

## Estudio de Fallas en Fuentes de Alimentación Conmutadas Debido al Estrés de los Capacitores Electrolíticos

Olsson, Jorge Alberto<sup>a\*</sup>; Trochez, Oscar Dionisio<sup>b</sup>; López, Jorge Luis<sup>a</sup>; Santiago, Lea Vanessa<sup>a</sup>;  
Anocibar, Héctor Rolando<sup>a</sup>; Kurtz, Víctor Hugo<sup>a</sup>.

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina. 16 1142 Pequeñas Centrales Hidroeléctricas - Equipos y Sistemas

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación Paraguay.

e-mails: olsson@fio.unam.edu.ar, oscar.trochez@fiuni.edu.py, lopezj@fio.unam.edu.ar, anocibar@fiobera.unam.edu.ar, kurtzvh@fio.unam.edu.ar

---

### Resumen

Este trabajo enmarcado en un proyecto de investigación acreditado, tuvo como objetivo determinar las principales causas de fallas en fuentes conmutadas o *switching*. En un 83% de los casos analizados los resultados empíricos indicaron que las fallas se debieron al estrés que soportan los capacitores utilizados como filtros. Los datos fueron obtenidos a partir de un seguimiento de servicios de mantenimientos electrónicos predictivo, preventivo y de reparación por fuera de servicio, esto fue comparado con la información de las hojas de datos de los fabricantes de capacitores, relacionándolos con sus condiciones de servicios por medio de simulación. La información obtenida permitió establecer la vida útil de los capacitores en las fuentes conmutadas, de acuerdo a sus condiciones de servicio y a la exigencia a las que son sometidas. Se concluyó que la determinación de la vida útil del capacitor frente al estrés permite aportar datos para un adecuado proceso de fabricación, y utilización de productos, una correcta elección de los mismos de acuerdo a su destino y también facilita los datos necesarios para la implementación de adecuados protocolos de mantenimiento predictivo y correctivo en equipos electrónicos.

**Palabras Clave** – Estrés en capacitores, Fallas por descargas Electrostáticas, Fuentes conmutadas, Fuentes *switching*, Vida útil del capacitor.

---

### Abstract

This work framed in an accredited research project, the objective was to determine the main causes of faults in switching sources. In 83% of the cases analyzed, the empirical results indicated that the failures were due to the stress that the capacitors used as filters. The data was obtained from a follow-up of electronic maintenance services, both predictive, preventive and repair for out of service, this was compared with the information in the data sheets of the capacitor manufacturers, relating them to their service conditions by means of simulation. The information obtained allowed to establish the useful life of the capacitors in the switched sources, according to their service conditions and the requirement to which they are subjected. It was concluded that the determination of the useful life of the capacitor in the face of stress, allows to provide data for an adequate process of manufacturing and using products, a correct choice of them according to their destination and also provides the necessary data for the implementation of adequate predictive and corrective maintenance protocols in electronic equipment.

**Keywords** – Stress in capacitors, Electrostatic Discharge Failures, Switched sources, Switching fonts, Capacitor service life.

---

\*Autor en correspondencia.

## 1. Introducción

El avance de la tecnología llevo a la humanidad a una dependencia de la energía eléctrica. Es prácticamente imposible enumerar la cantidad de equipos que funcionan con energía eléctrica en el uso cotidiano, ya sea como herramientas o maquinas para la industria y el trabajo, para el confort, el esparcimiento, medicina, alimentos, ciencia, generación eléctrica etc. [1] [2]. Estos equipos utilizan distintos tipos de alimentación eléctrica y a la vez internamente suelen funcionar con distintos niveles de tensión. Por otro lado, las fuentes de generación energética también son distintas. Todo esto hace necesario adaptar correctamente la conexión de un equipo a la red de suministro o de un generador a la red de transmisión y o distribución [3]. En la actualidad estos adaptadores son en su gran mayoría con tecnología *switching* o de conmutación electrónica y son uno de los causantes de fallas. Cuando una fuente de alimentación ha dejado fuera de servicio un determinado equipo [4], el inconveniente y perjuicio que esto causa, sobre todo en la industria, medicina y en las centrales de generación de energía es irreversible, lo que requiere una pronta solución, el remplazo por una nueva no siempre es posible por los siguientes motivos: Falta de información. No hay proveedores regionales. Cambio de modelos. Requiere múltiples tensiones y potencias. En equipos especiales que forman parte de un equipamiento mayor, más oneroso, el justificativo es económico. La disponibilidad de remplazos en la región de fuentes importadas puede demorar más de un mes. No hay recursos. Etc. Estos problemas requieren solución y justifican este estudio.

### 1.1. Revisión bibliográfica

#### 1.1.1. Tipos de corriente eléctrica

En general se puede clasificar a la energía eléctrica en dos presentaciones de uso comercial, corriente continua (CC) o corriente directa (DC) por sus sigas del inglés “*direct current*” y corriente alterna (CA) del inglés (AC) “*alternating current*”.

#### 1.1.2. Corriente continua (DC)

Las fuentes de energía de corriente continua (DC) son aquellas cuya tensión de bornes se mantiene constante en amplitud y polaridad. Esta afirmación en la realidad no se cumple en cuanto a la amplitud, ya que todos los generadores poseen una cierta resistencia interna, que puede variar con el tiempo, por lo que la tensión de salida podrá tomar distintas formas dependiendo de la corriente que entrega la fuente [5]-[10], y un valor de tensión caracterizado por su valor medio.

