5].

En [12], se puede ver el efecto de 5 recipientes de diferentes materiales metálicos, ante un pulso de activación a uno de los semiconductores de potencia, utilizando el método de respuesta en el dominio del tiempo. 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, la frecuencia de oscilación, al igual que la magnitud de la misma, es mucho mayor para el aluminio que para los restantes materiales ferromagnéticos. El comportamiento de cada uno de los materiales magnéticos es muy similar, aunque las tecnologías de fabricación sean diferentes.

En la figura 6, se presentan las respuestas naturales ante un pulso de activación de un transistor del inversor para tres condiciones de carga. Es importante resaltar que en las condiciones sin recipiente y con recipientes ferromagnéticos se tienen frecuencias de oscilación similares, a diferencia de los recipientes no ferromagnéticos.

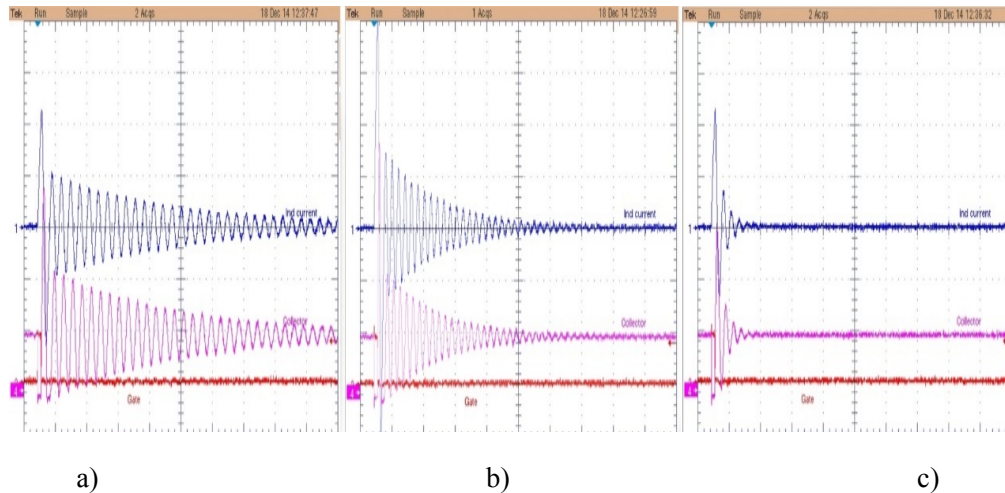


Fig. 6. Respuesta libre de la impedancia equivalente ante un pulso de activación en un transistor del inversor [12]. a) Sin recipiente. b) Recipiente no ferromagnético. c) Recipiente ferromagnético.

RESULTADOS y(o) DISCUSIÓN

Sistema propuesto para detección de menaje

El sistema propuesto para la identificación de menaje responde al esquema presentado en la figura 7. El método a utilizar para la identificación de recipientes es el de respuesta en el dominio del tiempo ante un estímulo. Para ello como se explicó anteriormente, es necesario realizar la medición de la tensión colector emisor del transistor. En este caso como el inversor a emplear es un medio puente, la tensión a medir es la del transistor inferior, cuya forma de onda tiene la característica de alguna de las gráficas de la figura 6, según el material del recipiente. Para acondicionar esa señal y pueda ser procesada por el sistema de control, se hace uso de amplificadores operacionales y divisores resistivos.

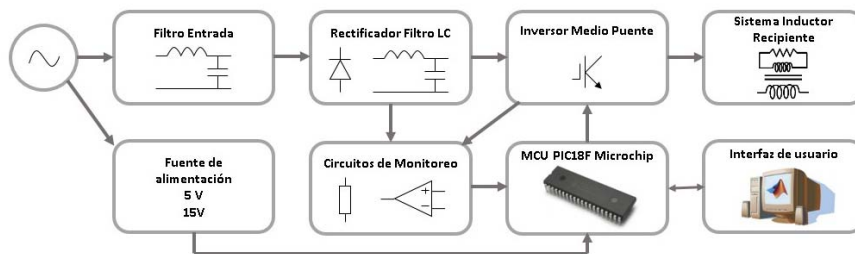


Fig. 7. Diagrama en bloques del sistema de detección de menaje.

El sistema propuesto se encuentra estructurado en 7 etapas principales, para dar similitud al sistema electrónico que posee una cocina de inducción comercial. La primera etapa está compuesta por un filtro de entrada para la reducción de armónicos a la red, mientras que la segunda es un rectificador en puente con un pequeño filtro LC, con el fin de eliminar la alta frecuencia contenida en la tensión y corriente de directa, producida por la etapa inversora, esta última tiene una topología de medio puente. La cuarta etapa es el sistema inductor-recipiente representando la carga del inversor. La fuente de alimentación es la etapa encargada de suministrar las tensiones necesarias para el funcionamiento del circuito de control. La etapa basada en el microcontrolador PIC de gama alta de propósito general compone el sistema de control, y es el que desarrolla toda la técnica de detección e identificación del recipiente.

