

## Prototipo Múltiple para el estudio de convertidores CD-CD

MSc Santana López Enrique, [enrique.santana@reduc.edu.cu](mailto:enrique.santana@reduc.edu.cu)

MSc Rojas Díaz Imandra, [imandra.rojas@reduc.edu.cu](mailto:imandra.rojas@reduc.edu.cu)

Universidad de Camagüey, Facultad Electromecánica, Carrera Ing. Eléctrica, Disciplina Electrónica.

**Resumen**— El problema que motivó este trabajo es la compleja e ineficiente selección y explotación de los convertidores de energía eléctrica que utilizan PWM (modulación por ancho de pulso) por la gran variedad de modelos, marcas, novedades constantes en su circuitería y falta de uniformidad e insuficiencias en la documentación técnica que ofrecen los fabricantes, no contando en nuestros laboratorios con puestos de trabajo que permitan crear habilidades en nuestros estudiantes de Ingeniería Eléctrica, tanto en pregrado como en postgrado, en esa dirección. Nuestro objetivo fue crear nuevos puestos de trabajo e investigación, para lo cual diseñamos y construimos un prototipo múltiple de convertidores reales CD-CD e implementamos dos modelos de simulación, que permiten analizar su funcionamiento, de forma real y virtual, comparando diferentes configuraciones modelos y cargas, lo que esperamos permita enriquecer las habilidades de nuestros actuales y futuros profesionales y les brinde criterios energéticos más precisos y económicamente más acertados para la introducción y el empleo eficiente y racional de este tipo de fuente conmutada.

**palabras claves**—convertidor, fuente conmutada, modulación por ancho de pulso, prototipo.

### I. INTRODUCCION

En los últimos años, la atención de los especialistas en el campo de las transformaciones de la energía eléctrica, ha estado centrada en el mejoramiento de los convertidores de energía eléctrica, nombrados en sus inicios fuentes secundarias de alimentación con entrada sin transformador de la red (FSAST), y en la actualidad más comúnmente fuentes conmutadas, las cuales se construyen sobre la base de inversores de tensión de corriente directa a corriente alterna (CD-CA) y que operan a altas frecuencias.

Aunque estas fuentes fueron creadas por el hombre hace más de 40 años y como las conocemos hoy en día, hace más de 20, su novedad y originalidad constante la impone la industria electrónica con la creación de nuevos componentes cada día mas poderosos en cuanto a capacidad interruptiva y a niveles de integración y está sustentada por una lista inmensa de certificados de autores y patentes a nivel internacional.

Teniendo en cuenta el alto interés hacia las fuentes de este tipo por parte de fabricantes, comercializadores y usuarios de todo el mundo, y el auge, en lo particular, que la introducción de las mismas han experimentado en nuestro país, en el presente trabajo, se profundiza en las características que prevalecen para la proyección de los bloques funcionales de los circuitos de fuerza y los dispositivos de mando y control de las FSAST y cuyo núcleo central, lo constituye el inversor transistorizado CD-CA de alta frecuencia. De igual forma hemos reflejado aquellas cuestiones que consideramos influyen decisivamente en la elevación de la confiabilidad de su funcionamiento, y por ende en la de los equipos que alimenta.

En este material podrá encontrar reflejada, la experiencia acumulada por sus autores en el proceso de investigación científico técnica y en su propio quehacer práctico en la dirección del diseño constructivo, y se ofrecen resultados concretos al respecto.

El **PROBLEMA** que motivó nuestro trabajo es la compleja e ineficiente selección y explotación de los convertidores de energía eléctrica por la gran variedad de modelos, marcas, novedades constantes en su circuitería y falta de uniformidad e insuficiencias en la documentación técnica que ofrecen los fabricantes.

Nuestro **OBJETIVO** es diseñar y construir un prototipo múltiple de convertidores reales para la realización de pruebas y ensayos e implementar dos modelos de simulación que lo complementen virtualmente contribuyendo a que el proceso selección y explotación de los convertidores de energía eléctrica sea más

riguroso, para lo cual, sustentamos la *HIPÓTESIS* de que el diseño y construcción de este prototipo con componentes reales de hace dos décadas, y la simulación, utilizando componentes de tecnología de punta, que permitan analizar su funcionamiento, de forma real y virtual, comparando diferentes configuraciones modelos y cargas, permitirá enriquecer el conocimiento y razonamiento sobre diseño constructivo de nuestros actuales y futuros profesionales y les brindará criterios energéticos, de calidad y de compatibilidad con las cargas que desean alimentar, más precisos y económicamente más acertados para la introducción y el empleo eficiente y racional de los convertidores de energía eléctrica.

Para desarrollar la presente investigación consultamos 48 fuentes bibliográficas desde 4 y 5 décadas atrás, por ej: 5 libros de texto, de 1970 a 1980, que resultan los más antiguos [1], [27], [30], [35], [38], hasta los 4 más actuales, a los que pudimos acceder, del 2001 hasta el 2005 [15], [28], [33], [40]. Se incluye hojas de datos, manuales, artículos, monografías, tesis de Maestría y Diploma, textos en una amplia variedad de formatos, la mayoría electrónicos, a través e Internet y una minoría en formato de papel, que son los textos tradicionales fundamentales, que de forma más precisa abordan la teoría elemental sobre esta temática [1]-[5],[7], [11], [15], [17], [27], [28], [30], [32], [33], [35], [36], [38], [40], así como algunos catálogos que entregan los fabricantes en la venta de sus productos.