Cada aplicación en DC real tendrá su propia exigencia y está dada por el valor medio de continua ( $V_{med} = V_{OCC}$ ) de la onda y su contenido de contenido de AC ( $V_{rms,AC}$ ), esto se da a través del factor de ripple o factor de rizado ( $Fr$ ) dado por (1).

$$F_r (\%) = \frac{\text{Tensión eficaz de AC}}{\text{Tensión media de DC}} \times 100 = \frac{V_{rms,AC}}{V_{med}} \times 100 \quad (2)$$

La tensión de salida de una fuente de alimentación puede considerarse como la suma de una tensión DC ideal dada por  $V_{med}$ , adicionada a una AC caracterizada como tensión de ripple  $V_{rms,AC}$ . En la Fig.1 se muestra el oscilograma de tensiones de un rectificador de onda completa (para transformador con punto medio y filtro con capacitor lineal (del tipo tradicional) en el que puede apreciarse los valores típicos de las componentes AC y DC.

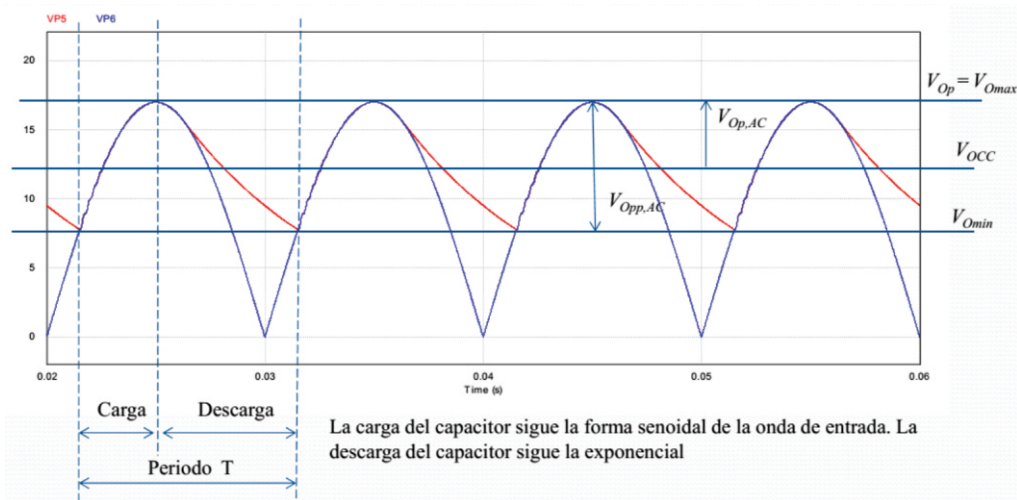


Fig. 1. Oscilograma de tensiones de un rectificador de onda completa

En la Fig.2 se muestra el oscilograma de corrientes del rectificador de la Fig.1. Para uso electrónico las fuentes DC deben contener un  $Fr \leq 10\%$ , en general el  $Fr \leq 5\%$  [5] - [8].

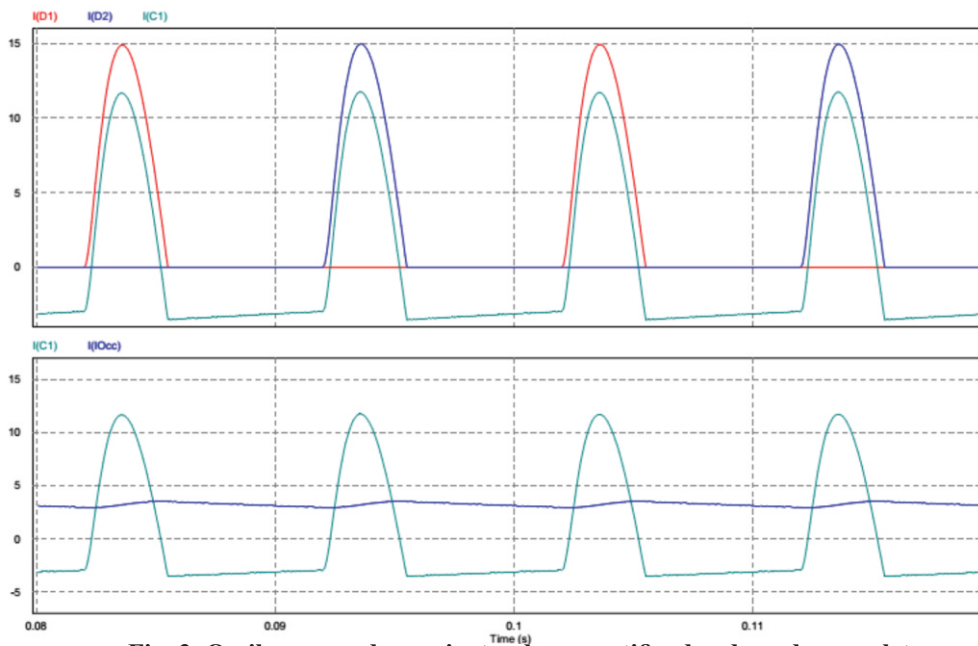


Fig. 2. Oscilograma de corrientes de un rectificador de onda completa

En las Fig.1 y Fig.2 se aprecian oscilogramas de tensión y corriente sobre diodos y capacitores, estos son componentes básicos de cualquier tipo de fuente de alimentación, los diodos son elementos de conmutación o llaves, para este caso conmutan en forma natural debido a su polarización en directa. Puede observarse que la corriente de pico de cada diodo, para el ejemplo es del orden de cinco veces la corriente media de salida  $I_{OCC} = 3$  A. El capacitor por su parte se carga rápidamente con una corriente de pico del orden de cuatro veces la de salida, para luego descargarse lentamente con una corriente igual a la de salida. Estos procesos de conmutaciones de corrientes