Los circuitos de monitoreo son los que se encargan de chequear la tensión y corriente de red, para su regulación y acondicionan la tensión colector emisor del transistor inferior. Esto último es realizado a través de un condensador cerámico que permite desacoplar el nivel de corriente directa presente en la señal, un divisor resistivo de tensión que atenúa la señal a valores de tensiones de control, la cual es rectificada a partir de diodos para después ser comparada con una referencia, empleando un AMPOP, obteniéndose por último un tren de pulsos consecuente con el presentado en la figura 5. Por último se encuentra la interfaz de usuario que consiste en un programa, que controla el encendido y apagado del sistema electrónico, el cual recibe información de cómo se encuentra funcionando el mismo, como puede verse en [13], mediante comunicación por puerto serie.

Resultados de la detección

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones efectuadas para 5 condiciones de carga, haciendo uso del sistema electrónico propuesto. Los recipientes utilizados en los ensayos se aprecian en la tabla 1, y corresponden a una sartén de hierro, un recipiente de acero, uno de aluminio con una plancha ferromagnética empotrada en el fondo, un jarro de aluminio. Además, se realizan ensayos en la condición sin recipiente o en vacío.

Tabla 1: Dimensiones de los menajes de prueba.

Tipo de recipiente	Diámetro Inferior (mm)	Diámetro Superior (mm)	Diámetro ferromagnético (mm)	Altura (mm)
Recipiente de acero ferromagnético 	180	200	-----	106
Recipiente de aluminio con fondo ferromagnético empotrado 	165	244	141	68
Recipiente de hierro 	120	170	-----	80
Recipiente de aluminio 	160	160	-----	140

En la figura 8, las señales representadas para su análisis son el pulso de activación del IGBT inferior (amarillo), la tensión rectificada de salida del condensador de desacople (azul), la corriente en la carga (rosado) y los pulsos a la salida del comparador analógico (verde).

La figura 8 a), presenta los resultados obtenidos para cuando se tiene operando al inversor sin recipiente o vacío, mientras que la figura 8 b), es cuando posee un recipiente de aluminio. Es apreciable, cuando no se tiene recipiente como la amortiguación de las oscilaciones de la respuesta natural del sistema RLC es menor que todos los casos a analizar, por lo que provoca un mayor número de pulsos a la salida del comparador analógico. El tiempo en que demora el primer pulso de la respuesta libre, a partir de que termina el pulso de estímulo, es de 35 μ s, el cual es también el mayor de todos. En cuanto al recipiente de aluminio, es notable que el pico de corriente resultante del pulso es el máximo alcanzado respecto a los otros. La cantidad de pulsos es de 5, aunque este valor puede aumentar en dependencia del tamaño el recipiente. La frecuencia de las oscilaciones es mayor y el tiempo del primer pulso del comparador es de 17,5 μ s, permaneciendo prácticamente invariable para otras dimensiones del menaje.

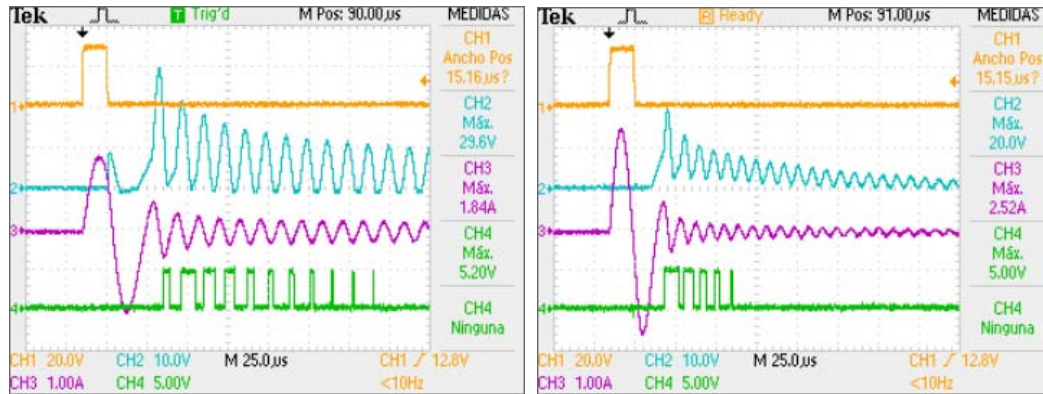


Fig. 8. Pulso de activación del IGBT inferior (amarillo), tensión rectificada de salida del condensador de desacople (azul), corriente en la carga (rosado) y tensión de salida del comparador analógico. a) En vacío. b) Con recipiente de aluminio.

