

Sistema de calentamiento por inducción electromagnética para pruebas experimentales en laboratorios de Físico-Química

Julio Ortega Alejos

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Av. Educación Superior No. 2000, Col. Benito Juárez, C.P. 38980, Uriangato, Gto., Teléfono: 461 177 6068
j.ortega@itsur.edu.mx

Leonel Estrada Rojo

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Av. Educación Superior No. 2000, Col. Benito Juárez, C.P. 38980, Uriangato, Gto., Teléfono: 461 177 6068

Carlos A. Fuentes Hernández

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Av. Educación Superior No. 2000, Col. Benito Juárez, C.P. 38980, Uriangato, Gto., Teléfono: 461 177 6068

Elías J. J. Rodríguez Segura

Instituto Tecnológico de Celaya, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Celaya Gto.

Israel Álvarez Ariza

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Coordinación de Ingeniería Electrónica

José Jesús Arizaga Ibarra

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Coordinación de Ingeniería Electrónica

Diego Díaz López

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Coordinación de Ingeniería Electrónica

Resumen.

En los laboratorios de Físico - Química se utilizan equipos de calentamiento tales como Estufas, Hornos / Muflas, Parrillas de calentamiento, Autoclaves y Baño María, los cuales generan el calor a partir de resistencias eléctricas. Aunque permiten alcanzar los niveles de temperatura deseados, el tiempo en el que lo logran no siempre es satisfactorio cuando se requieren resultados rápidos. En este documento se presenta el diseño de un sistema que utiliza la inducción electromagnética para calentar el recipiente en donde se encuentra el material o solución en estudio, alcanzando temperaturas de hasta 500 °C en 4 minutos para algunas aplicaciones; el sistema cuenta con un control de temperatura y una interfaz gráfica de usuario para monitorear el tiempo en el que alcanzó la temperatura deseada, el tiempo de calentamiento, tiempo de enfriamiento y el historial de pruebas.

Palabra(s) Clave(s): efecto cortical, frecuencia de resonancia, inducción electromagnética, interfaz gráfica de usuario, tanque resonante.

1. Introducción

El calentamiento por inducción electromagnética es un método que se ha utilizado de manera exclusiva en aplicaciones industriales tales como fundición, forja y tratamiento térmico; en la actualidad también es utilizado en la cocción de alimentos. Es una tecnología que no se desarrolla en México, por lo que se tiene que importar de países como Estados Unidos, España y Japón. Entre las marcas líderes del mercado se encuentran: InductoHeat y GH. Dicha situación también provoca que el costo de un equipo de calentamiento y su mantenimiento sea elevado.

1.1. Infraestructura de laboratorios de ingeniería ambiental del ITSUR

En el año 2013, inicia la carrera de Ingeniería Ambiental en el ITSUR (Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato) ubicado en el municipio de Uriangato, Gto. A medida que se van cubriendo materias propias de la carrera, es necesario cada

vez más hacer uso del laboratorio para la experimentación; Sus laboratorios comienzan a equiparse con instrumentos que les permitan cubrir sus necesidades básicas.

En los experimentos que utilizan calor, tales como el estudio de las propiedades coligativas de las soluciones, para aplicaciones de secado o deshidratado de materiales antes de su análisis, para incubar cultivos microbianos para favorecer su crecimiento, para favorecer la descomposición térmica de materiales, para pruebas serológicas y procedimientos de aglutinación e inactivación, normalmente se ocupa equipo convencional tal como Estufas, Hornos / Muflas, Parrillas de calentamiento, Autoclaves y Baño María, que generan el calor a partir de resistencias eléctricas. En el ITSUR solamente contaban con mecheros o resistencias para realizar sus prácticas;

Dichas técnicas de calentamiento se caracterizan por tardar demasiado en alcanzar las temperaturas necesarias en el experimento, no se puede tener control exacto del tiempo en el que se debe alcanzar la temperatura deseada y la magnitud de la misma; además, el monitoreo de la temperatura se hacía con termómetros de mercurio y el tiempo de calentamiento se medía de manera rudimentaria con cronómetros.

La adquisición de equipo de calentamiento más sofisticado implica un gasto excesivo, por lo que se propone como solución el diseño y desarrollo de un sistema de calentamiento por inducción electromagnética con una interfaz gráfica de usuario para el monitoreo de la temperatura, tiempos de calentamiento y el historial de pruebas, utilizando el software LabVIEW de National Instruments.

1.2. Calentamiento por inducción electromagnética

El calentamiento por inducción es un método que utiliza un campo magnético variante con el tiempo para inducir corrientes eléctricas, llamadas corrientes de remolino, las cuales disipan energía y producen calor al fluir a través de la resistencia de un material conductor de electricidad, fig. 1 [1].

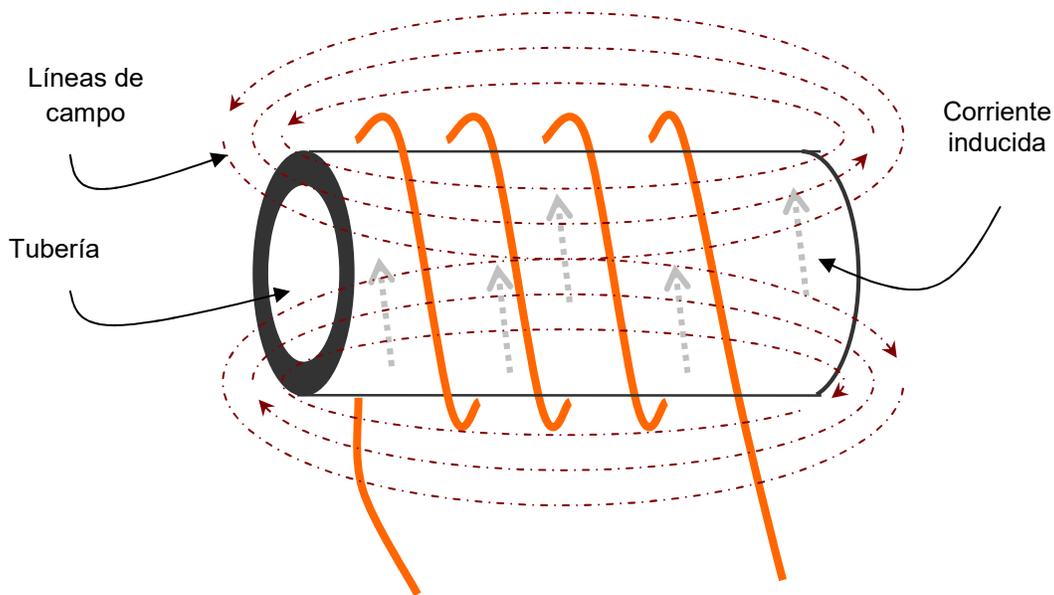


Fig. 1. Inducción de corriente en un material conductor de electricidad.

El nivel de penetración del campo magnético en la pieza está en función de su frecuencia y las propiedades del material. Un material con propiedades ferromagnéticas tiene una permeabilidad magnética muy alta, provocando que el campo magnético se intensifique dentro del material y por consiguiente la corriente inducida es mayor, de tal forma que la potencia disipada en la superficie de la pieza es muy grande. En frecuencias altas se induce un nivel de corriente mucho mayor en la superficie de la pieza que cuando se trabaja con niveles de frecuencia bajos.