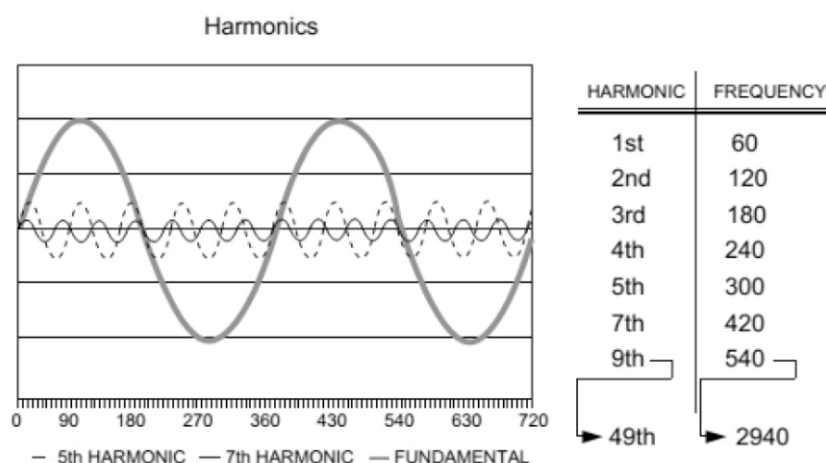
impulsivas en las llaves y de cargas abruptas y descarga del capacitor son lo que hacen que estos elementos sean los más susceptibles a fallas en las fuentes de alimentación [11].

### 1.1.3. Corriente alterna (AC).

Las fuentes de corriente alterna (AC) son aquellas cuyo modulo de la tensión varían constantemente al igual que su sentido en función del tiempo, siguiendo alguna función periódica en general con forma de onda senoidal, como se muestra en la Fig. 3. Como los generadores reales poseen resistencia interna, además las cargas no son lineales en sus bornes existirá una deformación de la onda senoidal pura llamada contenido armónico [5] - [10], [12] - [16]. Las fuentes de AC se caracterizan por su valor eficaz (2) y su contenido armónico [12] - [17].

$$V_{rms,AC} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_i^2 dt} \quad (2)$$

La onda senoidal deformada puede descomponerse en una onda fundamental, una componente de DC y los armónicos que la deforman dada por la serie de Fourier múltiplos de la frecuencia fundamental [7], [10], [12], [14]-[17]. La Fig. 3 ilustra la relación de frecuencia de varios armónicos a partir de una fundamental de 60 Hz.



**Fig. 3. Contenido armónico de una onda fundamental de 60Hz [17]**

### 1.2. Tipos de fuentes conmutadas

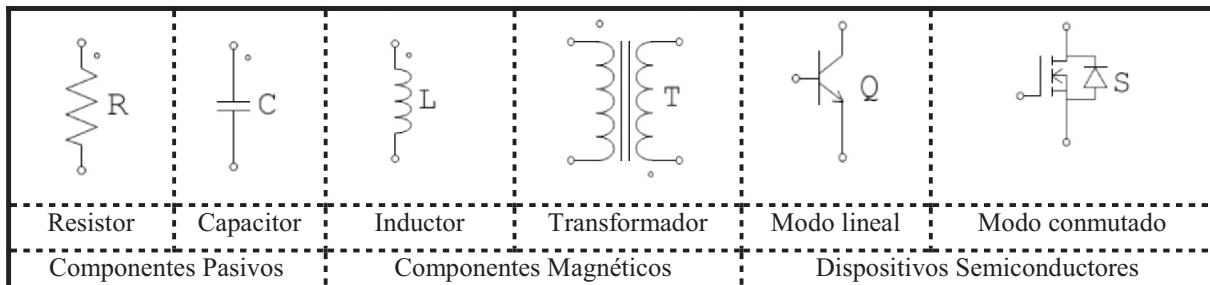
La norma [10] las clasifica a todas como *convertidores* de potencia estática de potencia eléctrica porque pueden convertir corrientes AC a DC, DC a DC, DC a AC, y AC a AC. Por otro lado, autores como [8] llaman *conversor* o *convertidor* a aquellos dispositivos que entregan el mismo tipo de corriente con la que se alimenta, ya sea AC o DC, o sea que adapta niveles de tensión y no el tipo de corriente eléctrica. Quedando el nombre de *inversor* para el dispositivo que cambia el tipo de corriente eléctrica. El comercio y la industria [19] le dan el nombre principal seguido de la adaptación que realiza y las engloba a todas como *suministro de energía* o *fuentes de alimentación*. Esto se ilustra en Tabla 1.

**Tabla 1. Nombres comerciales de fuentes de alimentación [19]**

<b>Suministros de energía</b>
AC to DC Power Supplies
Battery Chargers
DC to AC Inverters
DC to DC Converter and Switching Regulator Module
DC to DC Power Supplies
External Plug-In Adapters
LED Power Supplies
Power Distribution Units
Power Over Ethernet
Uninterruptible Power Supplies

*1.2.1. Topologías de las fuentes conmutadas*

Las fuentes conmutadas pueden clasificarse como reductores, elevadoras, reductoras elevadoras y de acuerdo a su topología reciben su nombre básico. Por otra parte, pueden o no ser aisladas galvánicamente entre la entrada y la salida. Estas fuentes tienen tres elementos fundamentales, semiconductores trabajando como llaves o conmutadores y elementos pasivos como capacitores e inductores; en conjunto controlan el flujo de energía de la entrada para obtener la salida deseada [8]. En [9], [19], [20] se estudian las principales ventajas de las fuentes conmutadas y en la Fig. 4 se ilustran los componentes disponibles para la construcción o diseño de la etapa de potencia. De estos se evitan los resistores y los semiconductores operando en su zona lineal, ya que disipan potencia que se pierde en forma de calor. Los condensadores y los dispositivos magnéticos son elementos que idealmente no consumen energía. Los dispositivos semiconductores en modo conmutado se emplean en estado apagado (off), su corriente es cero y, por lo tanto, su disipación de potencia es nula. Cuando el semiconductor funciona en estado encendido (on), su caída de tensión es pequeña y, por lo tanto, su disipación de potencia también es pequeña. Una forma de evaluar sus desempeños se trató en [21],[22].



