



Estudio del empleo de inversores resonantes de alta frecuencia en la recuperación de fuentes de soldadura

Jorge Luis Portal
Francisco Eneldo López
Mario Morera

Lesyani León
Alain Amador

Recibido: Junio del 2008
Aprobado: Septiembre del 2008

Resumen/ Abstract

En este artículo, se realizará un análisis pormenorizado de la evolución de las fuentes de soldadura en su última etapa, para plantear las previsiones futuras que se esperan en este campo que tanta importancia tiene en la actualidad. Por otra parte, y teniendo en cuenta los nuevos requerimientos de eficiencia y fiabilidad que se les exige a las fuentes de soldadura, es preciso analizar si la tecnología de fabricación de estas fuentes se encuentra tan madura como se dice o es preciso impulsarla más en algunos aspectos concretos de la misma.

Palabras claves: inversores de potencia, fuentes inversoras de potencia, fuentes de soldadura inversoras

In this article, it will be carried out an itemized analysis of the welding sources evolution in their last stage, to outline the future forecasts that are expected in this field that so much importance has at the present time. On the other hand, and keeping in mind the new requirements of efficiency and reliability that are demanded to the welding sources, is necessary to analyze if the technology of production of these sources is as mature as it is said or it is necessary to impel it more in some concrete aspects of the same one.

Key words : power inverters, power inverter sources, welding inverters sources

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las comunidades científicas e industriales se enfrentan a la difícil tarea de armonizar el desarrollo económico y la protección del medio ambiente, con el objeto de asegurar el bienestar y mejorar la calidad de vida de las generaciones futuras. El mercado de las fuentes de soldadura de mayor eficiencia, construidos con nuevos materiales, y convertidores electrónicos no es ajeno a estos cambios, y por ello responde, ahora más que

nunca, no sólo a la necesidad de resolver aspectos primordiales de automatización sino que, apoyándose en nuevas tecnologías, contempla además la calidad de onda y el ahorro energético como respuesta a la utilización más racional y eficiente de los recursos naturales. El ahorro de energía es un tema de actualidad que debe preocupar a todos por estar directamente relacionado con el medioambiente, y que obliga a adoptar políticas energéticas acordes con los nuevos tiempos.

Estas políticas afectan directamente a los rendimientos mínimos que han de tener las fuentes de soldadura en correspondencia con sus características constructivas y su rango de potencia.

En las fuentes de soldadura inversoras se reduce el peso y se eleva la eficiencia en el proceso de conversión de energía contribuyendo a eliminar los defectos en las uniones soldadas, según American Welding Society [1].

La función de un inversor consiste en la generación de una onda de corriente alterna de una determinada magnitud y frecuencia, a partir de una fuente de corriente directa, como se muestra en la figura 1.

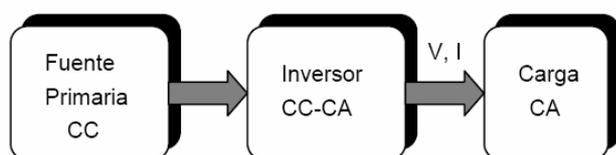


Fig.1. Esquema básico de una fuente inversora.

Para mejorar la calidad de la forma de onda de salida tradicionalmente se han empleado métodos de modulación del ancho del pulso (PWM), los cuales demandan una alta frecuencia de conmutación de los elementos de potencia, esto hace que las pérdidas de activación y desactivación representen un % significativo de las pérdidas totales, según Hart [3].

En los inversores PWM para reducir las pérdidas de conmutación no se puede incrementar la frecuencia de conmutación por encima de cierto valor mientras que con las técnicas resonantes se puede lograr una conmutación a corriente cero o voltaje cero, de acuerdo a la aplicación.

Los inversores resonantes de alta frecuencia, y especialmente aquellos cuya fuente primaria de alimentación corresponde a una fuente de tensión, generan, según Muhammad [4], una onda de tensión cuadrada o cuasi-cuadrada de alta frecuencia, que posteriormente es filtrada por medio de un circuito tanque resonante para obtener una onda de alta frecuencia con bajo contenido en armónicos.

Existen distintas configuraciones que permiten conmutar a corriente o tensión cero, mediante un circuito resonante LC, según Rodríguez [5], por lo que pueden operar a frecuencias por encima de 20 kHz.