En cuanto a las figura 9 a) y b), se presentan los resultados obtenidos para recipientes de hierro y acero. Se puede observar la gran similitud en las formas de onda, las pequeñas variaciones existentes son producto de la geometría de los recipientes. Es concluyente que ambos menajes poseen características ferromagnéticas semejantes, el número de pulsos es de 2, pues posee un mayor amortiguamiento la envoltura de la componente oscilatoria que en los casos anteriores. En cuanto al tiempo del primer pulso del comparador es de 29 μ s y 30 μ s para el hierro y acero, respectivamente.

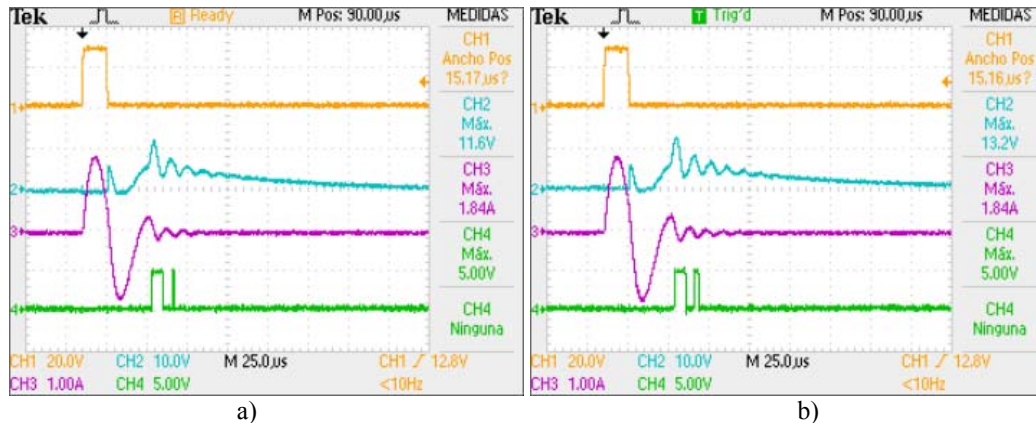


Fig. 9. Pulso de activación del IGBT inferior (amarillo), tensión rectificada de salida del condensador de desacople (azul), corriente en la carga (rosado) y tensión de salida del comparador analógico. a) Con recipiente de hierro. b) Con recipiente de acero.

La figura 10, recoge los resultados alcanzados para el recipiente de aluminio con fondo ferromagnético empotrado. Se observa como existe una fusión entre las formas de onda de los materiales ferromagnéticos y el aluminio. El número de pulsos en este caso es de 4, con un tiempo para el primer pulso de 22 μ s.

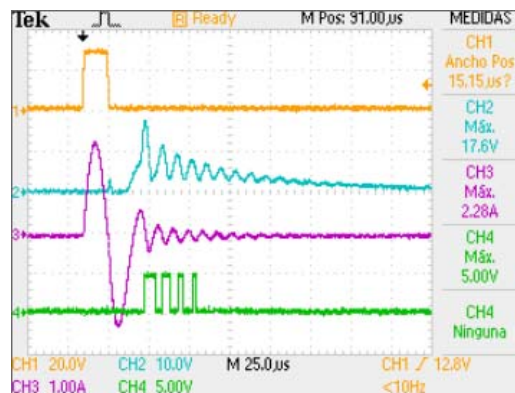


Fig. 10. Pulso de activación del IGBT inferior (amarillo), tensión rectificada de salida del condensador de desacople (azul), corriente en la carga (rosado) y tensión de salida del comparador analógico, con recipiente de aluminio con fondo ferromagnético empotrado.

Según los resultados obtenidos, para realizar una correcta identificación de los recipientes, los materiales ferromagnéticos deben cumplir con la condición de un número de pulsos menor que 5, y el tiempo en que demora en ocurrir el primer pulso de la respuesta natural mayor a 20 μ s. Esto es definido por software en el algoritmo de detección e identificación de menaje. De esta manera queda definido que los recipientes de acero ferromagnético, hierro y el de fondo empotrado, son los adecuados para su funcionamiento en cocinas de inducción electromagnética.