Al efecto de que la corriente inducida sea mucho mayor en la superficie que en el interior de la pieza (provocado por la frecuencia y la permeabilidad magnética) se le llama efecto cortical, Fig. 2 [2]. Cuando una sección de una pieza está más caliente que otra, el calor comienza a viajar inmediatamente por conducción hacia la parte más fría, causando que con el tiempo la temperatura sea uniforme en la misma.



Fig. 2. Efecto cortical a consecuencia de: a) frecuencia alta, b) frecuencia baja.

Si se requiere que la superficie de la pieza tenga un nivel de temperatura mucho mayor que en su interior, se requiere mantener elevados los niveles tanto de potencia como de frecuencia; de esta manera, se puede calentar la superficie de la pieza muy rápidamente (por efecto cortical) de tal forma que el calor no tiene suficiente tiempo para viajar muy lejos antes de que la superficie alcance la temperatura deseada.

Por el contrario, para calentar de manera uniforme la sección transversal de la pieza, se utilizan niveles de frecuencia y potencia bajos, con la finalidad de dar suficiente tiempo al calor de viajar al centro antes de que la superficie esté demasiado caliente.

El diseño de un sistema de calentamiento utilizando un campo electromagnético involucra la intervención de varias disciplinas a fin de satisfacer las condiciones necesarias para tratar un material. Entre estas disciplinas se encuentran: electrónica, electromagnetismo, transferencia de calor, métodos numéricos y computacionales. A la parte electrónica le corresponde realizar una transformación de potencia en forma resonante a fin de amplificar una variable (voltaje o corriente) para generar un campo magnético variante con el tiempo por medio de una bobina de calentamiento.

1.3. Tanques resonantes

El campo magnético debe ser lo suficientemente intenso para inducir el nivel de corriente que pueda elevar la temperatura de un material ferromagnético en un tiempo muy corto. Se necesita un campo con más potencia cuando se trabaja con materiales que no poseen propiedades ferromagnéticas.

La construcción de la bobina de calentamiento determina el nivel de corriente que se le debe suministrar. Suponiendo que se necesita una intensidad de campo “H” y la bobina (tipo solenoide) consta de pocas espiras, entonces el nivel de corriente debe ser muy grande para obtener la intensidad del campo magnético “H1”, según la relación para un solenoide (1).

$$H = \frac{N * I}{L} \quad (1)$$

En donde:

- H : Intensidad de campo magnético;
- N : Número de espiras;
- I : Corriente que circula a través de la bobina.
- L : Longitud del solenoide

Por el contrario, si se requiere la misma intensidad de campo “H” y el número de espiras es grande, se debe amplificar el voltaje para que circule un nivel de corriente bajo y evitar grandes pérdidas por conducción ya que la resistencia de la bobina se ha incrementado, Fig. 3.

Normalmente, los niveles de corriente o voltaje que se aplican a la bobina sobrepasan la capacidad que puede suministrar un convertidor convencional debido a que demandan una gran cantidad de potencia reactiva. Para evitar estos problemas, se suele utilizar tanques resonantes, en donde, al sintonizarlo en su frecuencia de resonancia se amplifica de forma natural el voltaje o la corriente.

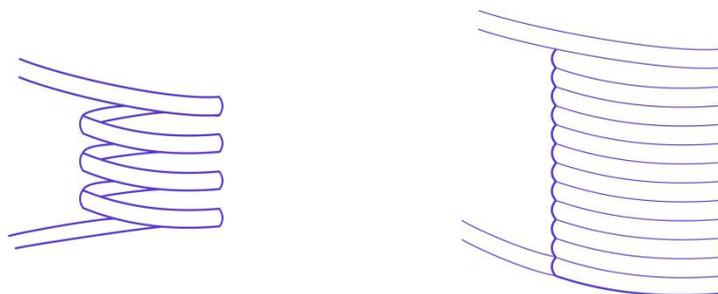


Fig. 3. Bobina de calentamiento tipo solenoide.

Las configuraciones de tanques resonantes reportadas en la literatura se pueden clasificar según el número de elementos reactivos, de aquí que podemos encontrar tanques de dos, tres o de más de tres elementos reactivos [3].

Los tanques de más de dos elementos surgen de la necesidad de una mayor amplificación en las variables, un mejor acoplamiento de impedancia o de que una variable se componga de múltiples frecuencias a fin de proporcionar diversos niveles de profundidad de penetración para realizar algún tratamiento térmico en un sólo paso.

Un tanque resonante puede ser alimentado en voltaje o en corriente, los tanques de dos elementos reactivos conectados en paralelo deben alimentarse en corriente, teniendo en cuenta que un capacitor se considera una fuente de voltaje; una configuración serie se alimenta por voltaje puesto que el inductor se considera una fuente de corriente [4].

1.3.1. Tanques resonantes de tres elementos reactivos (LLC)

La configuración LLC se comporta como un circuito híbrido entre un tanque resonante paralelo y uno serie. Por lo tanto, se tienen dos frecuencias de resonancia: una resonancia paralelo entre L_p y C en ω_1 y una resonancia serie entre L_{eq} y C en ω_0 . La Fig. 4 muestra la configuración en puente completo del inversor resonante y su circuito equivalente. El arreglo LLC está aislado y acoplado al puente inversor mediante el transformador T_1 , Fig. 4a, [5,6].

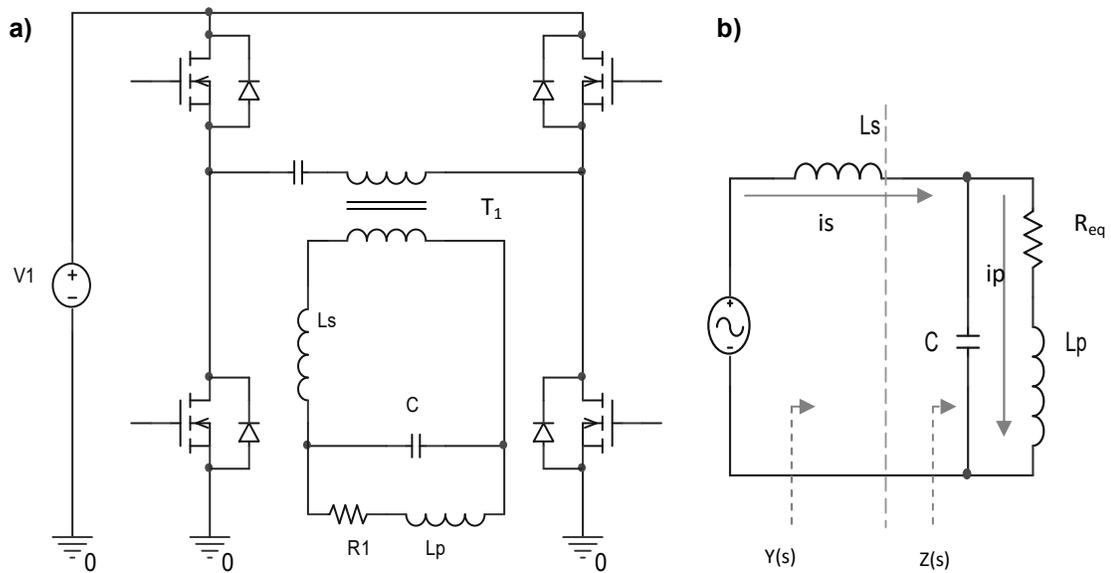


Fig. 4. a) Tanque resonante LLC alimentado por voltaje, b) Circuito equivalente.