FUENTES DE SOLDADURA INVERSORAS CON ESTRATEGIA DE CONMUTACION RESONANTE

En la soldadura por arco eléctrico la energía de fusión es proporcionada por medio de un arco eléctrico entre dos electrodos, uno de los cuales es la pieza metálica a soldar, según American Welding Society [1].

En las fuentes de soldadura los sistemas tradicionales emplean un transformador de baja frecuencia seguido de un puente de tiristores y una bobina de valor elevado para disminuir el rizado de la corriente del arco. El empleo de un inversor resonante seguido de un transformador de alta frecuencia, rectificador y bobina de alta frecuencia permite tanto reducir el tamaño y peso del equipo como aumentar su eficiencia. En estos equipos se obtienen eficiencias del orden del 90 % según Ferreira, and Roux, [2] y Malesani and et al, [6].

Las fuentes inversoras se caracterizan básicamente por la calidad de su onda de salida, que en general puede ser una tensión o una corriente. Cuanto menor sea el contenido en armónicos de la onda de salida más próxima será ésta a una onda senoidal pura. En este sentido se definen los parámetros siguientes:

Distorsión del armónico n:

$$D_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (1)$$

Donde:

V_n y V_1 representan el valor eficaz del armónico de orden n y el valor de la onda fundamental respectivamente.

Distorsión armónica total:

$$THD (\%) = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2 + \dots}}{V_1} \cdot 100 \quad (2)$$

Los armónicos de orden superior tienen un peso menos significativo en la onda de

salida de los inversores por lo tanto son más fáciles de filtrar.

En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques de un inversor resonante, tanto para el caso de alimentación en tensión (figura 2.a) como para el caso de alimentación en corriente (figura 2.b). Como se observa está formado por cinco etapas fundamentales:

- Fuente primaria de corriente continua
- Inversor estático de alta frecuencia
- Circuito resonante
- Transformador de alta frecuencia
- Circuito de gobierno y control

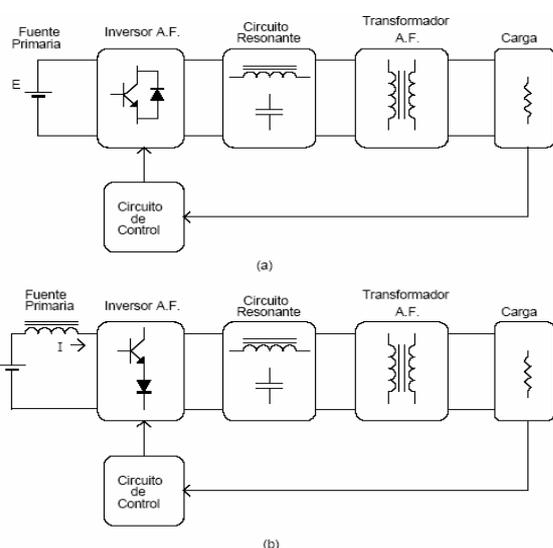


Fig. 2. Diagrama de bloques de un inversor resonante: (a) Alimentado en tensión y (b) alimentado en corriente.

FUENTE PRIMARIA DE CORRIENTE CONTINUA

La fuente de alimentación de corriente continua (CC) genera la tensión de entrada del inversor. En principio puede ser una batería ó una etapa de conversión alterna-continua para la alimentación desde la tensión de la red. Esta conversión puede realizarse empleando un rectificador controlado ó mediante un convertidor CC/CC para variar la tensión continua de entrada al inversor, como se muestra en la figura 3.