**Fig. 4. Dispositivos disponibles para diseñar fuentes[19]**

*1.3. Fallas en los dispositivos*

Se describen a continuación brevemente las fallas en los principales componentes de las fuentes de alimentación.

### *1.3.1. Fallas en semiconductores*

Los semiconductores cuando fallan suelen quedar en circuito abierto cuando por el circula una corriente mucho mayor a la que opera normalmente o está diseñado. También puede ponerse en corto circuito. Estas fallas pueden deberse a sobre tensiones, sobre temperatura, mala disipación térmica, fallas de conmutación o control, pérdidas de potencia de conmutación, fallas de soldaduras, etc. [5] - [6], [11], [21] - [23].

### *1.3.2. Fallas en inductores*

Los componentes magnéticos rara vez son los causantes de falla, cuando esta ocurre es debido a una falla de aislación que puede provenir de una sobre temperatura o sobretensión.

### *1.3.3. Fallas en Capacitores*

Los capacitores están limitados por su vida útil que es un dato del fabricante dado en horas, bajo ciertas condiciones de funcionamiento, cuando estas condiciones se cambian su vida puede variar drásticamente. Existen distintas tecnologías de fabricación y autores estudiaron las causas de sus fallas como ser: cerámicos de baja tensión [23]-[24]; cerámicos de alta tensión [23], [25]; de poliéster [24]; capacitores electrolíticos de aluminio [26]- [28]; el factor de estrés de componentes y estimación de eficiencia se estudio en [22].

## *1.4. Objetivos*

Analizar las fallas y sus causas en fuentes de alimentación mediante el seguimiento y estudio de casos de mantenimiento y reparación de equipos electrónicos cuantificando y calificando cada una de ellas.

### *1.4.1. Objetivos específicos*

Determinar la vida útil de los capacitores electrolíticos sometidos a estrés de carga y descarga en fuentes conmutadas, de esta manera poder recomendar lineamientos para el mantenimiento preventivo, correctivo y de reparación por fuera de servicio.

## **2. Desarrollo**

### *2.1. Estudio de casos - Estadístico de fallas de fuentes de alimentación*

Esta parte del trabajo se basó en la clasificación de los registros de los servicios electrónicos realizados por una firma local dedicada al rubro electrónico [29]. Para esto solicitamos acceso a los datos de la firma, la que nos facilito su registro de servicios de los últimos cuatro años, desde junio de 2014 a junio de 2018, esto totalizó 3120 trabajos. De este total se descartaron 856 servicios que no involucraban fuentes de alimentación, por ejemplo, instalaciones o puesta a punto de equipamientos. Quedando una muestra de 2264 trabajos que involucran fuentes de alimentación, de

los cuales el 51,59% se corresponde con fallas en las mismas y el 48,41% es otro tipo de falla. Estos datos se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Fallas de fuentes de alimentación**

Cantidad de servicios en un periodo de 4 años	Cantidad que no involucran fuentes	Cantidad que involucran fuentes	Cantidad de fallas en fuentes	Cantidad de otras fallas
3120	856	2264	1168	996
	Porcentaje	100%	51,59%	48,41%

A continuación, se caracterizaron las fallas en fuente por su tipo. El 69,89% le correspondió a tipo de fuentes conmutadas y el 30, 14% a fuentes estándar. Se indica en Tabla 3.

**Tabla 3. Caracterización de Fallas por tipo de alimentación**

Cantidad que involucran fallas en fuentes	Cantidad que involucran fallas en fuentes conmutadas	Cantidad que involucran fallas en fuentes lineales
1168	816	352
100%	69,86%	30,14%

Luego se discriminaron las fallas de acuerdo al componente causante o encontrado dañado durante el servicio realizado. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4. Fallas de fuentes de alimentación por componente**

Componente	Cantidad	porcentaje
Capacitor	504	61,76%
Semiconductor	168	20,59%
Otra falla	144	17,65%
Total	816	100%

En la Tabla 5 se tomo el total de fallas debido al capacitor en fuentes conmutadas y se lo discriminó de acuerdo a la causa de su falla en estrés, sobretensión y descargas atmosféricas (rayos y otros).

**Tabla 5. Causa de fallas de fuentes de alimentación por capacitor**

Causa	Cantidad	porcentaje
Estrés	418	82,93%
sobretensión	71	14,09%
Rayo y otros	15	2,98%
Total	504	100%

## 2.2. Determinación de la vida útil del capacitor

Se estudiaron los procesos de carga y descarga del capacitor de acuerdo a su ubicación en las fuentes conmutadas, independientemente de su topología y clasificación mediante simulación en “PSIM” de una fuente conmutada tipo Boost. Esta clase de convertidor entrega una tensión continua de valor más elevado que la tensión de entrada [8, cap. 3]-[9], [20]. La llave S indicada en la Fig. 5, toma estado abierto o cerrado, controlando el funcionamiento del convertidor.