Suponiendo que $L_s \gg L_p$ y un valor de Q alto, la admitancia del circuito equivalente está dada por (2), [7]:

$$Y(s) = \frac{1}{L_T s} \frac{\left(\frac{s}{\omega_1}\right)^2 + \frac{1}{Q_1} \left(\frac{s}{\omega_1}\right) + 1}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + \frac{1}{Q_0} \left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1} \quad (2)$$

En donde:

$$L_T = L_s + L_p; \quad L_{eq} = \frac{L_p L_s}{L_p + L_s}; \quad Q_1 = \frac{1}{R_{eq}} \sqrt{\frac{L_p}{C}};$$

$$\omega_1^2 = \frac{1}{L_p C}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{C L_{eq}}; \quad Q_0 = \frac{1}{R_{eq}} \sqrt{\frac{L_{eq}}{C}}$$

- Y(s): Admitancia;
- ω_1 : Frecuencia de resonancia paralelo;
- ω_0 : Frecuencia de resonancia serie;
- L_s : Inductancia serie;
- L_p : Inductancia paralelo;
- C: Capacitancia;

- Q_1 : Factor de calidad a la frecuencia de resonancia ω_1 ;
 Q_0 : Factor de calidad a la frecuencia de resonancia ω_0 ;
 R_{eq} : Resistencia equivalente.

En [5] se realiza un análisis para obtener la frecuencia en donde la disipación de potencia es máxima. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$\omega_{P_{max}} \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq}C}} \quad (3)$$

$$P_{max} = \frac{v_1^2}{2R_{eq}} \left(\frac{L_p}{L_s} \right)^2 \quad (4)$$

En donde:

- ω_{pmax} : Frecuencia de resonancia en donde se transfiere la potencia máxima;
 L_{eq} : Inductancia equivalente;
 P_{max} : Potencia máxima;
 v_1 : Valor máximo de la componente fundamental de la onda cuadrada en el secundario del transformador.

Se puede obtener la impedancia del circuito evaluando (2) e invertir el resultado. En base a las ecuaciones anteriores, la impedancia en ω_0 , en el lado del secundario del transformador T_1 se representa de la siguiente manera [7]:

$$Z(j\omega_0) = L\omega_0 \left(\frac{\beta^2}{Q - j(\beta + 1)} \right) \quad (5)$$

$$Q = \frac{L_p \omega_0}{R_{eq}} \quad \beta = \frac{L_s}{L_p}$$

En donde:

$Z(j\omega_0)$: Impedancia evaluada en la frecuencia ω_0 ;

β : Relación de inductancias;

L_s : inductancia serie;

L_p : inductancia paralelo;

Q : Factor de calidad;

R_{eq} : Resistencia equivalente.

El resultado anterior significa que, en resonancia, la impedancia es inductiva. En consecuencia, cuando se demanda la potencia máxima siempre habrá un ángulo de conmutación Φ (un retraso de la corriente). Φ se obtiene del argumento de (5).

$$\phi = \arg(Z(\omega_0)) = \arctan\left(\frac{\beta + 1}{Q}\right) > 0 \quad (6)$$

En donde:

Φ : ángulo de conmutación;

β : relación de inductancias;

Q : factor de calidad.

Las funciones de transferencia de la corriente y el voltaje evaluadas en la frecuencia $\omega_{P_{max}}$ se expresan según (7) y (8), respectivamente.

$$Hi_{P_{max}} \approx \frac{Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q L_p}{L_s}\right)^2}} \approx \beta \cos \phi \quad (7)$$

$$Hv_{P_{max}} \approx \frac{L_p}{L_s} \left(1 + \frac{L_p}{L_s}\right) Q \approx \frac{Q}{\beta} \quad (8)$$

En [7] se demuestra que el argumento de $Hv_{P_{\max}}$ es:

$$\arg(Hv_{P_{\max}}) = -90^\circ \quad (9)$$

Este resultado indica que en resonancia el voltaje en el capacitor C estará retrasado 90° respecto del voltaje en el secundario de T_1 . Por lo tanto, este resultado es utilizado para identificar la frecuencia en donde se transfiere la potencia máxima.

2. Desarrollo

El sistema de calentamiento se diseñó basado en un tanque resonante tipo LLC cuya frecuencia de resonancia se encuentre entre 80 kHz – 90 kHz y demande una potencia de 500 watts, alimentándose desde la red eléctrica con un voltaje pico de 170 volts. El sistema debe de alcanzar temperaturas de hasta 600°C en materiales de acero al carbón.

El sistema está conformado por un convertidor electrónico que alimenta a la bobina de calentamiento; para medir la temperatura se utiliza un termopar tipo K, la señal que proporciona se filtra y acondiciona para ser transmitida a la tarjeta de adquisición de datos y en la interfaz gráfica de usuario se monitorea la evolución de la temperatura, tal como se muestra en Fig.5.