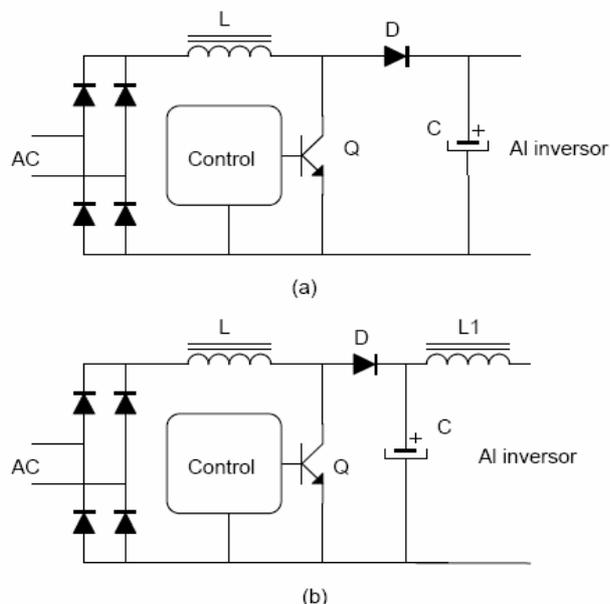


Fig.3. Alimentación de un inversor resonante: (a) alimentado en tensión y (b) alimentado en corriente.

INVERSOR ESTÁTICO DE ALTA FRECUENCIA

El inversor de alta frecuencia emplea interruptores formados por transistores y diodos para producir una onda de tensión o corriente de alta frecuencia. Los interruptores empleados deben ser bidireccionales en corriente en el caso de inversores alimentados en tensión y unidireccionales en corriente en el caso de inversores alimentados en corriente, tal como se representa en el diagrama de bloques de la figura 2. Estos interruptores manejan la corriente ó tensión de entrada del circuito tanque por lo que estas formas de onda serán un parámetro fundamental a la hora de calcular las pérdidas en los mismos.

CIRCUITO RESONANTE

El objetivo del circuito tanque resonante es filtrar la onda de salida del inversor de forma que las ondas de tensión y corriente en la carga sean prácticamente senoidales. El circuito tanque debe suministrar la corriente y tensión necesaria para la carga en régimen permanente, manejando la mínima corriente de entrada posible para así disminuir las pérdidas en los interruptores.

TRANSFORMADOR DE ALTA FRECUENCIA

En ocasiones puede ser necesario el empleo de un transformador de salida por alguna de las razones siguientes:

- Para disponer de aislamiento galvánico entre la entrada y la salida y evitar el peligro de descargas eléctricas a personas o animales. Es el caso típico de los inversores empleados en equipos de soldadura eléctrica.
- La tensión de entrada puede ser demasiado baja o demasiado alta, y es necesario elevarla o reducirla respectivamente para alimentar la carga en régimen permanente.

CIRCUITO DE GOBIERNO Y CONTROL

El circuito de gobierno y control realiza diversas funciones, entre las que cabe destacar las siguientes:

- Generación de las señales de disparo de los interruptores controlados y adaptación al terminal de control de los mismos.
- Regulación de alguna de las variables de control de la carga (tensión, corriente, potencia, etc.).
- Implementación de protecciones (sobretensión, sobrecorriente, fallas en la carga, etc.)

CONMUTACION RESONANTE SERIE

La característica fundamental de un circuito resonante serie formado por una bobina (L) y por un condensador (C), es la de permitir que tanto la tensión como la intensidad que circula por estos dispositivos adopte una evolución oscilante a lo largo del tiempo. Transcurrido el primer semiciclo, la corriente se invierte.

En la figura 4, se muestra un ejemplo de este tipo de circuitos. Como se puede ver, el circuito LC se conecta en serie con un transistor y una carga de valor $R_o \ll 2(L/C)^{1/2}$.

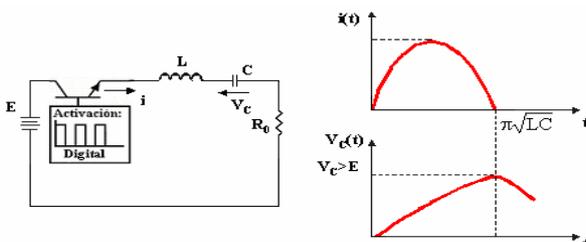


Fig. 4. Circuito de conmutación forzada por circuito resonante serie.

La intensidad que circula por el circuito es la misma que fluye a través de la red LC. Ésta oscilará sinusoidalmente hasta llegar a anularse. Este paso por cero, que se producirá al final del primer semiperiodo de la señal resonante, indica que en ese momento se estará en las condiciones idóneas para provocar la conmutación del transistor.

