

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Tecnura

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/issue/view/650>DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a12>

INVESTIGACIÓN

Study and design of electrical source for applications of spark erosion

Estudio y diseño de fuente eléctrica para aplicaciones de electroerosión

Jhon Jairo Bazurto Quintero¹, Fredy Hernán Martínez Sarmiento²**Fecha de recepción:** Agosto 28 de 2015**Fecha de aceptación:** Septiembre 25 de 2015**Como citar:** Bazurto, J., & Martínez, F.H. (2015). Estudio y diseño de fuente eléctrica para aplicaciones de electroerosión. *Revista Tecnura*, 19 (CITIE), 99-106. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a12>

Resumen

Este artículo propone como solución para el mecanizado de materiales metálicos, una fuente eléctrica resonante, la cual se emplea en el proceso denominado mecanizado por descarga eléctrica (EDM). La fuente se compone de tres etapas: una de alimentación DC, un inversor resonante y un circuito eléctrico que emula la descarga eléctrica en el dieléctrico. La investigación se centra inicialmente en un análisis que orienta el diseño de las diferentes ventajas y desventajas de tres topologías inversoras de potencia que es posible que se utilicen en éste tipo de aplicaciones: el inversor resonante en puente completo, en medio puente y el inversor resonante clase E. Como resultado final, se obtiene una fuente eléctrica bipolar, con protección inherente en condiciones de corto circuito, y con capacidad de operar en lazo abierto. El incremento en eficiencia se genera por medio de conmutación a voltaje y corriente cero. El diseño permite la conexión de varios módulos en paralelo para incrementar la corriente de salida y aumentar el margen de aplicación a diferentes niveles de desbaste. Para comprobar los resultados obtenidos y como herramienta de ayuda se utiliza el programa ATP/EMTP. **Palabras clave:** Descarga eléctrica, dieléctrico, eficiencia, electroerosión, inversor resonante.

Abstrac

This paper proposes a resonant electrical source as solution for the machining of metallic materials, which is used in the process called electrical discharge machining (EDM). The source is structured in three stages: a DC source, a resonant inverter and an electrical circuit that emulates the shock in the dielectric. The investigation focuses initially on an analysis that orients the design of the different advantages and disadvantages of three power inverting topologies, which may be used in such applications: the full bridge resonant inverter, half bridge and the class E resonant inverter. As a result, gets a bipolar source, with inherent protection under short circuit, and ability to operate in open loop. The increase in efficiency is generated by a voltage switching and zero current. The design allows the connection of several modules in parallel to increase the output current and increasing the scope of application to different levels of roughing. To check the results, and as an aid the ATP/EMTP program is used.

Keywords: EDM, efficiency, electric shock, dielectric, resonant inverter.

¹ Tecnólogo en Electricidad, Ingeniero Eléctrico, Jefe de Mantenimiento Alkosto y Ktronix, Bogotá D.C., Colombia. Contact: jhon.bazurto@colcomercio.com.co.

² Ingeniero Electricista, Especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería, Ph.D(c) en Ingeniería Sistemas y Computación, Profesor en Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: fhmartinez@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

Los sectores automotriz, aeronáutico, electrónico, médico y doméstico, utilizan el mecanizado por descargas eléctricas o electroerosión para construir piezas metálicas con formas complejas, cortes finos y bajos niveles de rugosidad (Castillo, 2007). Hoy en día se siguen utilizando fuentes eléctricas convencionales para la electroerosión, las cuales presentan bajas eficiencias de funcionamiento y son de gran tamaño y peso (Garzón, 2009). De acuerdo con Gutiérrez (2012) estas fuentes se componen de un circuito RC, el cual genera una descarga eléctrica a través de un dieléctrico líquido por medio de dos electrodos. Hoy en día la industria exige altos niveles de eficiencia en el proceso de mecanizado de metales, además de bajos niveles de rugosidad y un reducido espacio, lo cual no se ha satisfecho (Camprubi, 2007).

Esta investigación propone el uso de una fuente de alimentación de tres etapas de conversión. La primera la compone una fuente DC (Rashid, 2004), cuya función es alimentar potencia DC a todo el convertidor, posteriormente se encuentra el inversor resonante (Rashid, 2004), el cual genera una señal sinusoidal. Para la selección de la topología de éste circuito, se realizó un análisis de desempeño de diferentes arquitecturas para el caso específico de electroerosión. Por último se emplea un circuito que emula la descarga eléctrica a través de un dieléctrico líquido puro (Landinez, 2008).