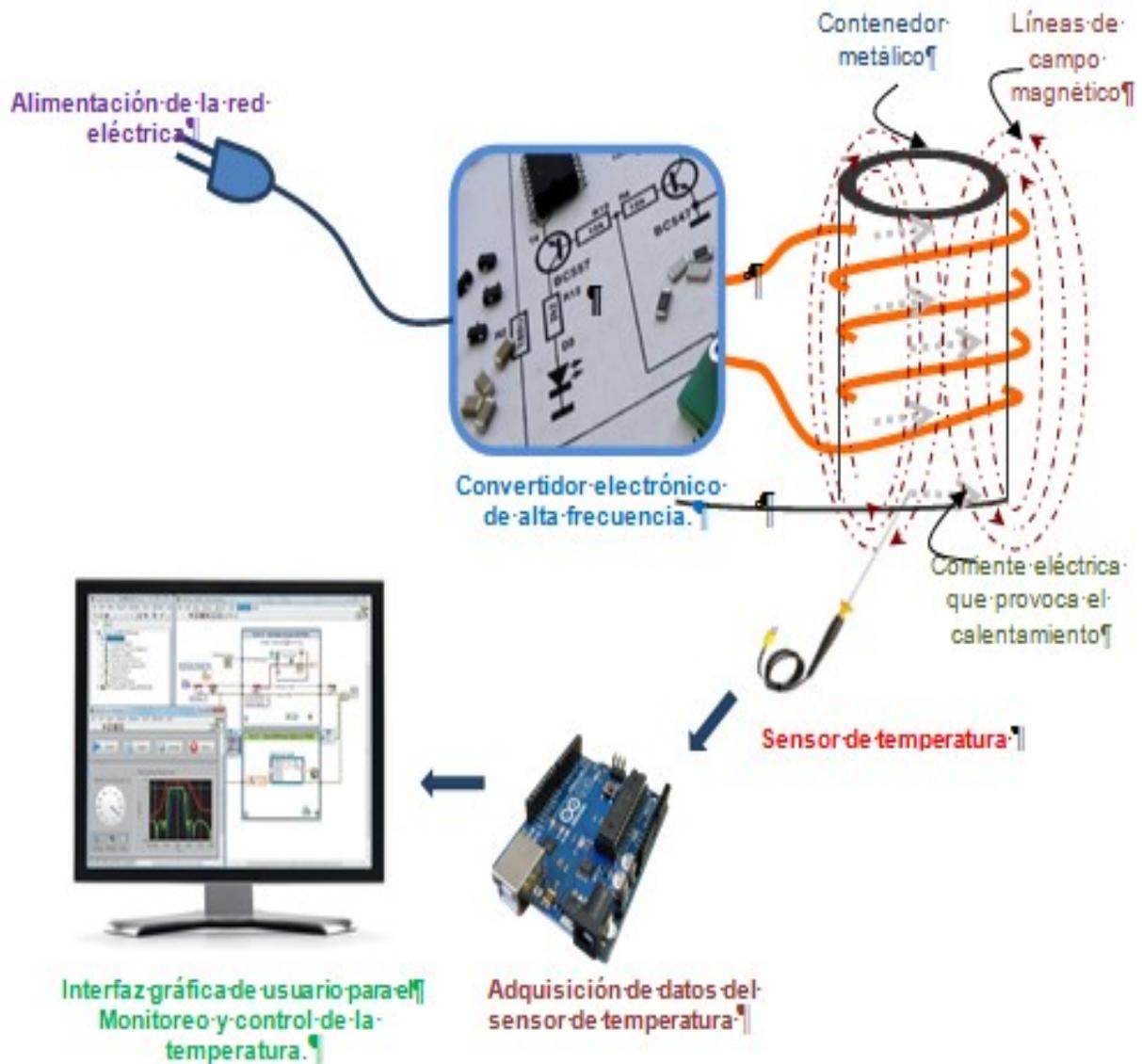


Fig. 5. Composición del sistema de calentamiento por inducción electromagnética.

Con un instrumento LRC se midió de inductancia y resistencia equivalente en la bobina de calentamiento, ver tabla 1. Los valores de frecuencia de resonancia, inductancia y resistencia de la bobina de calentamiento (con y sin carga) se obtuvieron los valores de C, Ls y N empleando las ecuaciones presentadas en la sección 1.3.1.

Parámetro	Valor		Unidad
Inductancia, L_p	sin carga, 3.76	con carga, 3.34	μH
Resistencia equivalente, R_{eq}	sin carga, 36	con carga, 141	$\text{m}\Omega$
Factor de calidad, Q	13		---
Inductancia serie, L_s	21.7		μH
Capacitor para el tanque, C3	1		μF
Relación de transformación del transformador de aislamiento, N	2.88		—

Tabla 1.1. Mediciones obtenidas de la bobina de calentamiento.

El diagrama a bloques del convertidor electrónico se muestra en la Fig. 6. El control para transferir la máxima potencia se implementó utilizando un microcontrolador de propósito específico para el control de convertidores potencia, el dsPIC30F2020 de MICROCHIP.

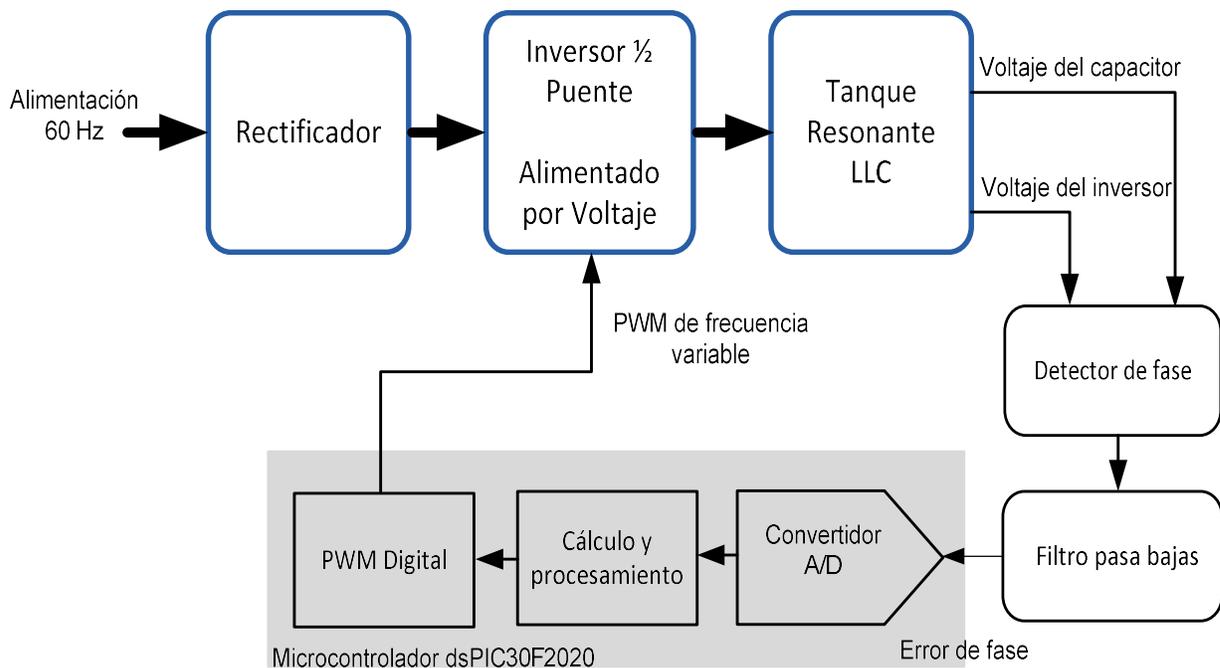


Fig. 6. Diagrama a bloques del convertidor electrónico.

El circuito de potencia consta de un rectificador, un inversor medio puente y tanque resonante, Fig. 7. De acuerdo con la ecuación (3), para obtener una frecuencia de

resonancia de 90 kHz con los valores de L_s y L_p de las especificaciones de la tabla 1, se requiere un capacitor C_3 de $1\mu\text{F}$.

Es necesario establecer también, la capacidad de manejo de corriente en el capacitor C_3 , la cual se puede obtener de la siguiente manera: si la potencia demandada es de 500 Watts y el voltaje aplicado al primario del transformador es de $170/2\text{ V}$, por ser un inversor medio puente, entonces se estará demandando una corriente de 1.47 A a través de los transistores del inversor, dicha corriente circula a través del primario del transformador de acoplamiento de impedancias, el cual, tiene una relación de transformación de 2.88 que provoca que la corriente en el secundario se amplifique a un valor de 4.235 A. Ésta corriente es amplificada por segunda vez hasta un valor de 27.5 A pico en el tanque resonante.

El nivel de corriente que debe soportar el capacitor es muy alto, por lo que se empleó un banco de 10 capacitores de potencia de Película de Polipropileno de $0.1\mu\text{F}$, con capacidad de corriente de 4 A pico a 100 kHz cada uno.