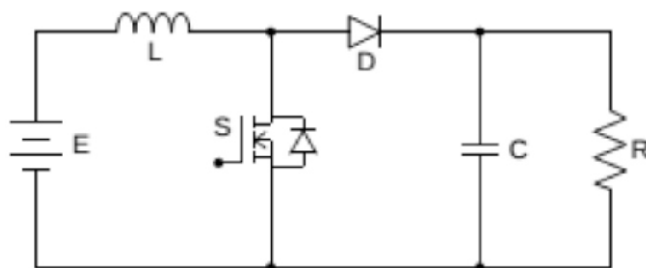


Fig. 5. Conversor Boost Simplificado

### 2.2.1. Comportamiento del capacitor de entrada

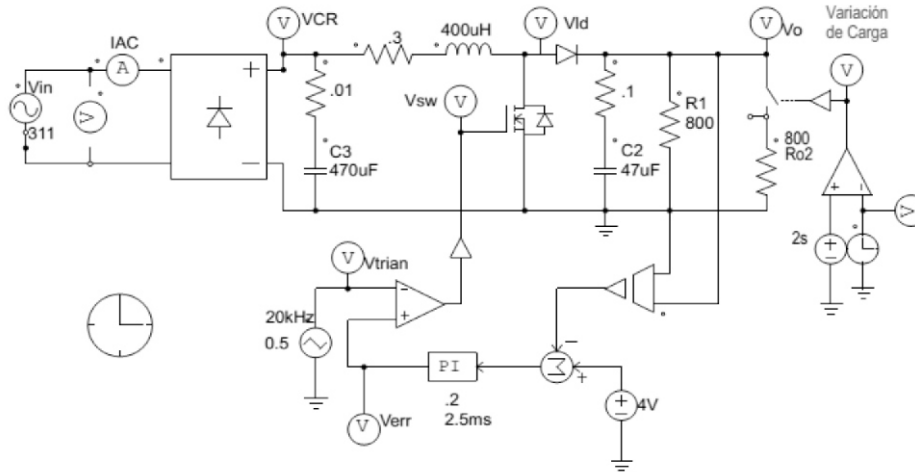
En las fuentes comerciales la fuente E de la entrada del convertidor es reemplazada por un rectificador de onda completa y filtro con capacitor como el descrito en el punto 1.1.2., para analizar las tensiones y corrientes sobre este capacitor se reprodujo uno de los diseños y simulación de una fuente Boost realizado por [30] cuyos requisitos de diseño fueron modificados para una mejor apreciación de los efectos de carga y descarga del capacitor  $C_3$ . Se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Requisitos de diseño y simulados

Parámetros	Requisitos	Simulado
Tensión de entrada: $V_{in_{rms,AC}}$	220V	110V
Frecuencia red	50Hz	50Hz
Tensión de salida: $V_{OCC}$	400V	400V
Frecuencia conmutación: $f_s$	20kHz	2kHz
Corriente de salida: $I_{OCC}$	1A	1A
Ripple de salida: 2% de $V_{OCC}$	2% de $V_{OCC}$	-----

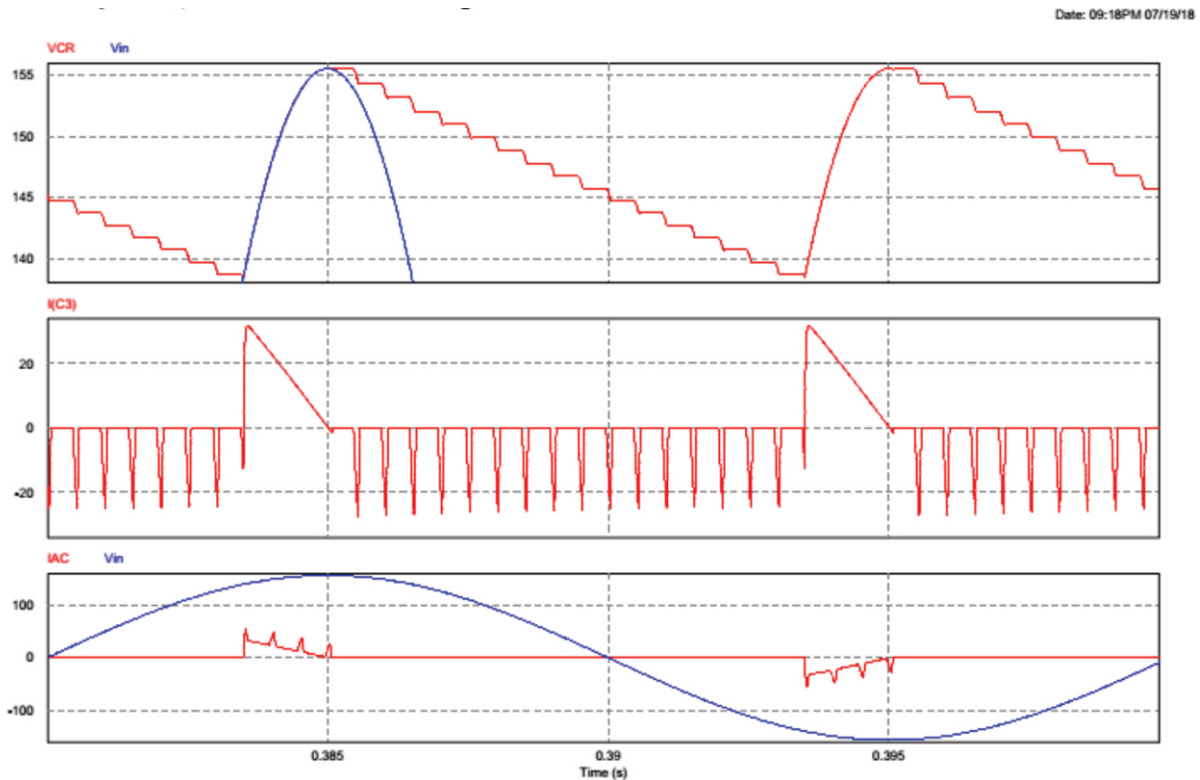


El circuito se ilustra en la Fig. 6, con esto se logra obtener un inversor de CA a CC y conversor CC a CC



**Fig. 6. Circuito para simulación del convertidor Boost en modo de conducción discontinua (DCM)**

La tensión sobre el capacitor  $C_3$  a la salida del rectificador  $V_{CR}$  que se obtuvo de la simulación se muestra en la Fig. 7, al igual que la corriente  $I_{C3}$  de carga del capacitor al doble de la frecuencia de red de 50 Hz y de descarga a frecuencia de conmutación  $f_s = 2kHz$ . También puedo apreciarse la linealidad de la corriente de entrada a la fuente  $I_{AC}$  con la tensión de alimentación  $V_{in}$ .