Todos los libros de texto presentan una buena colección de ejemplos y problemas que ayudan al lector a ejercitar, complementar y meditar la materia tratada. Estos aspectos hacen que estas obras puedan utilizarse como bibliografía para la enseñanza de la Electrónica, no obstante tiene limitaciones, como por ejemplo, en el tratamiento riguroso de los fenómenos que tienen lugar en los semiconductores y la insuficiente discusión de los efectos de 2do orden que presentan los dispositivos y circuitos electrónicos, lo cual no favorece el uso adecuado de la interrelación entre la teoría y la practica, y limita su empleo en la labor de consulta profesional y de investigación.

A partir de los análisis desarrollados en [8], [9], [39], [42] y [43] es indudable que con el desarrollo de la electrónica, el uso de las fuentes conmutadas dejó de ser una opción para convertirse en algo indispensable en nuestra vida cotidiana. Esto ha favorecido la irrupción en el mercado de convertidores de energía eléctrica de toda índole e inevitablemente el espíritu de especulación, mercantilista y de obtención de ganancias, ha prevalecido en la conciencia de de productores y vendedores de todo el mundo.

En [26] ofrecemos un ejemplo de oferta de convertidores. En su catálogo comercial, esta firma, incluso, indica que equipos se pueden alimentar con cada una de las marcas de sus productos y ofrecen tablas como las que a manera de ilustración, y para lectores particularmente interesados, les incluimos en [42].

Ya en [43] exponemos que nuestro objeto de estudio son los convertidores, destinados a alimentar los sistemas y dispositivos de la esfera industrial, bajo el control y supervisión de los especialistas capacitados en esta esfera. Hacia estos profesionales va dedicado este estudio, lo que hacemos con el propósito de profundizar en las características y criterios que prevalecen en el diseño y fabricación de los Convertidores de Energía Eléctricos contemporáneos, sin renunciar a tomar como base sus orígenes hace más de 4 décadas, desde que comenzaron a ser tratados con mucho rigor científico y excelencia teórica por varios autores rusos de aquella época, tan es así, que la mayoría de los enunciados y análisis de [1], [3], [7], [11], [27], [30], [35], [38], tienen absoluta vigencia, aún en los modelos de convertidores más modernos. En [42], se ofrece un pormenorizado análisis sobre la disparidad, falta de homogeneidad y dispersión de criterios en las ofertas y las características que prevalecen para la proyección de los bloques funcionales de los circuitos de fuerza y los dispositivos de mando y control, sustentado por una lista inmensa de certificados de autores y patentes a nivel internacional y se pone a disposición de sus lectores un grupo de tablas donde aparecen de forma organizada los parámetros a los que se hace referencia por cada uno de los fabricantes y comercializadores sobre las diferentes marcas y modelos que pudimos encontrar en nuestra búsqueda bibliográfica y se utiliza una columna para especificar la referencia donde fue encontrada. Aclaremos que el objetivo de las tablas no es brindar datos sino, de forma genérica y aleatoria, por firmas, ejemplificar la diversidad de criterios en cuanto a especificación de parámetros, no obstante los interesados en profundizar o buscar algún dato pueden consultar la bibliografía que se indica para cada fabricante.

Resulta elocuente, a golpe de vista, observando estas tablas, la gran disparidad, falta de homogeneidad y dispersión de criterios existente por parte de fabricantes y comercializadores de todo el mundo a la hora de ofertar sus productos en el mercado y realizar las especificaciones de sus parámetros, lo que compromete el proceso de selección de las fuentes y que sean escogidas realmente las más adecuadas para respaldar de manera confiable, desde el punto de vista de la energía eléctrica, el funcionamiento de los dispositivos y sistemas que alimentarán.

A menudo si se dispone de un determinado presupuesto y se conocen las características más elementales de la carga (corriente, voltajes, consumo), el personal encargado de seleccionar el convertidor más adecuado, disponible en el mercado, una vez hallado el que satisface las exigencias eléctricas de la carga, procede a buscar la variante más económica en cuanto a costo, obviando o restando importancia muchas veces al coeficiente de eficiencia  $\eta$  y a los coeficientes sobre los contenidos de armónicas. En este proceder influye precisamente que los fabricantes muchas veces no tangibilizan estos parámetros y lo dejan en un lenguaje o terreno difuso [12], [21], [34]. Por Ej. En [34] se utiliza el

concepto “senoidal pura” 2% distorsión, en [12], [21], [26] se utilizan términos imprecisos tales como: “senoidal escalonada, senoidal equivalente, senoidal real y senoidal pura o modificada.”, respectivamente. En las especificaciones de [26] aparece “alta eficiencia”, o sea, este fabricante, aunque lo tiene en cuenta en sus ofertas no cuantifica este parámetro tan importante.

En toda la bibliografía consultada, incluyendo los textos que tratan la teoría sobre estas fuentes, aparecen los principales conceptos, técnicas y circuitos necesarios para comprender, especificar y diseñar sistemas electrónicos de conversión de potencia [3], [15], [17], [33], [35], [38], se brindan las relaciones entre topología, control y función de los circuitos convertidores de potencia [32], [33], [35], [36] y se analizan las técnicas auxiliares y consideraciones de importancia práctica en el diseño de sistemas electrónicos de potencia [4], [15], pero solo en [20], [32], [40] se detallan los métodos de análisis y cálculo para hacer tangibles parámetros tan importantes como los que detallan el contenido de armónicas, así como en [40] algunos métodos para la reducción de estos inconvenientes que pueden provocar errores o pérdidas de datos, errores en los dispositivos de almacenamiento, bloqueo de periféricos [16], distorsión de audio, video, deformación de imágenes de ultrasonidos, rayos x, electrocardiogramas etc., como se justifica en [28], [43].