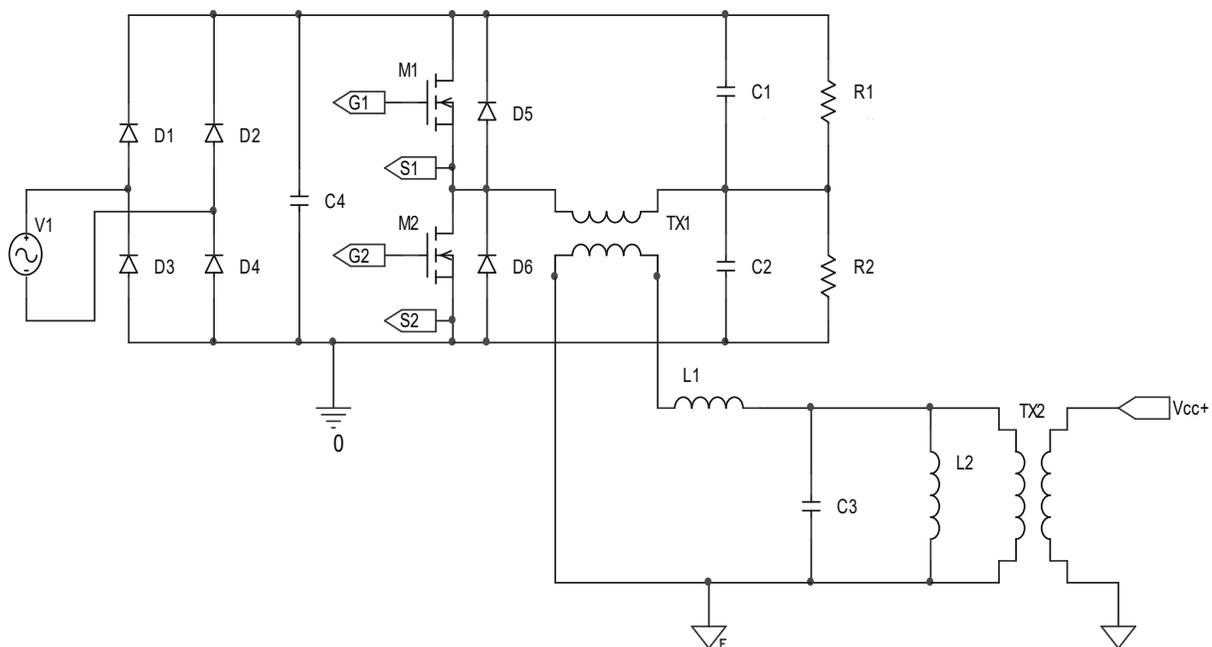


Fig. 7. Esquemático del circuito de potencia.

En base al análisis anterior, los transistores M1 y M2 se seleccionaron considerando una capacidad de conducción de corriente mínima de 5 A, bloqueo de voltaje entre drenaje-fuente de 200 V y resistencia drenaje-fuente en el estado de encendido menor a 0.8Ω para disminuir las pérdidas por conducción. Se seleccionó el Mosfet 7N60C3.

Los capacitores C1 y C2 del inversor medio puente y el C4 del puente rectificador, se seleccionaron para mantener un rizo de voltaje menor a 5 volts y rizo de corriente mayor a 5 A. Para disminuir las pérdidas en el inductor L_s por conducción y por la alta frecuencia, se fabricó trenzando 20 hilos de alambre magneto para disminuir la resistencia y distribuir mejor la corriente en su sección transversal.

El circuito de control lo componen el acondicionador de la señal de voltaje del capacitor del tanque resonante, el detector de fase, filtro pasa bajas, microcontrolador y los impulsores de las señales de compuerta de los Mosfets, como se muestra en la Fig. 8.

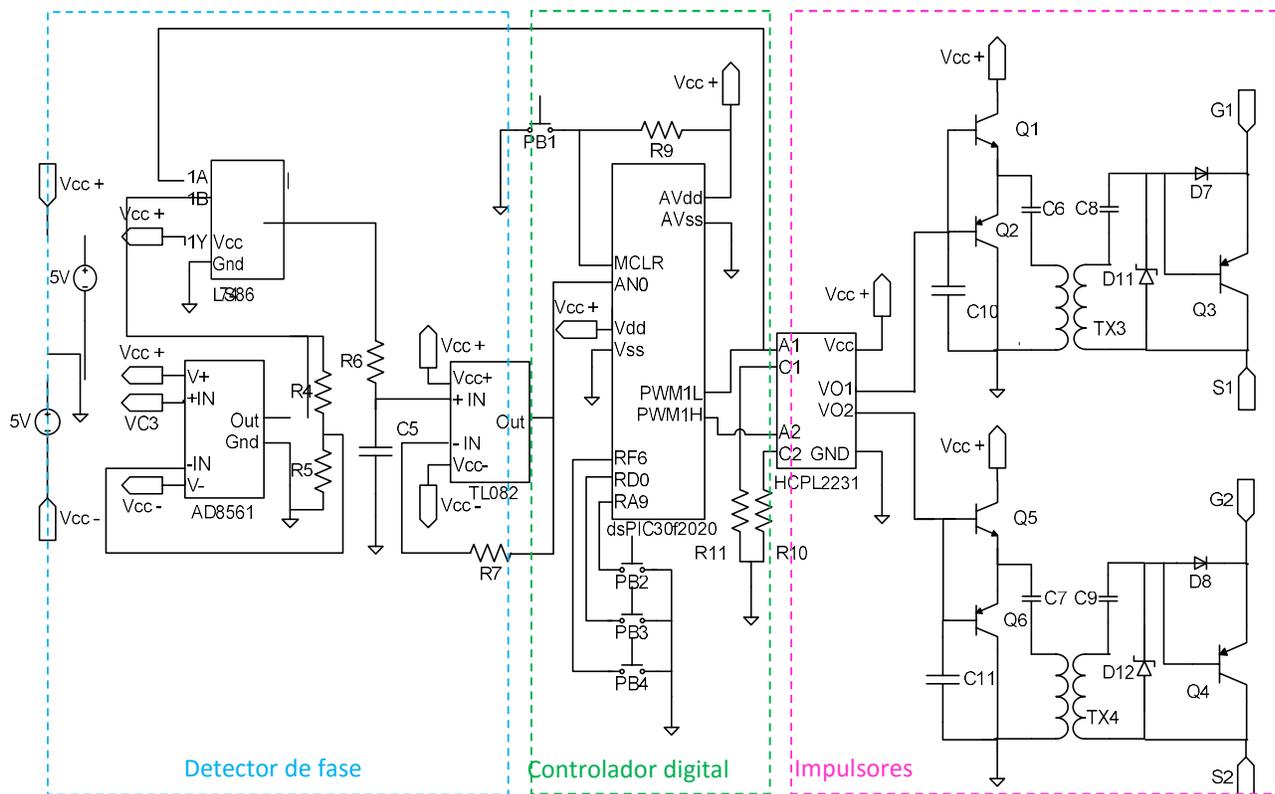


Fig. 8. Esquemático del circuito de control.

Se implementó un control digital por histéresis con frecuencia variable, para mantener el ángulo de defasamiento (θ) entre el voltaje de salida del inversor y el voltaje en el capacitor del tanque resonante cerca de su nivel de referencia (θ_{ref}), por medio de la variación de la frecuencia de conmutación.

Con la condición inicial: $\theta < \theta_{ref}$, la frecuencia de conmutación se incrementará continuamente hasta que θ sea igual a θ_{ref} . Como ésta es una condición ideal y en realidad θ tendrá un valor mayor que θ_{ref} , la frecuencia de conmutación se decrementará para disminuir el valor de θ . De tal forma que θ tendrá pequeñas oscilaciones cerca de su nivel de referencia, Fig. 9.