CONCLUSIONES

Por los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que la cocina de inducción debe verse como un sistema inductor 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 método de respuesta libre en el dominio del tiempo ante un estímulo en el inversor, posee resultados óptimos para la identificación de recipientes ferromagnéticos y baja complejidad de implementación comparado con el método de medición de la magnitud de la corriente en alta frecuencia. A partir del sistema implementado de identificación de recipiente, es posible lograr una selección exacta del menaje colocado en la cocina, a través de la configuración de los parámetros: número de pulsos y tiempo del primer pulso de la respuesta natural. Estos parámetros pueden ser empleados en un prototipo comercial para rechazar el funcionamiento de la cocina cuando sean colocados recipientes de aluminio, cobre u otros que no presenten características que garanticen la operación segura de la cocina previniendo fallas de los semiconductores de potencia.

REFERENCIAS

- [1] S. R. GHUGE a M. R. RODA. Summary Of Overall Topologies Of An Induction Cooker For Home Use (298). 2015 *International Conference on Energy Systems and Applications* [online]. 2015, 655–657. Disponible z: doi:10.1109/ICESA.2015.7503431
- [2] B. SALVATIERRA, K. COYAGO, D. CHACÓN a J. P. INGA. Inverter resonant control by modified SPWM and trapezoidal modulation for induction cooking. 2016 *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)* [online]. 2016, 1–6. Disponible z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7830599>
- [3] Q. HU, W. CHEN, T. HUANG a Q. CHEN. The analysis of near-field magnetic leakage on the domestic induction cooker. 2014 *International Power Electronics and Application Conference and Exposition* [online]. 2014, 605–608. Disponible z: doi:10.1109/PEAC.2014.7037925
- [4] W. C. MORELAND. The Induction Range: Its Performance and Its Development Problems. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 1973, **IA-9**(1), 81–85. ISSN 0093-9994. Disponible z: doi:10.1109/TIA.1973.349892
- [5] M. E. TULU a D. YILDIRIM. Induction cooker design with quasi resonant topology using jitter drive method. 2013 *12th International Conference on Environment and Electrical Engineering* [online]. 2013, 1–6. Disponible z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6549590>
- [6] D. S. KIM, J. Y. SO a D. K. KIM. Study on Heating Performance Improvement of Practical Induction Heating Rice Cooker with Magnetic Flux Concentrator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [online]. 2016, **26**(4), 1–4. ISSN 1051-8223. Disponible z: doi:10.1109/TASC.2016.2540650
- [7] A. AMRHEIN a J. S. J. LAI. A Transformer-Coupled, Series-Resonant Topology for the Induction Heating of Aluminum Cookware. 2015 *9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)* [online]. 2015, 1234–1239. ISSN 2150-6078. Disponible z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7167938>
- [8] J. ACERO, O. LUCIA, I. MILLAN, L. A. BARRAGAN, J. M. BURDIO a R. ALONSO. Identification of the material properties used in domestic induction heating appliances for system-level simulation and design purposes. 2010 *Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* [online]. 2010, 439–443. ISSN 1048-2334. Disponible z: doi:10.1109/APEC.2010.5433634
- [9] FRANCOIS, Forest, Labouré ERIC, Costa FRANCOIS a Gaspard JEAN YVES. Principle of a multi-load/single converter system for low power induction heating. *IEEE*. 2000. Disponible z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=838094>
- [10] L. MENG, K. W. E. CHENG a K. W. CHAN. Systematic Approach to High-Power and Energy-Efficient Industrial Induction Cooker System: Circuit Design, Control Strategy, and Prototype Evaluation. *IEEE Transactions on Power Electronics* [online]. 2011, **26**(12), 3754–3765. ISSN 0885-8993. Disponible z: doi:10.1109/TPEL.2011.2165082
- [11] T. TANAKA. A new induction cooking range for heating any kind of metal vessels. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* [online]. 1989, **35**(3), 635–641. ISSN 0098-3063. Disponible z: doi:10.1109/30.44329
- [12] SEMICONDUCTOR, ON. AND9201/D. The Effect of Pan Material in an Induction Cooker. 2015. Disponible z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwiAno3L-6LhAhUBc60KHbguCBUQFjABegQIChAE&url=http%3A%2F%2Fwww.onsemi.com%2Fpub%2FCollateral%2FAND9201-D.PDF&usq=AOvVaw0HLLntWN200Qh4ZHcX_DqA
- [13] A. M. G. Menéndez, Y. R. Domínguez, and A. F. Correa, “Diseño e implementación de un inversor medio puente y su control para aplicación en calentamiento por inducción electromagnética,” in *XVIII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*, 2016. Disponible z: https://www.researchgate.net/publication/320086646_DISENO_E_IMPLEMENTACION_DE_UN_INVERSOR_MEDIO_PUENTE_Y_SU_CONTROL_PARA_APLICACION_EN_CALENTAMIENTO_POR_INDUCCION_ELECTROMAGNETICA