**Fig. 7. Carga y descarga del capacitor de entrada  $C_3$**

### 2.2.2. Comportamiento del capacitor de salida

La corriente  $I_{C2}$  de carga y descarga del capacitor de salida y su tensión coincidente con la de salida del convertidor, obtenidas a partir de la simulación, se muestran en la Fig. 8. También se ha superpuesto al gráfico, en otra escala, la tensión  $V_{CR}$  sobre el capacitor  $C_3$  a la salida del rectificador, para apreciar los efectos de su variación. De manera similar se muestra la corriente de salida dada por la suma de las corrientes sobre la carga simulada  $I_o = I_{R1} + I_{R2}$ .

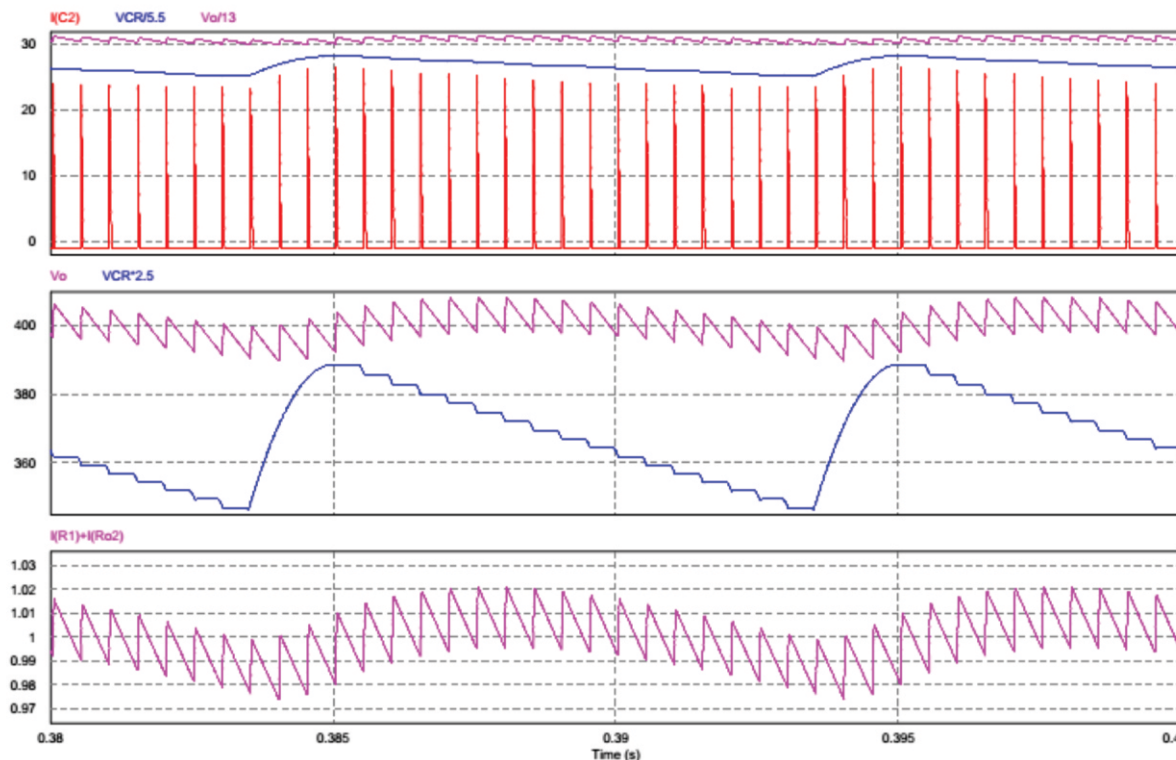


Fig. 8. Carga y descarga del capacitor de salida  $C_2$

### 2.2.3. Corrientes del capacitor de salida

La corriente  $I_{C2P}$  e  $I_{C2rms,AC}$  de carga y descarga del capacitor de salida  $C_2$ , cambia de acuerdo al estado de funcionamiento de la fuente. En la Fig. 9a se muestra el oscilograma que se obtuvo del simulador para una tensión de entrada de 110 V, con carga nominal, donde la corriente del capacitor  $I_{C2rms,AC} = 1,785A$ , con una  $I_{C2P} = 5,422A$ . En la Fig. 9b se muestra el oscilograma obtenido para una tensión de entrada de 220 V, manteniendo la carga nominal, donde la corriente del capacitor fue  $I_{C2rms,AC} = 1,583A$ , con una  $I_{C2P} = 4,378A$ .