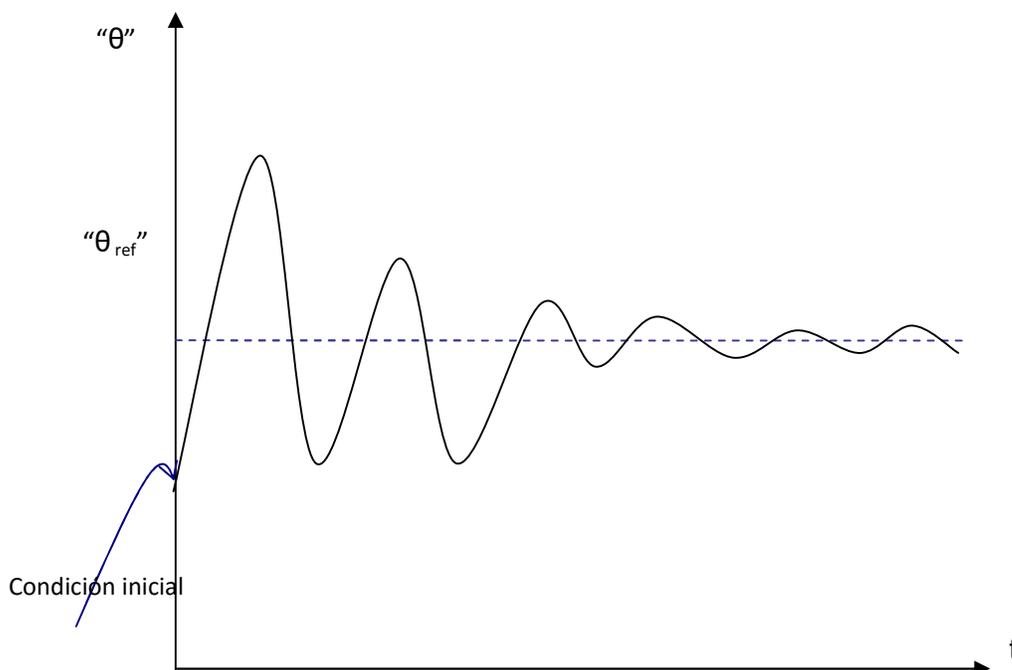


Fig. 9. Respuesta transitoria de θ .

La señal senoidal del capacitor se convierte en una señal digital utilizando un transformador reductor de alta frecuencia y un comparador ultra rápido, mientras que la información de la forma de onda del voltaje de salida del inversor se obtiene directamente de las señales de conmutación de los transistores. El detector de fase se implementó con una compuerta XOR;

La frecuencia de conmutación se encuentra en el rango de 80 kHz y 90 kHz, si el desfaseamiento entre las señales se quisiera obtener con el microcontrolador, la velocidad de ejecución de las instrucciones no permitiría obtener una buena resolución del desfaseamiento. Por tal motivo, se decidió filtrar la salida del detector de fase y convertirla en una señal analógica para transmitirla al módulo de conversión Analógico a Digital con el que se obtiene una mayor resolución en el desfaseamiento.

3. Resultados

El sistema implementado se muestra en la Fig. 10, a la izquierda de la figura se encuentra el circuito de control conformado por el detector de fase, acondicionadores de señal, microcontrolador “dsPIC” y los impulsores de las señales de compuerta. A la derecha se encuentra la etapa de potencia integrada por el inversor medio puente, transformador de acoplamiento y el tanque resonante.

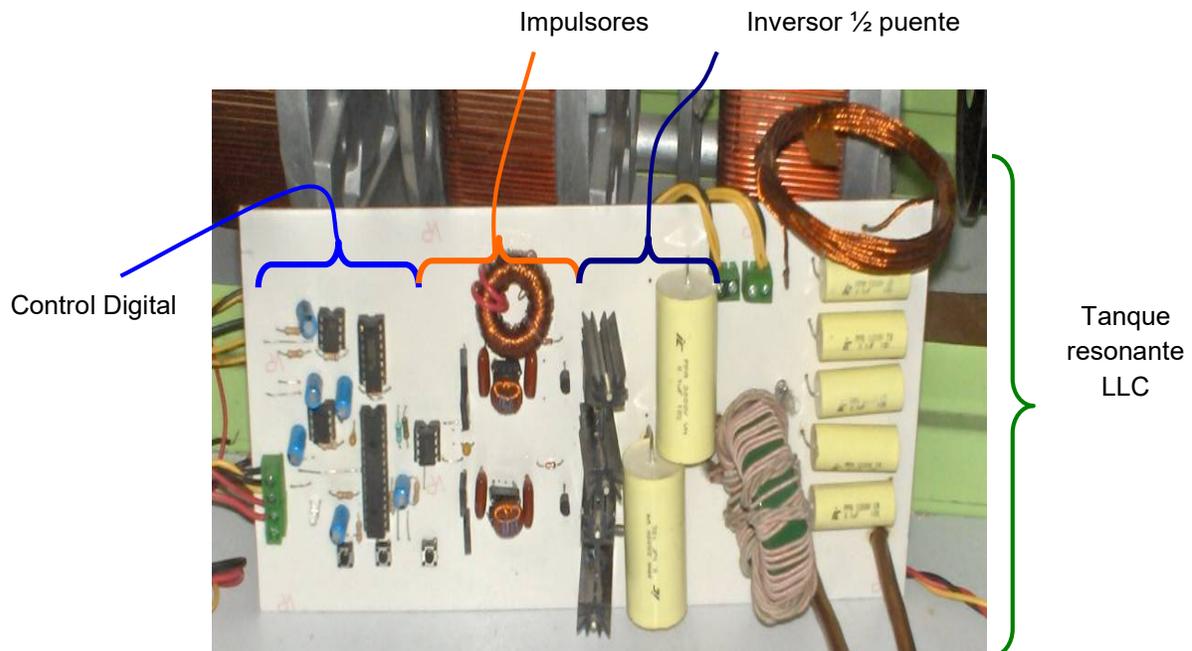


Fig. 10. Prototipo del sistema de calentamiento.

En Fig. 11, se muestra una pieza de acero al carbón que es sometida a calentamiento para determinar la temperatura de Curie, en la cual pierde sus propiedades magnéticas. Se alcanza una temperatura de 500 °C en el exterior de la pieza en 4 minutos



Fig. 11. Pieza de acero al carbón a una temperatura de 500 °C.

En Fig. 12 se muestran las señales de voltaje de salida del inversor (cuadrada) y del voltaje del capacitor del tanque resonante (senoidal) cuando se inhabilita el control,