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS INVERSORES RESONANTES

Para realizar el análisis comparativo de los inversores resonantes se determinó el comportamiento al variar la carga para cada topología, además del estudio de la respuesta en frecuencia. Las topologías se diseñaron bajo las mismas condiciones de operación: $P_o = 350 \text{ W}$, voltaje en la carga = $160 \text{ V}_{\text{rms}}$, $f = 250 \text{ kHz}$ y la resistencia de conducción del transistor de $40 \text{ m}\Omega$. Además, se empleó el programa ATP/EMTP, donde se construyó un modelo

eléctrico del transistor (Plata, 2008), el cual se ilustra en la figura 1.

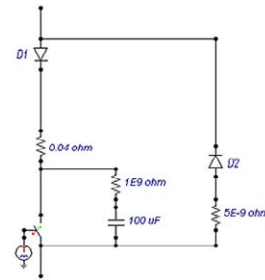


Figura 1. Modelo eléctrico de un transistor de potencia MOSFET.

Fuente: Plata, 2008.

Análisis del inversor resonante en medio puente

El inversor resonante en medio puente propuesto, utiliza un circuito tanque denominado LC paralelo, el cual se encarga de generar la señal sinusoidal a la salida, a partir de una onda cuadrada a su entrada (Rashid, 2004). Las condiciones de diseño del circuito son: $V_{in} = 169.705 \text{ V}$, $V_{o_{\text{rms}}} = 160 \text{ V}_{\text{rms}}$, $f = 250 \text{ kHz}$ y $P_o = 350 \text{ W}$. El voltaje a la entrada de la red LCR es $V_{ab} = 85 \text{ V}$. Para estos valores se definió: $R = 73,142 \Omega$, $L = 22,29 \mu\text{H}$ y $C = 18,2 \text{ nF}$ (Urioste, 2010). Se realizó un análisis de la eficiencia obtenida al variar la carga dinámica, en este caso una resistencia (figura 2).

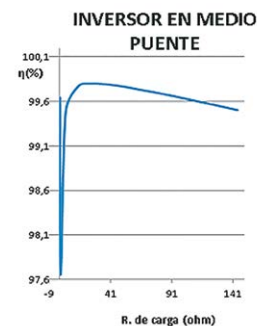


Figura 2. Eficiencia, en función de la resistencia de carga, para el inversor resonante en medio puente.

Fuente: Elaboración propia.

De la figura 2, el punto donde se genera la mayor eficiencia esta alrededor de los 35Ω , luego la eficiencia disminuye levemente al aumentar la carga. Esto significa que esta topología es adecuada para aplicaciones con cargas dinámicas. La respuesta en frecuencia del inversor para siete tipos de factores de calidad (Alonso, 1999) en función de la frecuencia angular normalizada (Urioste, 2010) se presenta en la figura 3.

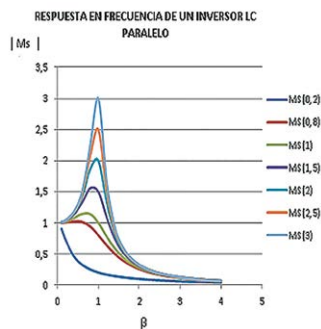


Figura 3. Respuesta en frecuencia de la magnitud de tensión de salida con respecto de la de entrada en un inversor resonante LC paralelo.

Fuente: elaboración propia.

El mismo valor del factor de calidad equivale a la ganancia de tensión de salida, por lo que este inversor es apto para aplicaciones que requieran elevadas tensiones en la carga. Sin embargo, esta topología no se encuentra protegida frente a condiciones de circuito abierto.

Análisis de inversor resonante en puente completo

Esta topología emplea el doble de interruptores en comparación con el inversor resonante en medio puente, y maneja elevadas potencias (mayores a 750 W) (Eirea, 2009). Los transistores del inversor analizado generan una onda de tensión cuadrada, con un valor igual al pico de la fuente que alimenta el inversor resonante. Como complemento se emplea un circuito tanque LCC (Urioste, 2010), el cual

genera una onda sinusoidal a la salida. Para las mismas condiciones de operación se calcula un circuito equivalente como sugiere Correa (2004). Los valores de prueba son: $L_R = 0,424 \text{ mH}$, $R_{eq} = 66,702 \Omega$, $C_s = 0,985 \text{ nF}$, y $C_e = 30,73 \text{ nF}$. Dichos cálculos se corroboraron en el programa ATP/EMTP. La curva de eficiencia del convertidor se muestra en la figura 4. Se observa que con valores de carga inferiores a 140Ω se generan bajas eficiencias, mientras que cuando se superan los 140Ω en la carga, aumenta la eficiencia drásticamente (mayor al 95 %).