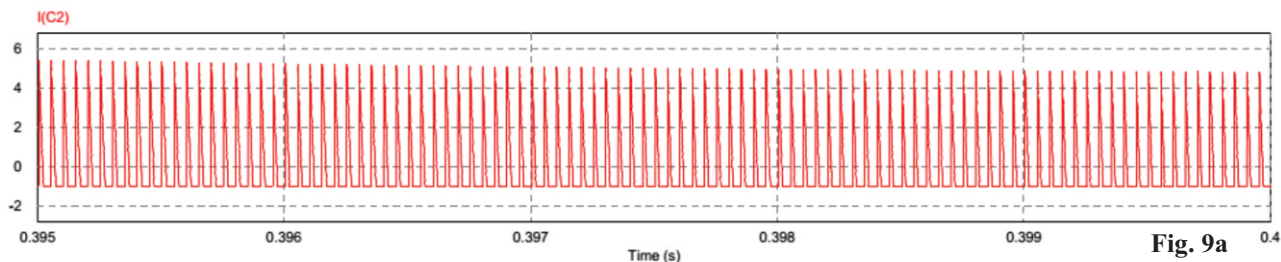
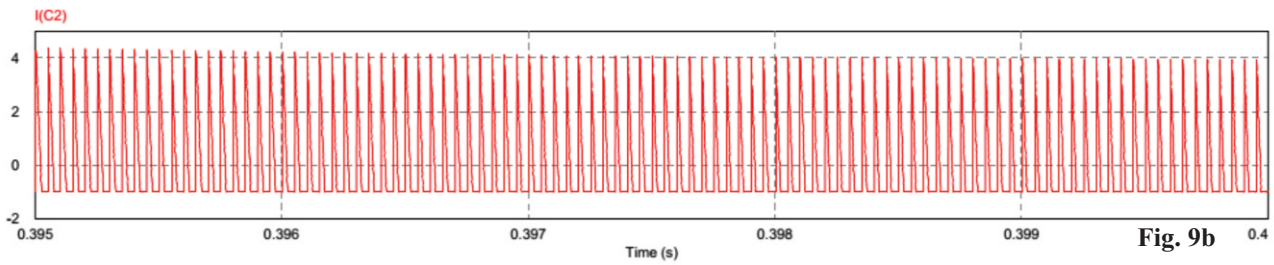


Fig. 9a



**Fig. 9.** Carga y descarga real del capacitor de salida C<sub>2</sub>

2.2.4. Hoja de datos del capacitor de salida

A partir de las hojas de datos de [31] se seleccionó un capacitor electrolítico de aluminio estándar de propósitos generales de la serie UVR de 47 μF y 450 V, con una máxima  $\tan \delta_{max} = 0,25$  y una típica  $\tan \delta_{tip} = 0,10$ , de código UVR2W470MHD, su vida útil es de 2000 horas a 85 °C, de capsula cilíndrica radial con diámetro  $D = 18\text{ mm}$  y longitud  $L = 40\text{ mm}$ . A partir de estos se obtuvieron datos auxiliares del catalogo general para determinar la vida útil esperada de los condensadores electrolíticos de aluminio, esto se analizó a continuación.

2.2.5. Vida esperada del capacitor de salida

Los factores que más afectan la vida de los condensadores electrolíticos de aluminio [28], [31] son la temperatura ambiente dada por el factor de temperatura ( $FT$ ), la corriente de ondulación o de rizado dada por el factor de corriente ( $FI$ ) y la tensión aplicada ( $FU$ ). La vida útil esperada se calcula multiplicando el tiempo de vida ( $L_0$ ) especificado en el catálogo del fabricante, por estos tres factores principales, de los cuales el más preponderante es  $FT$ . Este se basa en la teoría y en la ecuación de Arrhenius [26], [28], [31], conocida como la regla de "poder de dos" para la dependencia de la vida con la temperatura del núcleo del capacitor, esta relación duplica la vida útil por cada 10 °C que el núcleo del condensador trabaja por debajo de su temperatura nominal. Expresado matemáticamente como (3)

$$L_e = L_0 2^{\left(\frac{T_0 - T_n}{10}\right)} \tag{3}$$

Donde:  $L_e$  es la vida esperada;  $L_0$  es la vida nominal;  $T_0$  es la temperatura nominal y  $T_n$  es la temperatura del núcleo.

Como la temperatura del núcleo depende de la temperatura ambiente y de su auto calentamiento debido a las corrientes que circulan por el capacitor y disipan potencia sobre la resistencia serie equivalente (ERS) [28], [31], podemos incluir  $FI$  dentro de (3), calculando su aporte de calor a la temperatura del capacitor. Para esto se debió determinar la potencia sobre la ESR del capacitor  $P_C$  mediante (4), en la que se despreció la corriente de fuga  $I_{L,OC}$  por ser muy pequeña.

$$P_C = I_{C_{rms,AC}}^2 R_s + I_{L,CC} V_{C,OC} \cong I_{C_{rms,AC}}^2 R_s \tag{4}$$

Donde:  $P_C$  es la potencia absorbida por el capacitor;  $I_{C_{rms,AC}}$  es la corriente de ripple;  $R_s$  es la ESR;  $I_{L,OC}$  es la corriente de fuga y  $V_{C,OC}$  es la tensión aplicada.

Se determinó el valor de ESR  $R_s$  a partir de la hoja de datos del capacitor para frecuencia  $f = 120\text{ Hz}$  con (5).

$$R_{s0} = \frac{\tan \delta}{2\pi fC} = \frac{0,10}{2 \cdot \pi \cdot 120 \cdot 47 \cdot 10^{-6}} \Omega = 2,821 \Omega \quad (5)$$

Donde:  $R_{s0}$  es la ESR;  $\tan \delta$  es el factor de pérdida;  $f$  es la frecuencia de prueba y  $C$  el valor de la capacidad.

Se refirió la ESR a la frecuencia de trabajo por el coeficiente de frecuencia  $K_f = 1,6$  de la corriente de ripple nominal [28], con (6).

$$R_s = \frac{R_{s0}}{K_f^2} = \frac{2,821}{1,6^2} \Omega = 1,1 \Omega \quad (6)$$

Remplazando (4) la corriente del capacitor  $I_{C2rms,AC} = 1,583A$  que se obtuvo en la simulación en el punto 2.2.2 y el valor de ESR  $R_s = 1,1 \Omega$  calculado en (6) se calculó la potencia disipada por el capacitor en (7).