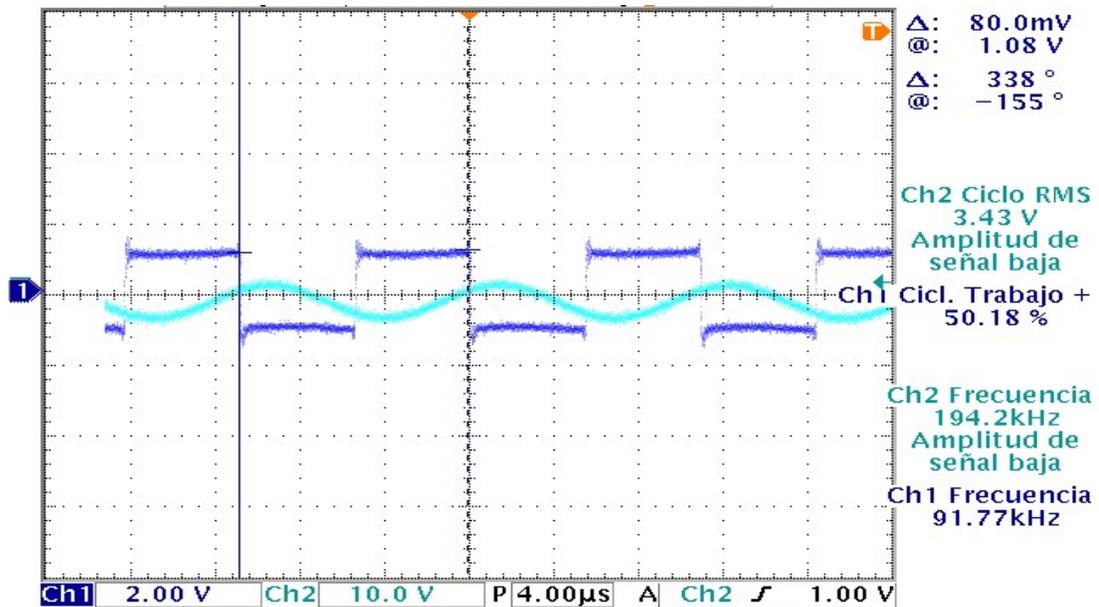


Fig. 12. Respuesta del sistema ante la inhabilitación del control de fase.

Con el control habilitado, se logra un defasamiento (θ) cerca de 90° entre dichos voltajes, para transferir la máxima potencia a la carga, como se muestra en Fig. 13.

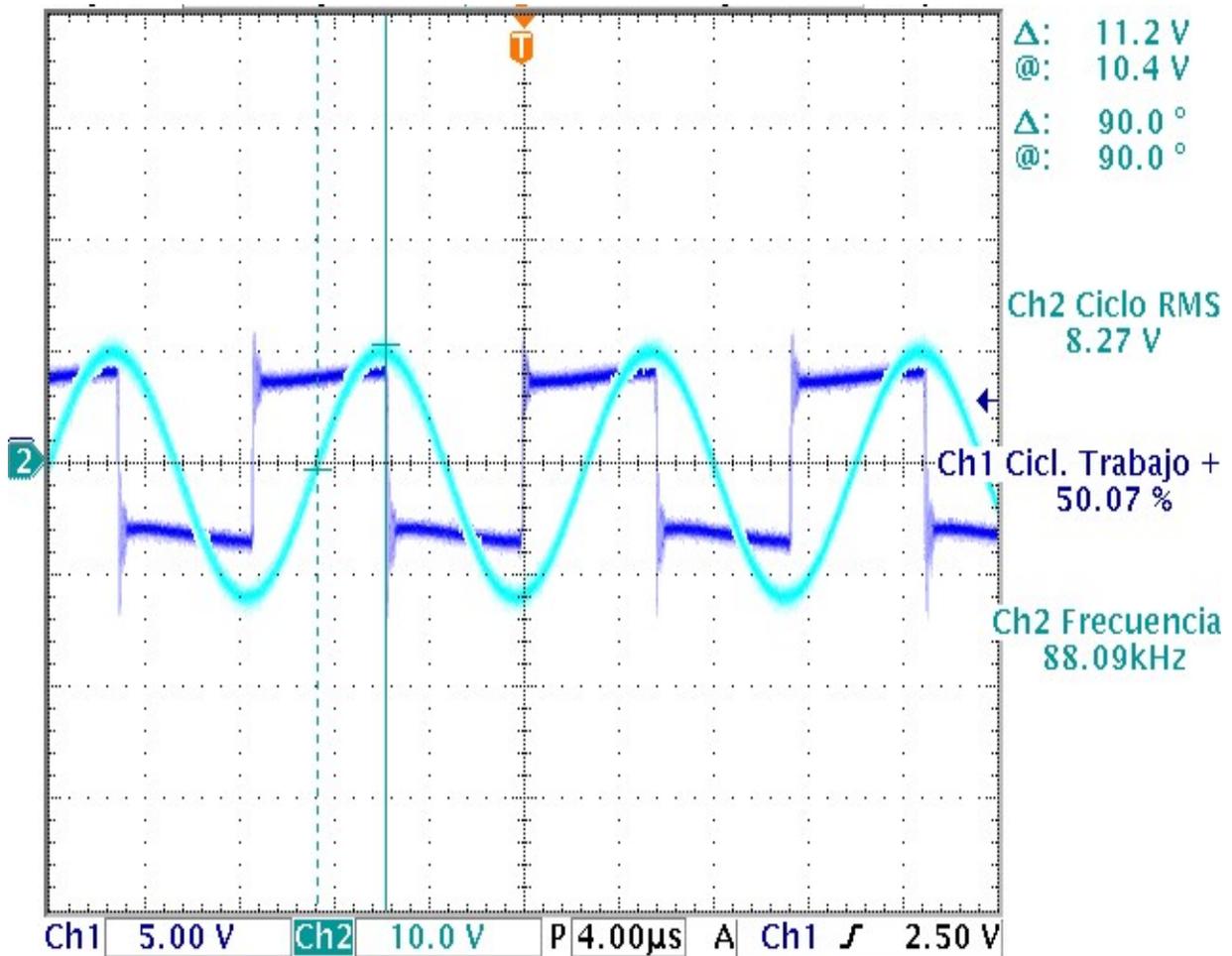


Fig. 13. Respuesta del θ ante una carga con permeabilidad alta.

En Fig. 14 se muestra la interfaz gráfica de usuario en donde se puede monitorear la respuesta transitoria del calentamiento, las variaciones de la temperatura respecto al tiempo cuando se alcanza la temperatura máxima (estado estable), el tiempo de enfriamiento y el registro histórico de las pruebas realizadas. El termopar se colocó en el exterior de la pieza de la Fig. 11