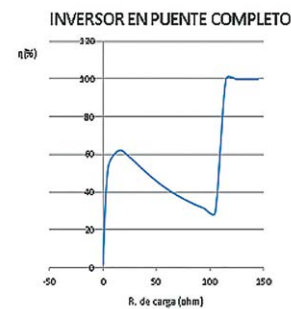


Figura 4. Eficiencia en función de la carga, para un inversor resonante en puente completo.

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de la respuesta en frecuencia a partir de (Urioste, 2010), se tiene en cuenta la frecuencia angular normalizada (figura 5).

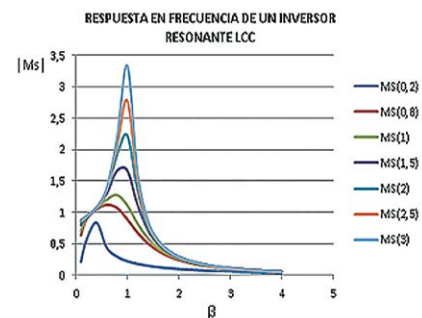


Figura 5. Respuesta en frecuencia de la magnitud de tensión de salida con respecto de la de entrada, en un inversor resonante LCC.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 5, se obtienen elevadas ganancias de tensión al aumentar el factor de calidad y bajas ganancias de tensión al disminuir dicho factor de calidad (Alonso, 1999). Por ello, esta topología es apta para cualquier valor de tensión que se requiera en la carga, no estando protegida ante condiciones de circuito abierto.

Análisis del inversor resonante clase E

Esta topología se caracteriza por funcionar a medianas potencias (menores a 750 W) (Kaczmarczyk, 2005). Además de poseer una estructura muy sencilla (solo un transistor) puede operar ya sea en conmutación a voltaje cero o a corriente cero (Lagunas, 2007), generando eficiencias superiores al 95%. Para el diseño del inversor resonante clase E, se emplea un conjunto de ecuaciones (Laquidara, 2008) que garantizan la máxima eficiencia de la topología. Los parámetros del circuito para las mismas condiciones de operación son: $R = 45,186 \Omega$, $L = 0,29 \text{ mH}$, $C = 1,6 \text{ nF}$, $L_e = 2,88 \text{ mH}$ y $C_e = 2,793 \text{ nF}$. La eficiencia de este inversor en función de la carga simulada en ATP/EMTP se muestra en la figura 6.

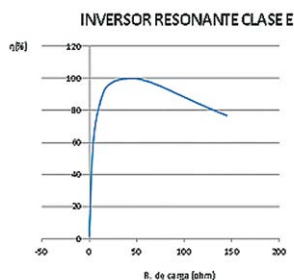


Figura 6. Eficiencia en función de la carga, para un inversor resonante clase E.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa existe un intervalo de cargas alrededor de 40Ω en donde se produce la máxima eficiencia, superior al 97%. Por el contrario cuando aumenta la carga, disminuye progresivamente la eficiencia. Es de aclarar que para aplicaciones

con cargas dinámicas se debe condicionar que la carga varíe en el intervalo que ofrece la mayor eficiencia. Por otra parte debido a que la onda sinusoidal que genera el inversor resonante clase E se origina a través de transitorios, no es viable el realizar un análisis de la respuesta en frecuencia para cada modo de funcionamiento de dicho inversor.

Resultados del análisis comparativo de los inversores resonantes

Teniendo en cuenta el análisis de la eficiencia de las tres topologías estudiadas, se observa que estas pueden funcionar en un determinado intervalo de cargas que generan elevadas eficiencias. El inversor resonante clase E se caracteriza por ser la estructura más sencilla, además de ofrecer elevadas eficiencias de funcionamiento, funcionar como una fuente de corriente y ser la estructura más económica por utilizar la menor cantidad de elementos en su estructura (mayor eficiencia en conducción y esquema de control más simple). Por ello es la topología seleccionada para implementar la fuente eléctrica. En el diseño propuesto esta topología se diseñó para que conmute a voltaje cero (sin pérdidas en el encendido del interruptor) (Martínez, 2004), y a corriente cero (sin pérdidas en el apagado del interruptor), además de la conexión de dos módulos en paralelo para así elevar los niveles de desgaste en la pieza a mecanizar (Casanueva, 2004).