Sin embargo, la inmensa mayoría de los fabricantes no lo ofrecen como un parámetro en su hoja de datos, siendo un criterio importante que debe ser evaluado por el usuario para alimentar ciertas cargas. Esto se debe quizás a la poca información que sobre el asunto se dispone, o a que se hace caso omiso a esta exigencia tan importante para el funcionamiento confiable de sistemas como los de Radiocomunicaciones [7], [11], [23], [27], [28]. Procesamiento y Transmisión de Información [16], [30] y Electromedicina [29], por solo citar a aquellos con los que personalmente coincidimos con algunos autores que los catalogan como del tipo de cargas más críticas. En [3], [7], [27], [32] se pretende por sus autores establecer un compromiso entre compatibilidad electromagnética y eficiencia, lo que a mi juicio solo logran conseguirlo parcialmente quedando, en la mayoría de los casos, a la espontaneidad del comprador, la acción de elegir el convertidor más conveniente.

En [42] se abordan las acciones que deben desarrollar diseñadores y fabricantes para garantizar esta compatibilidad electromagnética, y que han sido tratados adecuadamente en la literatura consultada.

El cumplimiento estricto de todas las exigencias que hemos relacionado hacia el diseño y construcción de las FSAST conlleva, como en [9] se ilustra, a disminuir al mínimo los niveles de ruido e interferencias indeseables y garantiza el funcionamiento confiable e ininterrumpido de los equipos de Radiocomunicaciones, que son cargas que pudiéramos utilizar perfectamente en calidad de patrón en nuestra investigación, por ser del tipo de carga crítica de las que más exige a las FSAST, tratando de

no ser absolutos, simplemente nos basamos en las afirmaciones de [7], [11], [23], [28].

Después de esta revisión, que nos permitió investigar sobre parámetros y criterios de las FSAST, fue necesaria la consulta en [13], con relación a los componentes del primer convertidor utilizado en nuestro prototipo, analizar sus características de potencia, tensión, corriente, frecuencia, valores máximos y mínimos, temperatura, tiempos de recuperación etc., y profundizar en su principio de funcionamiento, y como en su diseño, se materializan los elementos que aquí se han discutido.

El ambiente de la simulación se convierte en una herramienta indispensable cuando los sistemas de potencia, los instrumentos, transformadores, filtros y los sistemas de protecciones se representan mediante modelos en forma de software.

En cuanto a lo que ha simulación se refiere solo consultamos un texto en formato electrónico [5], a nuestro criterio bastante bien estructurado pero que adolece de modelos suficientemente flexibles para caracterizar todos los procesos transitorios y electromagnéticos de almacenamiento y desalojo de energía que se producen en el proceso de inversión, así como los arreglos circuitales para resolver la compatibilidad electromagnética y elevar la eficiencia. Luego de analizar las posibilidades que nos brindaba este software, decidimos efectuar nuestra simulación con el Simulink de Matlab que nos ofrece más posibilidades de modelación encaminadas hacia el objetivo de nuestro trabajo, y sobre lo que pudimos encontrar algunos antecedentes en [41]. Todos los detalles relacionados con los costos de diseño y construcción del prototipo múltiple y el ahorro de importaciones logrado se pueden encontrar en [42].

Esta extensa revisión bibliográfica estableció un punto de partida para trazarnos el principal objetivo de este trabajo: diseñar y montar un prototipo de convertidor real múltiple e implementar modelos de simulación que lo complementen.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Dedicaremos este capítulo a explicar la selección de los medios y los métodos que nos condujeron a la proyección y montaje y como argumentamos el diseño de experimentación.

Para ello realizamos un estudio exhaustivo de la clasificación de las FSAST, así como la evolución histórica que han ido experimentando sus diferentes estructuras internas, configuraciones, esquemas, topologías y circuitos, con vistas a ir satisfaciendo las crecientes y a cada vez más complejas exigencias de sus cargas, e indicamos con precisión en el mismo orden que se abordan, cuales de ellas se corresponden con las características constructivas del convertidor que nos sirvió de base para obtener nuestro producto, ofreciendo las valoraciones y análisis comparativos correspondientes.

Para montar nuestro prototipo contamos desde un inicio con dos convertidores CD-CD de diferentes tecnologías y modelos que fueron utilizados en los Ferrocarriles durante más de 20 años, el Glenayre canadiense y el NEC japonés, para alimentar las plantas de radiocomunicaciones móviles de las Locomotoras y que habían sido desmontados para su reparación, pero quedaron en desuso, y resultaron dados de baja, al ser sustituidos por otros modelos de tecnología más moderna, por lo que gestionamos y logramos que fueran donados por los compañeros del Taller de Radio de Ferrocarriles Centro Este, como posible material de estudio para desarrollar la presente investigación.

Adicionalmente nos entregaron sus correspondientes manuales, que aparecen referidos en la bibliografía como [13] y [31], aunque los mismos solo nos aportaron algunos datos técnicos que aparecen en [42], su circuito general y una breve descripción.