El modo de operación de este circuito es el que se describe a continuación. Cuando el transistor entra en conducción, la ecuación que define el comportamiento del circuito será:

$$E = R_o i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + V_c(t=0) \quad (3)$$

Resolviendo para:

$$\varepsilon = \frac{R_o}{2L} \quad \omega_r = \sqrt{\omega^2 - \varepsilon^2} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Se obtiene que:

$$0 = A_2 e^{-\varepsilon T_{ON}} \sin \omega_r T_{ON} \Rightarrow T_{ON} = \frac{\pi}{\omega_r} \quad (4)$$

Como puede apreciarse, el tiempo de conducción es un parámetro fijo, definido por los diferentes elementos que configuran el circuito. Por tanto, para controlar la tensión de salida será necesario que el convertidor opere a frecuencia variable.

CONMUTACION RESONANTE PARALELO

El proceso de conmutación por circuito resonante paralelo ayuda a minimizar las variaciones de intensidad asociadas al circuito de conmutación resonante serie.

El circuito representado en la figura 5 presenta el mismo inconveniente que el circuito de conmutación por circuito resonante serie, es decir, el tiempo de conducción (T_{on}) sigue siendo fijo y depende de manera exclusiva de los parámetros del circuito, la única forma de controlar la tensión de salida es variando el instante de disparo.

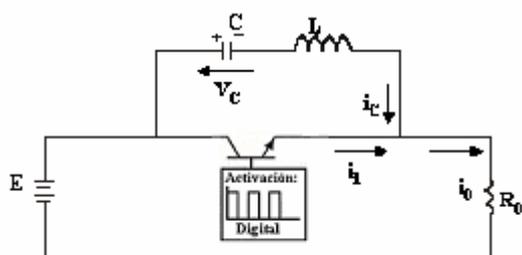


Fig. 5. Circuito de conmutación resonante paralelo.

El valor para T_{on} responde a la siguiente ecuación:

$$T_{on} = \sqrt{LC} \cdot \left(\pi + \arcsen \frac{\sqrt{L}}{R_0} \sqrt{C} \right) \quad (5)$$

Otro inconveniente que se puede añadir a este circuito será la considerable intensidad que circula por el semiconductor, la cual es superior al valor de intensidad que circula a través de la carga.

CONVERTIDORES QUASI-RESONANTES Y MULTI-RESONANTES

Los convertidores quasi-resonantes y multi-resonantes (también llamados de conmutador resonante) son configuraciones convencionales PWM en la que circuitos resonantes asociados a los conmutadores permiten conmutaciones a tensión o corriente cero.

Las configuraciones básicas de los convertidores quasi-resonantes son:

- Conmutación a corriente cero (ZCS): el elemento conmutador realiza la conmutación a corriente cero. El pico de corriente en la resonancia fluye a través del conmutador, pero la tensión en el bloqueo permanece en el mismo valor que en la configuración PWM equivalente.
- Conmutación a tensión cero (ZVS): el elemento conmutador realiza la conmutación a tensión cero. El elemento conmutador debe soportar la tensión de pico de la resonancia en el bloqueo, pero la corriente máxima que

atraviesa el conmutador en la conducción es la misma que en la configuración PWM equivalente.

- Conmutación a tensión cero con limitación de tensión (ZVS-CV): es un caso derivado del anterior que permite la conmutación a tensión cero. Consiste en un convertidor con al menos dos conmutadores. La tensión se mantiene al mismo nivel que en la configuración PWM equivalente, pero la corriente es normalmente mayor.

Los convertidores multi-resonantes permiten trabajar a frecuencias más elevadas que los quasi-resonantes, con condiciones de conmutación favorables para todos los elementos semiconductores.

INVERSOR PUENTE COMPLETO

La configuración del inversor puente completo se muestra en la figura 6. El inversor consiste de dos brazos formados por los transistores: Q1, Q2 y Q3, Q4; los transistores trabajan en conducción o saturación, las parejas de transistores de cada brazo se encienden (ON) y apagan (OFF) simultáneamente. También, los pares se conmutan de tal manera que cuando uno de ellos está en ON, el otro está en OFF: cuando Q1 y Q2 están en ON, Q3 y Q4 están en OFF y viceversa. En la figura también están incluidos los diodos de protección antiparalelos (D1, D2, D3, D4) conectados a los transistores. El uso de estos diodos es muy recomendado puesto que ellos proporcionan un camino a la corriente inversa.