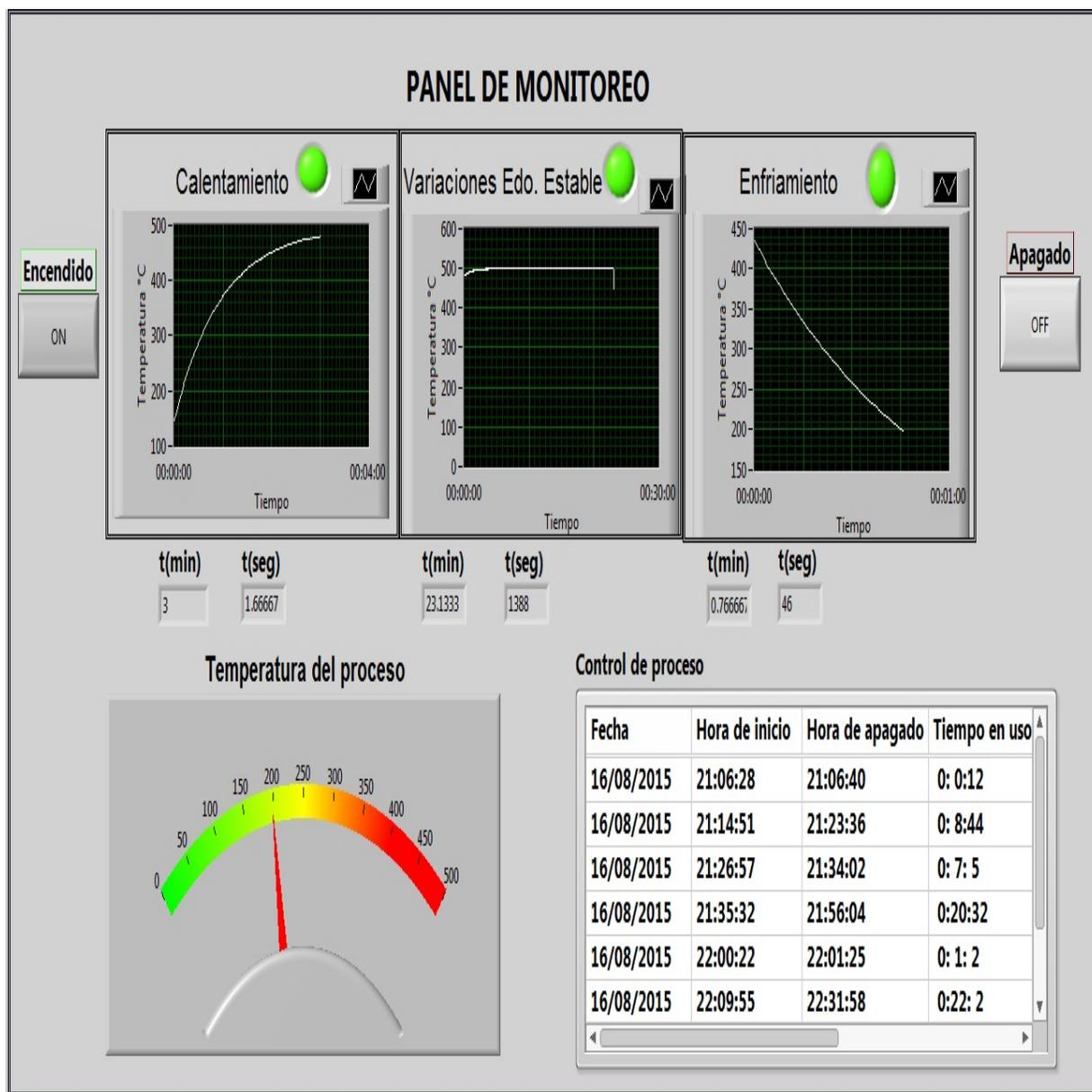


Fig. 14. Interfaz gráfica de usuario para el monitoreo de la temperatura.

4. Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos, las estrategias que permiten elevar rápidamente la temperatura en el material consisten en: Utilizar un material ferromagnético, trabajar con una frecuencia alta y una potencia baja y sintonizar el

tanque resonante en la frecuencia de resonancia donde se transfiera la máxima potencia a la carga.

Se redujo considerablemente la circuitería al emplear un microcontrolador de propósito específico para el control de convertidores de potencia ya que cuenta con módulos de propósito específico, entre los que se encuentran los convertidores Analógico o-Digital, los módulos PWM y además con la capacidad de realizar operaciones matemáticas en un ciclo de instrucción.

Por otro lado, es necesario determinar la eficiencia de otras configuraciones de tanques resonantes comparadas con la LLC y métodos de control que utilicen como referencia la potencia en el tanque resonante [13 y 14]

5. Conclusiones

El sistema de calentamiento por inducción electromagnética que se diseñó es una buena alternativa para sustituir a los sistemas de calentamiento tradicionales utilizados en los laboratorios de Físico – Química basados en resistencias; Ya que permite alcanzar temperaturas en el orden de los cientos de grados centígrados en tiempos muy cortos.

Con el tanque resonante LLC se obtuvo el nivel de corriente necesario en la bobina de calentamiento, debido a la terminación paralela en su configuración. La estrategia de control por variación de frecuencia, implementada en el microcontrolador “dsPIC”, mantuvo el desfase entre los voltajes del capacitor y del inversor cerca de los 90° ante un cambio de carga. Permitiendo de este modo transferir la máxima potencia a la carga. Las prestaciones del convertidor desarrollado satisfacen los requerimientos de los experimentos realizados en los laboratorios de Físico-Química del ITSUR sin necesidad de adquirir equipo importado.

6. Referencias

- [1] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, "Handbook of Induction Heating". 2003.
- [2] V. Rudnev, "A fresh look at induction heating of tubular products: Part 1". Heat treating progress. July-August 2004.
- [3] V. Esteve, "Influencia de los componentes parásitos en el análisis y diseño de inversores resonantes paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción". Tesis doctoral, Universidad de Valencia. Junio 1999.
- [4] S. Dieckerhoff, M. Ryan, R. Doncke, "Design of an IGBT based LCL-resonant inverter for high-frequency induction heating". Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference record of the 1999 IEEE. Vol. 3. 1999. 2039 – 2045 pp.
- [5] A. Kelemen, N. Kutasi, "Induction-heating voltage inverter with hybrid LLC resonant load, the D-Q model". Pollack Periodica. June 2007. 27-37 pp.
- [6] Y. Wenxu J. Zhicheng L. Xianling, "Power Control for Induction Heating by Asymmetrical Pulse Density Modulation". Industrial Electronics and Applications, 1ST IEEE Conference. 2006. 1-5 pp.
- [7] E. J. Dede, J. M. Espi, J. Jordh, A. Ferreres, "Design considerations for transformerless series resonant inverters for induction heating". IEEE Power Electronics and Drive Systems (PEDS). Singapore. May 1997. 334-339 pp.
- [8] E. J. Dede, J. M. Espi, R. Garcia, A. Ferreres, "Steady-state frequency analysis of the LLC resonant inverter for induction heating". Power Electronics Congress. Technical Proceedings. CIEP '96., V IEEE International. 1996. 22-28 pp.
- [9] D. Maksimovic, R. Zane, R. Erickson, "Impact of digital control in power electronics". Proceedings of 2004 International symposium on power semiconductor devices & ICs, Kitakyushu.

- [10] V. White Robert, "Digital control concepts for power supply engineers". Third Annual Digital Power Forum. USA. 2006.
- [11] Roland E. Best, "Phase locked loops". 4th edition. 1999. McGraw Hill.
- [12] L. Cleary, "Diseño y construcción de un inversor resonante para horno de inducción". Tesis maestría. Instituto Tecnológico de Morelia. 2007.
- [13] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, J. M. Burdio, "Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges". *Industrial Electronics, IEEE*. Vol. 61. No, 5. October 2013. 2509 – 2520 pp.
- [14] O. Jimenez, I. Urriza, L.A. Barragan, "Power Measurement for Resonant Power Converters Applied to Induction Heating Applications". *Power Electronics, IEEE*. Vol. 29. No. 12. February 2014. 6779 – 6788 pp.

7. Autores

M. en C. Julio Ortega Alejos. Obtuvo su título como Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya, actualmente se desempeña como profesor investigador en la coordinación de ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato.

M. en C. Leonel Estrada Rojo. Obtuvo su título como Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya, actualmente se desempeñan como profesor investigador en la coordinación de ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato.

Dr. Carlos A. Fuentes Hernández. Obtuvo el grado Doctor en Ciencias de Óptica Física en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada B.C. Actualmente se desempeña como profesor investigador en el Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato.

Dr. Elías J. J. Rodríguez Segura. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1, Actualmente se desempeña como profesor investigador de tiempo completo del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya.

Israel Álvarez Ariza, José Jesús Arizaga Ibarra, Diego Díaz López. Estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, con especialidad en Automatización de Empresas.