Luego de una minuciosa defectación de ambos, logramos reparar de inmediato el modelo Glenayre, canadiense, que solo precisó de la sustitución de algunos zener, diodos y condensadores y revisión de algunas soldaduras en las placas, lo que estuvo a nuestro alcance resolver, quedando el modelo NEC pendiente para futuros trabajos, ya que requería para su reparación de la búsqueda y sustitución de los transistores de potencia. A partir de estos resultados, ajustamos nuestro proyecto a utilizar como base el convertidor canadiense, modelo 2919E/E2 que suministra una salida regulada y aislada DC de 13.8v, desde una entrada no regulada también de DC de 85-120v. La corriente máxima de salida es 12 A, con holgura suficiente para alimentar las plantas de radio de las locomotoras que solo consumen un máximo de 8 A en régimen de transmisión de la planta. En régimen de espera y de recepción el consumo es mucho menor. La unidad cuenta con un diseño altamente confiable, incorporando transistores de conmutación que trabajan a una frecuencia de 22 Khz., para lograr una operación sin ruido con pequeño tamaño y peso.

El convertidor elimina completamente los problemas que surgen por transitorios eléctricos severos, que se originan en las fuentes de las locomotoras, tanto de línea a línea, como de línea a chasis. La corriente de salida está limitada para proteger a la carga (equipo de radio) de daños en caso que exista una operación deficiente.

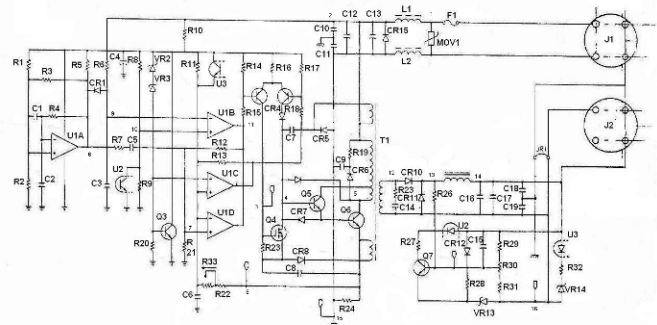
El convertidor posee un circuito de protección del voltaje de salida, llamado grueso, de 16 V, que evita daños a la carga en caso que exista un mal funcionamiento del regulador.

La entrada y la salida están equipadas con diodos emisores de luz confiables, que se iluminan cuando se alimenta (enciende) el convertidor y existe además un fusible interno de entrada, que se añade como medida de seguridad. Utiliza frecuencia constante y suministra un aislamiento entre la entrada y la salida por medio de un transformador que trabaja a altas frecuencias. Este convertidor además emplea un dispositivo optoaislador en la trayectoria de realimentación de voltaje y circuito

limitador de corriente. El voltaje de salida se mantiene a un nivel constante establecido, variando el ciclo de trabajo, por medio de un circuito de conmutación, de manera de acomodar los cambios del voltaje de línea y las variaciones de las condiciones de la carga.

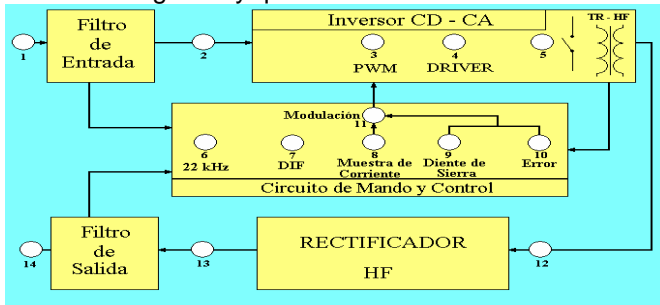
Todos los elementos constructivos analizados por separado, en la revisión bibliográfica, se materializan en el circuito general de este convertidor que acabamos de describir. Se trata de un convertidor con inversor regulado de una etapa, con modulación de ancho de pulso y que utiliza una gran parte de los arreglos circuitales que hemos indicado en [42]. Los análisis comparativos realizados y algunas mediciones efectuadas durante la reparación, nos permitieron describir detalladamente su funcionamiento, delimitar cada uno de los bloques que conforman su estructura interna, así como los puntos decisivos donde se deben realizar muestreos de los niveles de señal y de la forma de onda.

Para lograr acceder fácilmente a los diferentes puntos de medición seleccionados, dibujamos el esquema en bloques que deducimos de nuestros análisis, en la tapa superior del propio equipo y barrenamos la misma para fijar los conectores que fueron necesarios, adecuando su posición en cada uno de los bloques y numerándolos e identificándolos para facilitar las mediciones que pueden realizarse fácilmente. Para lograr la alimentación adecuada DC, utilizamos un transformador de TV KRIM con la relación de transformación necesaria, 4 diodos y un filtro con la capacidad suficiente, para lograr la rectificación y disminuir el rizado, logrando una señal de entrada muy similar a la que suministran las locomotoras. El resto de los materiales auxiliares se pueden inferir de los procedimientos descritos para efectuar el montaje y que se resumen brevemente en 16 conectores con aislamiento de vaquelita para evitar cortocircuito al chasis, varios tornillos y tuercas de sujeción de diferente tipo y tamaño, estaño, cables, espigas, conectores y plus para la alimentación de la red y la salida del equipo y las puntas de prueba necesarias para la realización de los experimentos y conexión de diferentes cargas, todos estos recursos fueron recuperados de equipos obsoletos. El circuito general que se muestra en la "Fig.1" y los análisis sobre su funcionamiento están explícitos en [42].