METODOLOGÍA Y DISEÑO

Diseño de la fuente de tensión

Para alimentar las etapas que conforman la fuente para la electroerosión propuesta, con una señal de tensión DC, que contenga un bajo rizado y que dicha señal no varíe con la presencia de cargas dinámicas, se optó por diseñar la topología mostrada en la figura 7.

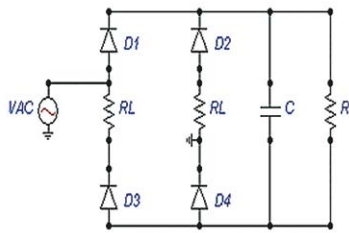


Figura 7. Estructura eléctrica de la fuente de tensión empleada, para alimentar el inversor resonante clase E.

Fuente: Elaboración propia.

Esta fuente se compone de un rectificador de onda completa, un condensador de filtro, y sensores de corriente pasivos (RL) que además facilitan la simulación en ATP/EMTP (Plata, 2008). Las condiciones de diseño son las mismas utilizadas en el análisis de desempeño. Los parámetros del circuitos son: $R = 82,28 \Omega$ y $C = 243,05 \mu\text{F}$.

Modelo para la descarga en un dieléctrico líquido

Con el fin de emular el fenómeno de disrupción a través del dieléctrico líquido puro, se emplea el modelo eléctrico que emula la descarga que se produce a través de un tubo de gas fluorescente (Landinez, 2008; Torres, 2011), ya que en ambos medios el fenómeno es muy similar. Es de aclarar que se utilizó el programa ATP/EMTP ya que es una herramienta poderosa para simular eventos transitorios, como los que ocurren en las descargas eléctricas a través de dieléctricos, además de ser útil para implementar el modelo de la descarga del dieléctrico líquido. Por otra parte cabe resaltar que la tensión de disrupción depende de la distancia entre electrodos y de la temperatura del dieléctrico líquido (Camprubi, 2007).

El modelo eléctrico empleado posee un interruptor controlado por voltaje (Landinez, 2008), el cual se activa con una determinada tensión. Además se usa una resistencia dinámica, la cual posee un elevado valor antes de la disrupción, posterior a ella se presentan bajos valores (figura 8).

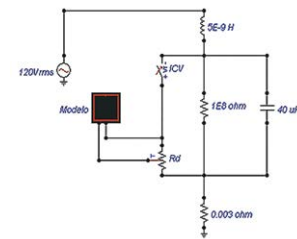


Figura 8. Modelo eléctrico utilizado para emular la descarga eléctrica a través de un dieléctrico líquido puro.

Fuente: elaboración propia.

Existe una capacitancia entre las terminales del modelo de $40 \mu\text{F}$, esta última debe generar una constante de tiempo con la resistencia dinámica, tal que dicha constante sea menor al periodo de la fuente de alimentación, para así poder observar la sobretensión generada. Los valores de inductancia y resistencia de línea corresponden a $5 \times 10^{-9} \text{ H}$ y $0,003 \Omega$, y el valor del aislamiento entre electrodos de $1 \times 10^8 \Omega$. Por último, la resistencia dinámica se controla por programa implementado con la rutina *models* en ATP/EMTP (Landinez, 2008), la cual crea una resistencia no lineal en el tiempo, cuya ecuación es:

$$r(i, d) = \frac{k \times d}{\left(\int_0^t i^2(t) \times dt \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:

- i = corriente sensada [A].
- d = distancia entre electrodos [m].
- k = constante ($k=70, V \times s^{1/2} \times m^{-1}$).

Cabe resaltar que la ecuación anterior responde al modelo propuesto por Rompe Weizel y la constante k , es de carácter empírica

Unificación de las etapas

En la unificación de las etapas se utiliza un transformador de relación 6:1, esto con el fin de aumentar la corriente de desbaste (aproximadamente a 20 A) y con ello alcanzar a generar bajos niveles

de desbaste (corrientes menores a 18 A). En el modelo que emula la descarga a través del dieléctrico líquido puro se empleó una resistencia de $1,14 \Omega$, con lo cual la carga consume 350 W.

Para incrementar los niveles de desbaste, se unen dos módulos idénticos, lográndose generar un poco menos de 700 W en la carga, utilizando además una resistencia de $0,57 \Omega$ en el modelo que emula la descarga a través del dieléctrico, con ello se generan altos niveles de desbaste obteniéndose una corriente en la carga de aproximadamente 44,2 A. Como valor agregado la fuente es de naturaleza bipolar, con ello se disminuye el riesgo de que se presenten fracturas y manchas de colores en la pieza a mecanizar (Casanueva, 2008).