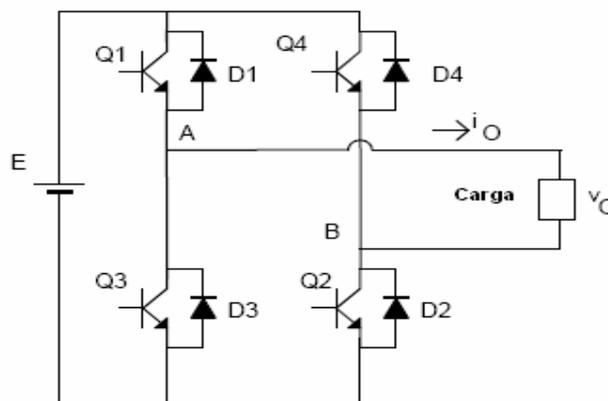


Fig. 6. Circuito inversor puente completo.

En las fuentes de soldadura la corriente inversa no esta presente por ser el arco una carga puramente resistiva. El arco apenas se resiste al flujo de corriente y tiene componentes reactivas bajas. En el proceso de soldadura hay que tomar en consideración la componente inductiva introducida por los conductores que conectan el inversor al electrodo y a la pieza de trabajo (la inductancia es proporcional a la longitud del cable). Así, un inductor en serie con el arco forma un modelo más exacto de la carga como se muestra en la figura 7. Cuando un par de transistores están en ON y la corriente "IL" fluye a través de la carga, la energía es almacenada en la inductancia dispersa de los alambres. Cuando el inversor conmuta, la corriente "IL" cambia la dirección, pero la inductancia rechaza este cambio súbito e impulsa la corriente inversa. Si los diodos de protección no estuvieran presentes, esta corriente causaría operación indeseable de los transistores.

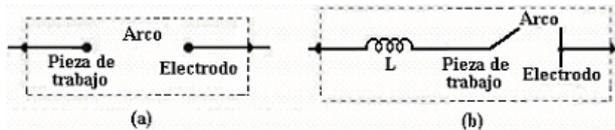


Fig.7. Modelos de la carga en fuentes de soldadura.

Todos los transistores no deben estar apagados a la vez durante la conmutación, ya que la fuente de potencia que alimenta al inversor proporciona corriente continuamente. Un par de transistores debe conmutar a ON un tiempo antes que el otro par pase a OFF; el tiempo "t" depende de los tiempos de encendido y apagado asociados a los dispositivos (normalmente es algunos centenas de nanosegundos).

Como resultado, durante un corto tiempo, la conducción de corriente tiene lugar a través de los brazos y los transistores deben resistirla. Durante este intervalo de tiempo, el único camino para la corriente inversa es a través de un diodo de libre camino y un transistor; siendo una razón adicional para usar los diodos.

Para reducir la corriente inversa y los efectos adversos de la conducción, la mayoría de los diseñadores usan la aproximación de "conformación" de la forma de onda de la corriente a través de un control apropiado del inversor primario.

Consiste en reducir la magnitud de la corriente de carga a pocos amperes antes del cambio de su polaridad (conmutando los transistores). En este caso, recortes relativamente pequeños evitan picos de voltaje inseguros durante los intervalos en que todos los transistores se mantienen apagados. La corriente conformada permite construir perfiles de corriente muy exactos para perfeccionar el proceso de soldadura.

INVERSOR MEDIO PUENTE

Para el circuito inversor que se muestra en la figura 8. El número de diodos en el rectificador de salida es el doble, con respecto a la configuración puente completo, pero el número de transistores es la mitad. Este circuito normalmente conduce a simplificaciones del sistema y ahorros del costo.

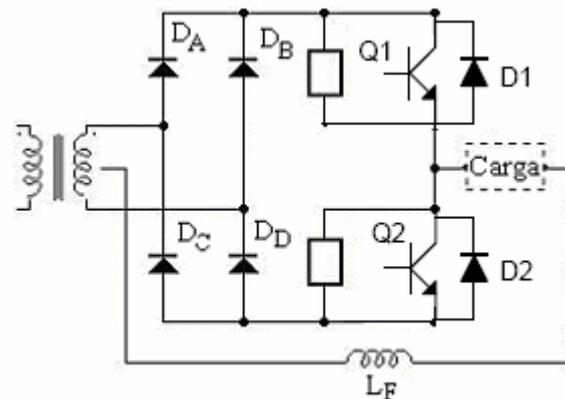


Fig. 8. Circuito simplificado del inversor medio puente a la salida.