**Figura 1** Circuito general del convertidor Glenayre modelo 2919E/E2

En la "Fig.2" se ofrece el esquema en bloques que concebimos para nuestro prototipo, coincidiendo con la descripción del funcionamiento de su circuito general y el mismo que dibujamos en la tapa superior del convertidor según explicamos anteriormente. En él se observan 14 de los 16 puntos de medición indicados en el circuito general de la figura 1 y que detallamos a continuación:



**Figura 2** Esquema en Bloques del Prototipo

(1) señal de entrada CD. Es la señal que proviene de la fuente auxiliar construida.

(2) señal filtrada.

(3) señal de modulación por ancho de pulso que entrega el bloque de Mando y Control al bloque Inversor.

(4) señal en la base del transistor excitador principal (driver) para la conmutación del transistor de potencia dentro del propio bloque Inversor.

(5) señal en el colector del transistor de potencia (conmutador principal) que es quien ejecuta finalmente la función de Inversión dentro del bloque Inversor en combinación con el transformador de alta frecuencia HF.

(6) señal a la salida del oscilador de 22kHz, determina la frecuencia de conmutación.

(7) señal de salida del oscilador diferenciada, compuesta por pulsos positivos y negativos con frentes de onda adecuados, es la que rige el proceso de conmutación.

(8) señal de corriente muestreada para evitar sobrecargas (actúa sobre una de las entradas de un comparador interno que realiza esta función dentro del circuito integrado MLM239P del bloque de mando y control).

(9) señal Diente de Sierra, en combinación con la señal del punto (10) actúa sobre el modulador del ancho de pulso.

(10) señal error que varía su nivel en dependencia de las fluctuaciones de voltaje en la salida, es una muestra de realimentación procesada a través del dispositivo optoacoplador del circuito integrado MCT 2E.

(11) señal de salida del conmutador de mando principal, es quien determina como será el ancho del pulso que se entregará al inversor, en combinación con el resto de las señales de Control y Mando anteriormente descritas.

(12) señal que se entrega al rectificador HF.

(13) señal rectificada sin filtrar.

(14) señal de salida 13.8v CD.

En el panel frontal del convertidor del prototipo (no mostrado en la figura 2) se encuentran convenientemente indicados los puntos (15) y (16). El punto (15) es el común (tierra) de los circuitos de entrada para hacer las mediciones en los puntos del (1) al (11) y el punto (16) es el común (chasis) de los

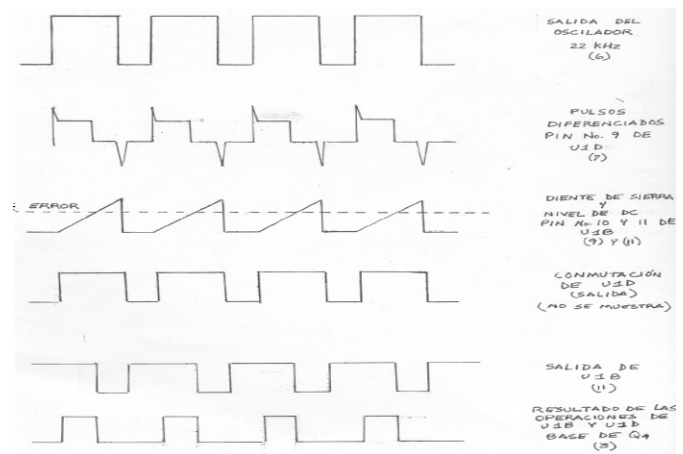
circuitos de salida para hacer las mediciones en los puntos (12), (13) y (14).

Las formas de onda comunes en algunos de estos puntos, se muestran como ejemplo en la "Fig.3".

Los diodos del rectificador HF de salida deben responder a los siguientes parámetros fundamentales:

Tiempo de recuperación de la resistencia inversa del diodo, que es el que determina la duración de los picos eventuales de corriente en el esquema del rectificador. Si este tiempo no es lo suficientemente pequeño, aumentan las pérdidas, no solo en los propios diodos, sino también en los transistores de potencia. Debe ser 3-4 veces menor al tiempo de cierre del transistor de Potencia y para las exigencias contemporáneas oscila entre 0.3-0.5µseg. En nuestro convertidor, en el rectificador se utilizan los diodos BYW31-150, en los circuitos de desmagnetización los IN4936 y los IN4148 en los de Control, todos responden a esta exigencia.

Estos diodos poseen, además, una caída de tensión en directo pequeña, ya que la eficiencia es inversamente proporcional a este parámetro y buenas características de frecuencia lo que significa que la eficiencia del equipo no dependa de la frecuencia.