Para evaluar el diseño de la fuente, se implementó en ATP/EMTP el modelo de un transistor MOSFET STY80NM60N (canal N, 600 V, $0,030 \Omega$, 74 A) para la fuente de un módulo, y para la fuente basada en dos módulos un MOSFET 15N65 (canal N, 15 A, 650 V y $0,44 \Omega$). Las figuras 9 a 11 muestran algunos resultados del comportamiento de las señales de voltaje y corriente sobre el modelo del circuito de fuente propuesta simulado en ATP/EMTP.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los siguientes resultados se obtuvieron al diseñar la fuente para la electroerosión definitiva:

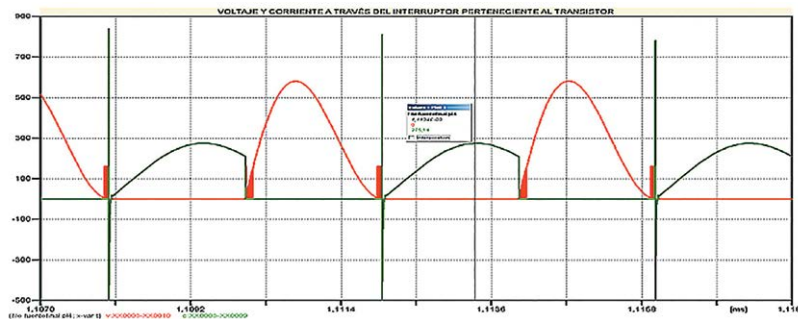


Figura 9. Voltaje (rojo) y corriente (verde) en interruptor, a voltaje y corriente cero para un solo módulo (corriente $\times 50$).

Fuente: Elaboración propia.

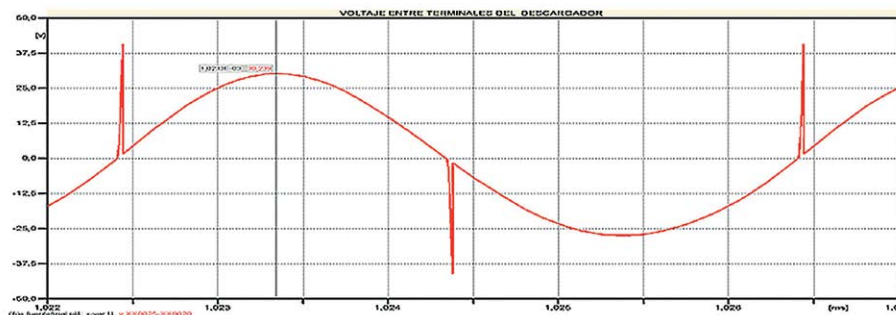


Figura 10. Voltaje entre las terminales del descargador de sobretensión para un sistema de un solo módulo.

Fuente: Elaboración propia.

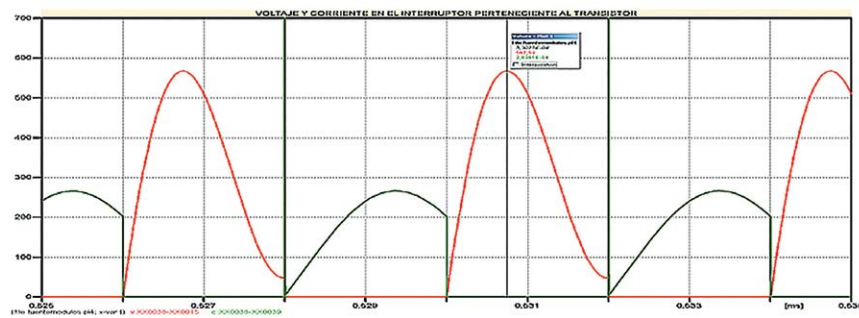


Figura 11. Voltaje (rojo) y corriente (verde) en interruptor, a voltaje y corriente cero para dos módulos (corrientex50).

Fuente: Elaboración propia.