Los transistores son conmutados de tal manera que cuando uno de ellos está en ON, el otro está en OFF. Durante el semiciclo positivo, Q1 está en ON y Q2 en OFF, puesto que DA y DB trabajan como rectificador de salida mientras DC y DD están apagados. Durante el medio ciclo negativo es lo contrario, Q2 está en ON y Q1 en OFF, puesto que DC y DD trabajan como rectificador de salida mientras DA y DB están apagados por lo que podemos llegar a las siguientes consideraciones:

- En este circuito, la conducción cruzada debe evitarse correctamente. Q1 y Q2 nunca deben estar en ON al mismo tiempo. Esto se logra conmutando Q2 a ON un tiempo "t" después que Q1 se apaga. Nuevamente, este tiempo "t" depende de los tiempos

de encendido y apagado asociados a los dispositivos.

No hay ninguna corriente de libre camino. D1 y D2 son los diodos de protección que aseguran que VCE siempre esté por debajo del límite de seguridad, en particular durante transitorios de conmutación. Pueden usarse diodos de corriente muy baja, con tal de que ellos sean lo suficientemente rápidos.

- Durante este tiempo, la energía almacenada en la carga y en el filtro inductor LF tiene que ser disipada de algún modo antes que la corriente inversa.

CONCLUSIONES

1. Debido a la mayor frecuencia de conmutación del transistor, el menor rizado de la corriente de salida y la mayor velocidad de respuesta, las fuentes transistorizadas constituyen una mejor opción para influir en el proceso de soldadura.
2. En las fuentes de soldadura inversoras se deben colocar diodos en antiparalelos para la protección de los transistores ya que esta presente el efecto inductivo asociado a los cables de soldadura.
3. Si la forma de onda de la corriente es conformada (se reduce la magnitud de la corriente a pocos amperes antes de cambiar su polaridad) y/o se usa la configuración medio-puente, se pueden usar diodos de menor capacidad. La conformación de la forma de onda de la corriente ayuda a reducir el sobrevoltaje y reduce las pérdidas de conmutación, mejorando la operación durante la conmutación de las fuentes de soldadura inversoras.

REFERENCIAS

- [1] American Welding Society. : "Welding Handbook," Vol. II -Welding Processes-, Part I, 9th Edition, 2004.
- [2] Ferreira, J. A. and J. A. Roux : "A series resonant converter for arc-striking applications". *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Volume: 45, Issue: 4, page(s): 585-592, ISSN: 0278-0046, Aug. 1998.
- [3] Hart, Daniel W .: "Electrónica de Potencia". Editorial: Prentice Hall, 2001.
- [4] Muhammad, H.: *Electrónica de potencia circuitos dispositivos y*

aplicaciones, Editorial Prentice Hall, México, 2004.

[5] Rodríguez., J.: "A new modulation method to reduce common-mode voltages in multilevel inverters," *IEEE Trans. Indus. Electron.*, vol. 51, pp. 834-839, Aug. 2004.

[6] Malesani, L. et al : "Electronic welder with high-frequency resonant inverter", *IEEE IAS'93 conf. proc.*, pp. 1073-1080, 1993.

AUTORES

Jorge Luis Portal Gallardo

Ingeniero Electricista, Master en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar del departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara.

e-mail: jlportal@fie.uclv.edu.cu

Francisco Eneldo López Monteagudo

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular del departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara.

e-mail: eneldol@fie.uclv.edu.cu

Mario Morera Hernández

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, Instituto Superior Politécnico, José Antonio Echeverría, Ciudad de la Habana.

e-mail: mármol@electrica.cujae.edu.cu

Lesyani León Viltres

Ingeniera Electricista, Master en Ingeniería Eléctrica, Profesora Auxiliar del departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara.

e-mail: Lesyani@fie.uclv.edu.cu

Alain Amador León

Ingeniero Electricista, Master en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar del departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara.

e-mail: amador@fie.uclv.edu.cu