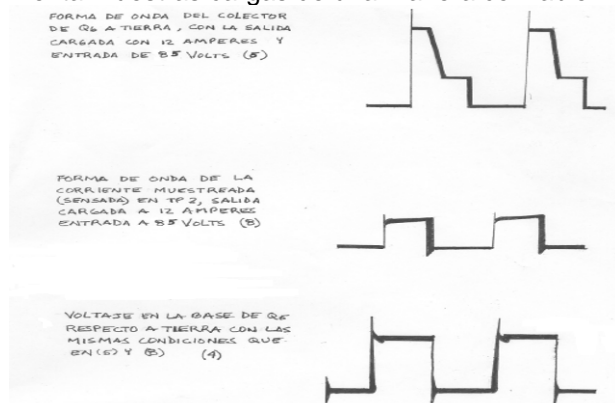


**Figura 3** Ejemplos de formas de onda comunes.

### III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Con el objetivo de valorar el comportamiento del bloque Inversor ante cargas significativas y variaciones bruscas de la misma, desarrollamos un experimento adicional en el Taller de Radio de los Ferrocarriles. Al convertidor se le conectaron 4 plantas de radio al mismo tiempo, y el muestreo se realizó mientras una se encontraba en transmisión y el resto en recepción o espera, dando una corriente de salida de alrededor de 12 A (carga crítica), obteniéndose las formas de onda que aparecen en la "Fig.4". Estas formas de onda son típicas, cuando este tipo de convertidores trabaja a plena carga, y obedece a la respuesta de los arreglos circuitales previstos para estos casos. Es interesante resaltar el frente de onda escalonado en el colector del transistor de potencia trabajando en sus peores condiciones, cuando pasa del estado de conducción a corte. Este escalón está dado por las soluciones de diseño previstas para evitar que la potencia instantánea pueda sobrepasar los límites de

potencia permisibles del dispositivo semiconductor en el transito de conducción a corte, y resulta un elemento importante a considerar y evaluar en los circuitos internos de los convertidores que se pretendan adquirir o explotar si ya fueron comprados, para cuidarlos mejor y alimentar nuestras cargas de una manera confiable.



**Figura 4** Formas de onda típicas con carga crítica.

En los filtros de HF deben ser utilizados capacitores electrolíticos. Deben seleccionarse con holgura suficiente, por experiencias empíricas, para que los cambios que puedan producirse de su capacidad nominal en dependencia de la frecuencia de conmutación utilizada, no afecten la confiabilidad de funcionamiento del convertidor.

Los transistores de potencia utilizados son el MJ10006, como interruptor de fuerza fundamental, el FT49 como el driver y el VN46AF(Tecnología VMOS) es el conmutador principal. El régimen óptimo de explotación de estos transistores se alcanza con una adecuada corriente de base suficiente para pasar el transistor de corte a saturación o viceversa con mínimas pérdidas dinámicas. La correcta selección de los transistores obedece fundamentalmente a que sus características de frecuencia sean las más adecuadas para no perjudicar la eficiencia del convertidor en general, pues generalmente son estos componentes los que deciden finalmente este parámetro tan importante, además de la confiabilidad, el peso y volumen del convertidor en general.

Para tratar de cubrir estas insuficiencias, decidimos buscar otra alternativa a nuestro primer prototipo real, acometiendo la reparación (mucho más compleja, que la del convertidor canadiense) del modelo 63834A marca NEC de procedencia japonesa cuyos detalles se ofrecen en [39]. Este convertidor por su estructura interna combina elementos importantes donde se aplica la teoría de los circuitos eléctricos, la electrónica de potencia, la electrónica analógica y digital, así como elementos de automática. El último paso después de completar la reparación fue el acondicionamiento didáctico del convertidor. Este equipo fue reparado con el objetivo de ser usado como medio de enseñanza en la asignatura de electrónica, por lo que fue preciso introducir ciertas variaciones que permitan realizar esta labor con los mejores resultados.

El convertidor en su forma original es un equipo completamente cerrado que recibe y entrega la energía

por medio de conectores. Para su empleo en las clases de laboratorio o la investigación, donde es preciso realizar mediciones de la forma de onda de las principales señales que regulan su funcionamiento, es necesario acceder al circuito interno del mismo. Para realizar las mediciones de cada una de las señales que intervienen en la operación de este convertidor, podemos transformarlo en una maqueta, donde se simbolicen, ya sea en forma de diagrama de bloques o empleando completamente el esquema original, los componentes fundamentales de este equipo. En la maqueta se ubicarían algunos bornes de prueba que permitan realizar las mediciones insertando estos en los puntos específicos del esquema dibujado en el cartón, la madera o la propia tapa.

La segunda variante que se consideró en el acondicionamiento del convertidor fue la de eliminar las tapas que impiden observar el circuito en su interior y realizar las mediciones. Esta última variante fue la seleccionada, teniendo en cuenta los siguientes factores:

- El alumno o el especialista puede interactuar más directamente con los elementos del circuito, mientras que en la maqueta se tiene que conformar con observar su símbolo, además que ya se hizo con el convertidor canadiense utilizado como primer prototipo.
- Existe la posibilidad de verificar el correcto comportamiento del sistema realizando mediciones en cualquier punto del circuito y realizando ajustes, mientras que la maqueta ofrece solo la posibilidad de medir en los bornes colocados en el cartón, tapa o la madera.
- El alumno o el especialista puede localizar los puntos de medición por si mismo interpretando el plano del convertidor.

Para completar el acondicionamiento se colocaron pequeños ganchitos de pruebas soldados al impreso del circuito para facilitar la colocación de las puntas del osciloscopio a la hora de realizar las mediciones "Fig.5".



**Figura 5** Acondicionamiento didáctico del modelo 63834A marca NEC de procedencia japonesa  
Para comprobar el funcionamiento de ambos prototipos de convertidores bajo régimen de carga, fue necesaria la construcción de un módulo de carga resistiva variable

que se muestra en la "Fig.6". Este módulo contará con una resistencia variable de forma circular con acceso al operador para variar la carga según se necesite. El módulo además contará con un amperímetro que mostrará el aumento o la disminución de la corriente de carga. El esquema de conexiones y los detalles sobre este módulo se encuentran en [39].