- Se logró el diseño funcional de una fuente pequeña apta para aplicaciones en lugares limitados en espacio, característica no común en las soluciones disponibles actualmente en el mercado.
- La eficiencia total medida sobre el inversor resonante clase E utilizado en el diseño de la fuente para la condiciones de operación definidas fue cercana al 98%, obteniéndose esta al exportar los datos del programa ATP/EMTP a Excel.
- En el sistema con un solo módulo se obtuvo a partir del empleo del simulador, una corriente de salida de 23 A pico, lográndose el comportamiento esperado para operación en bajos niveles de desgaste.
- Con la unión de dos módulos en paralelo se incrementó considerablemente la capacidad de desgaste del sistema, casi duplicando la potencia total.

CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis realizado de la respuesta en frecuencia y el estudio de la eficiencia, para las tres topologías de inversores resonantes, se pudo concluir que la topología más apta para implementar en la fuente para aplicaciones de electroerosión es el inversor resonante clase E. Esta topología ofrece elevadas eficiencias de funcionamiento, y una estructura sencilla en comparación con las demás, y por ende económica. Con este

inversor se evaluaron dos estructuras: un diseño de 350 W, y una configuración en paralelo con dos de estos diseños alcanzando una potencia cercana a los 700 W. En ambos casos los sistemas se caracterizan por un reducido tamaño, peso y volumen, en particular debido al trabajo en alta frecuencia. Además, fue posible emular la descarga eléctrica que ocurre a través de un dieléctrico líquido puro, por medio de un modelo eléctrico.

FINANCIAMIENTO:

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

REFERENCIAS

- Alonso, J. *Inversores resonantes de alta frecuencia, para optar a la plaza de profesor titular de la universidad de Oviedo*. Disponible en Web: <http://pels.edv.uniovi.es/pels/pels/Pdf/Inversores%20Resonantes.pdf>, 15/06/2014. Camprubí, A. *Electroerosión, fundamentos de su física y su técnica*. Barcelona, España: Marcombo ediciones técnicas, 2007.
- Casanueva, R. Brañas, C. "A new bipolar power supply for spark erosion based on a series-parallel resonant inverter". *Dept of electronic technology systems and automation engineering*. 2008. pp 1904-1909.
- Casanueva, R. Brañas, C. "Paralleled LCsCp, resonant converters for spark erosion applications". *Dept of*

- electronicstechnolgy systems and automation engineering*. 2004. pp 516-523.
- Castillo, F. *Lecturas de ingeniería 4: electroerosión*. Disponible en: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m2/electroerosion.pdf, 13/11/2014.
- Correa, J. *estrategias de control en lámparas de alta presión para la eliminación de resonancias acústicas*. (Tesis doctoral). Mexico: Cenidet, 2004.
- Eirea, G. *Modelado y control de convertidores electrónicos de potencia, estrategias de modulación y control*. Disponible en Web: <http://www.fing.edu.uy/ii/ense/assign/modelpot/diap/t01.pdf>, 20/07/2014.
- Garzón, M. *Avances de la electroerosión para moldes de inyección*. Disponible en Web: http://www.metalactual.com/revista/31/procesos_electroerosion.pdf, 8/08/2014.
- Introducción a la electroerosión*. Disponible en Web: <http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/mi-pagina/downloads/electroerosionnamio.pdf>, 4/01/2014.
- Lagunas, T. *simulación y desarrollo experimental del amplificador clase E conmutado a voltaje cero, considerando los elementos parásitos del interruptor*. (Tesis pregrado). Huajuapán de León. México: Universidad Tecnológica de Mixteca. 2005.
- Landinez, C. *Modelamiento de protecciones utilizando ATP*. Bogotá. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- Laquidara, A. *Amplificador clase E*. Disponible en Web: <http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/electronicos2/download/Laboratorios/Lab6-AmpliAltoRen.pdf>, 25/06/2014.
- Martínez, F.H. "Estudio de eficiencia en los MOSFET e IGBT para su utilización en convertidores de potencia conmutados". *Tecnura*. No 15. Diciembre. 2004. pp. 85-96.
- Plata, A. Tacca, E. *Modelado y simulación en electrónica de potencia con atp*. Bogotá. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- Rashid, M. *Electrónica de potencia, circuitos dispositivos y aplicaciones*. 3 ed. Ciudad de México. México: Prentice hall, 2004.
- Torres, H. *Aislamientos eléctricos*. Bogotá. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- Urioste, R. *Electrónica de potencia*. Disponible en Web: <http://tec.upc.es/ep/invres.pdf>, 5/05/2014.
- Kaczmarczyk, Z. "A high efficiency class E inverter computer model, laboratory measurements and SPICE simulation". *Bulletin of the polish academy of sciences*. vol 55, No 4. Agosto.2007. pp 411-417.