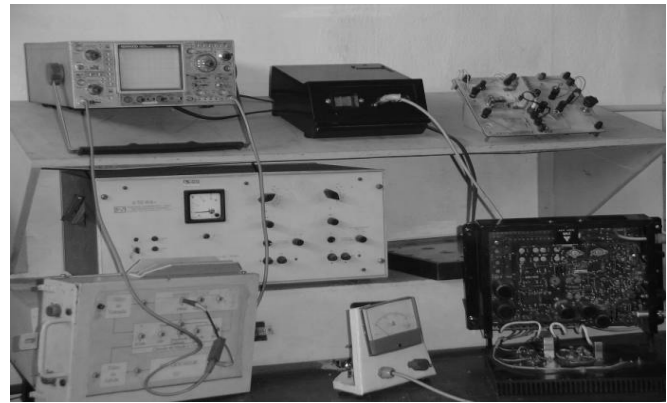


**Figura 6** Módulo de carga resistiva.

Basados en la evolución y los razonamientos antes expuestos nace también la idea de diseñar y construir una maqueta adicional, nombrada Protoconverter v1.0 y mostrada en la "Fig.7", que sirve como base material de estudio para el análisis y estudio de los principales procesos y fenómenos que se presentan en las técnicas de control, procesos energéticos y principios de operación, presentes en los sistemas eléctricos que usen el principio del PWM o en aplicaciones que requieran el empleo de las fuentes de alimentación conmutadas. Los detalles relativos al diseño y construcción de esta maqueta aparecen en [9].



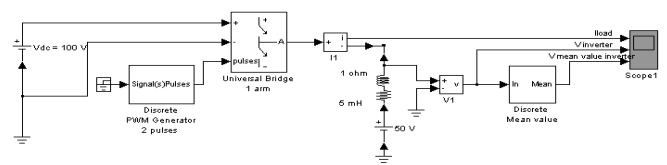
**Figura 7** Protoconverter v1.0: un medio didáctico de enseñanza.



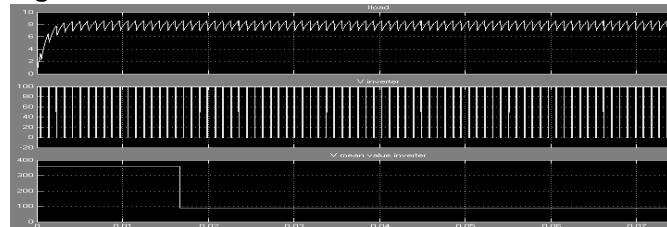
**Figura 8** Prototipo múltiple de convertidores reales.

Ya contando con tres puestos de trabajo que permiten ensayos y experimentos reales y dispuestos como se ofrece en la "Fig.8", lo complementamos con dos modelos de simulación que utilizan componentes concebidos con parámetros de última tecnología, tanto en el bloque Inversor como en los de Mando y Control.

El primer modelo es un convertidor genérico CD-CD que aparece en la "Fig.9" y a modo de ejemplo ofrecemos la forma de onda en la carga como resultado de una posible simulación, según aparece en la "Fig.10" y el segundo modelo es de un Convertidor CD-CD real, como uno de los dos reales que reparamos, actuando propiamente como tal, según se muestra en la "Fig.11".



**Figura 9** Simulación de un convertidor CD-CD.



**Figura 10** Formas de onda en la carga y a la salida del convertidor CD-CD.

Además de permitirnos realizar comparaciones de mucho interés, estos modelos permiten simular cargas de diversa naturaleza y además variarlas en el tiempo con la rapidez que deseemos. Los severos procesos transitorios que ocurren en los procesos de conmutación, la acumulación y desalajo de la energía magnética, la composición de armónicas de las señales que se obtienen, pueden ser escudriñados hasta la saciedad con la simulación. Para ello nos basamos en el Simulink de Matlab que ofrece modelos flexibles y capaces de analizar todos estos elementos.







- [19] Ingeniería Técnica Agrícola. "Comparación entre diferentes tipos de convertidores DC/AC". <<http://www.upct.es/infoalumno/matricula/32/1412/141215012.htm>> ( 31 MAR 2005).
- [20] Introducción a la Electrónica de Potencia. Problemas sobre armónicos en un inversor PWM. <<http://www.fie.utp.ac.pa/elect-pot/doc/problemas.htm>> (31 MAR 2005).
- [21] Inversores eléctricos de onda sinusoidal. "Entrada DC aislada de la salida". <[http://www.selectronics.com.au/Brochure/LD\\_Spanish.pdf](http://www.selectronics.com.au/Brochure/LD_Spanish.pdf)> (31 MAR 2005).
- [22] Inversores Serie DR de TRACE. "Nuevo estándar, salida con cargador de 70A y rele de transferencia de 30A AC". <<http://www.altertec.com/inversores/Serie%20DR%20de%20Trace.htm>> (20 ABR 2005).
- [23] KOLOSOV, V. A. Convertidores transistorizados estabilizadores de tensión / V. A. Kolosov, A. P. Budenni.- Aspectos de Radioelectrónica . Serie EBT (8) : p122-133, 1974.
- [24] "Consideraciones acerca de las pérdidas energéticas asociadas a la conversión DC/AC". <<http://www.fotovoltaica.com/laenered.pdf>> (20 ABR 2005).
- [25] LGT Product 2. Sonímetros. Energía. "Inversores DC/AC para la Industria de Telecomunicaciones". <<http://www.lgt.pt/SitePO/prod02.htm>> (20. ABR. 2005).
- [26] LR Informática Industrial. "Inversores DC-AC con onda sinoidal pura o modificada". <<http://www.lri.com.br/alimentacao/categorias.php?opcao=inversor>> (31 MAR 2005).
- [27] MELESHIN, V. I. Relaciones Energéticas en los convertidores conmutados / V. I. Meleshin.- Moscú : Radio, 1977.- 97p.
- [28] MILLER, GARY M. Modern Electronic Communication / Gary M. Miller.- Sixth Edition : Prentice Hall, 2001.- 787p.
- [29] MIRON FOLGOSO, J. Módulo para el estudio de los conversores CD-CD / Jorge Mirón Folgoso.- Tesis de Maestría.- Universidad de Camagüey : [s.n.], 2002.- [s.p.].
- [30] MIRTCHIAN, J. A. Alimentación de Máquinas Computadoras. / J. A. Mirtchian.-Moscú. : Energía, 1980.-207p.
- [31] NEC Corporation Instruction Manual for Mobile Radio Station.- Tokyo, Japan, 1979.
- [32] PEREZ BALLALTAS ANTONIO. Apuntes sobre diseño de bobinas y transformadores con núcleo de ferrita y Fuentes Conmutadas / Antonio Pérez B.- [s.l. : s.n., s.a., s.p.].
- [33] Power Electronics. Converters, applications and design / Ned Mohan...[et al].- 3rd edition : John Wiley, 2003.- [s.p.].
- [34] Power Plants Products. "Serie IPPWM". <<http://www.generac.com.ar/prod03.htm>> (31 MAR 2005).
- [35] PRIANISHNIKOV, V. A. Esquemas y bloques funcionales de mando con tecnología microelectrónica para las Fuentes Conmutadas / V. A. Prianishnikov, E. A. Petrov.- Moscú : Transporte, 1979.- 155p.
- [36] Principles of Power Electronics. / John G. Kassakian... [et al].- Ed : Addison Wesley, 1992. - [s.p.].
- [37] Productos que importa y distribuye Electrónica Olfer. "Fuentes de alimentación, Fuentes de alimentación conmutadas AC/DC, Convertidores DC/DC, Inversores DC/AC, Transformadores AC/AC". <<http://www.olfer.com/productos.html>> (31 MAR 2005).
- [38] OJOTNIKOV, V. A. Métodos de reducción de la potencia disipada en los transistores de potencia de los convertidores de energía eléctrica / V. A. Ojotnikov, V. U. Fomichev.- Moscú : Radio y Comunicaciones, 1980.-105p.
- [39] RAMOS BETANCOURT, E. Reparación de un convertidor CD-CD / Eire Ramos Betancourt.- Trabajo de Diploma.- Universidad de Camagüey: [s.n.], 2008, no publicado.
- [40] RASHID, MUHAMMAD H. Electrónica de Potencia, circuitos dispositivos y aplicaciones / Muhammad H Rashid.- Prentice Hall : Hispano Americana, 1995.- 702p. 2t.
- [41] ROJAS DIAZ, IMANDRA Inversores de frecuencia con modulación del ancho de pulso empleados para el control del motor de inducción/ Imandra Rojas Díaz. – Tesis de Maestría. - Universidad de Camagüey: [s.n.], 1999. - [s.p.].
- [42] SANTANA LOPEZ, ENRIQUE Prototipo Multipropósito de Convertidor de Energía Eléctrica/ Enrique Santana López. – Tesis de Maestría.- Universidad de Camagüey: [s.n.], 2005, no publicado.
- [43] SANTANA LOPEZ, ENRIQUE. Análisis del funcionamiento del inversor de corriente directa en corriente alterna (CD-CA), en diferentes configuraciones de fuentes conmutadas de energía eléctrica/ Enrique Santana López.– Monografía.- Universidad de Camagüey : [s.n.], 2004.- [s.p.].

## DATOS DE LOS AUTORES

**M.Sc. Enrique Santana López**

*Fecha y lugar de nacimiento:* 27 de agosto de 1958, Camagüey, Cuba.

*Título universitario:* Ingeniero Electricista, Moscú, URSS, 1983.

*Centro de trabajo:* Universidad de Camagüey, Facultad Electromecánica.

*Ocupación:* Profesor Asistente, Carrera Ing. Eléctrica, Disciplina Electrónica.

*Dirección particular:* Calle C # 79 e 2da y 3ra, Rpto Saratoga, Camagüey, CP 70100.

*Teléfono Particular :*052308318.

*email adress :*enrique.santana@reduc.edu.cu

**Msc Imandra Rojas Díaz**

*Fecha y lugar de nacimiento:* 23 de Febrero de 1969, Villa Clara, Cuba

*Titulo universitario:* Ingeniera en Electrónica Industrial  
*Centro de trabajo:* Universidad de Camagüey, Facultad  
Electromecánica.  
*Ocupación:* Profesor Auxiliar, Carrera Ing. Eléctrica,  
Disciplina Electrónica.  
*Dirección particular:* Calle B, #23, Comunidad Científica  
Biotecnología, Camagüey.  
*Teléfono Particular :* 26 5386  
*email adress:* [imandra.rojas@reduc.edu.cu](mailto:imandra.rojas@reduc.edu.cu)