$$P_C \cong I_{C2rms,AC}^2 R_s = 1,58^2 \cdot 1,1 (W) = 2,74 W \quad (7)$$

La temperatura externa del capacitor aumenta hasta un punto donde la generación interna de calor se equilibra con la radiación de calor [5], [25], [28]. Esto depende de la potencia  $P_C$  disipada por el capacitor que se calculó en (7), del coeficiente de radiación térmica de la carcasa del capacitor  $\beta = 1,96 \cdot 10^{-3} (W / ^\circ C cm^2)$  [31], del área  $A = 25,5 cm^2$  de disipación de la carcasa cilíndrica del capacitor dadas por su diámetro  $D$  y longitud  $L$ ,

El aumento  $\Delta t_{sa} = t_a - t_{sc}$  de temperatura de la superficie del capacitor en el equilibrio con la temperatura ambiente  $t_a$  se calculó con (8).

$$\Delta t_{sa} = t_a - t_{sc} = \frac{P_C}{\beta \cdot A} = \frac{2,74}{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 25,5} ^\circ C = 54,8 ^\circ C \quad (8)$$

Donde:  $\Delta t_{sa}$  es el incremento de temperatura en la superficie del capacitor;  $t_a$  es la temperatura ambiente;  $t_{sc}$  es la temperatura en el cuerpo del capacitor;  $\beta$  es el coeficiente de radiación térmica y  $A$  es la superficie de radiación.

La temperatura del núcleo del capacitor se determinó con el coeficiente de aumento de temperatura en el núcleo  $\alpha = \Delta t_{sa} / \Delta t_{na} = 0,77$  [31], esto se calculó en (9).

$$t_n = t_a + \Delta t_{na} = t_a + \frac{\Delta t_{sa}}{\alpha} = t_a + \frac{54,8}{0,77} ^\circ C = t_a + 71,1 ^\circ C \quad (9)$$

Donde:  $t_n$  es la temperatura en núcleo del capacitor  $\Delta t_{na}$  es el incremento de temperatura en núcleo del capacitor;  $\alpha$  es el coeficiente de aumento de temperatura.

La vida esperada del capacitor que se obtuvo para una temperatura ambiente en el entorno al capacitor de  $20^\circ C$  aplicando (3) en (10) fue menor que la nominal, no alcanzando a dos meses.

$$L_e = L_0 2^{\left(\frac{T_0 - T_n}{10}\right)} = 2000 \cdot 2^{\frac{85 - 91,1}{10}} (hrs) = 1310 hrs \quad (10)$$

Se agregó ventilación forzada con un cooler estándar de  $0,01274 m^3/s$  de caudal de aire, con esto se logró cambiar la resistencia térmica natural del capacitor  $\theta_{sa} = 1 / \beta \cdot A$  en una resistencia térmica

forzada  $\theta_{saf} = 1/h \cdot A_e$  donde  $\beta$  se convierte en  $h = 9 \cdot 10^{-3} (W / ^\circ C cm^2)$ , que es el nuevo coeficiente térmico debido a la ventilación, por simplicidad lo consideramos constante y  $A_e$  es el área efectiva del capacitor que se corresponde con la mitad del área  $A$  de la cuba del mismo. El incremento de temperatura para las nuevas condiciones se da en (11)

$$t_{nf} = t_a + \Delta t_{naf} = t_a + \frac{\Delta t_{saf}}{\alpha} = t_a + \frac{P_C}{h \cdot A_e \cdot \alpha} = t_a + \frac{2,74}{9 \cdot 10^{-3} \cdot 12,75 \cdot 0,77} ^\circ C = t_a + 31 ^\circ C \quad (11)$$

Donde:  $t_{nf}$  es la temperatura en núcleo del capacitor con ventilación forzada  $\Delta t_{naf}$  es el incremento de temperatura en núcleo del capacitor;  $h$  es el coeficiente térmico.

La vida esperada del capacitor que se obtuvo para una temperatura ambiente en el entorno al capacitor de  $20 ^\circ C$  aplicando ventilación forzada se calculo con (12).

$$L_{ef} = L_0 2^{\left(\frac{T_0 - T_{nf}}{10}\right)} = 2000 \cdot 2^{\frac{85-51}{10}} (hrs) = 21112 hrs \quad (12)$$

Dónde:  $L_{ef}$  es la vida esperada del capacitor con ventilación forzada.

Se pudo apreciar el gran cambio de vida esperada del capacitor elegido obtenido en (10) con  $L_e = 1310 hrs$  equivalente a 1,8 meses, en comparación con el que se obtuvo en (12) con  $L_{ef} = 21112 hrs$  equivalente a 29 meses o 2,4 años.

### 3. Conclusiones

Este trabajo permite confirmar a través de un seguimiento estadístico de casos durante cuatro años que el principal causante de fallas en equipos electrónicos es la fuente de alimentación del mismo, además el 70% de estas son del tipo de conmutación electrónica o fuentes swiching, donde el componente responsable mayoritario de las fallas con un 61% es el capacitor y el 83% de estos casos es debido a su estrés o corta vida. La simulación nos permite obtener la exigencia eléctrica a la que son sometidos los capacitores y su relación con los datos del fabricante, establecer su vida útil esperada de acuerdo a su condición de servicio, que puede variar de unos pocos mese a varios años. Esto nos permite recomendar que se realice una evaluación de la vida esperada del capacitor durante el diseño para una correcta elección de los mismos de acuerdo a su destino y condiciones reales de trabajo permitiendo un adecuado proceso de fabricación. Como el factor preponderante en la vida del capacitor es la temperatura, la medición de la misma durante el mantenimiento predictivo y o correctivo en equipos electrónicos en funcionamiento facilita los datos necesarios para la implementación de adecuados protocolos que permitan determinar el tiempo de remplazo del capacitor antes que ocurra la falla.

### 4. Referencias

- [1] D. Biel, F. Guinjoan, E. Fossas, y J. Chavarria, "Diseño de control en modo deslizante de un convertidor de conmutación boost-buck para la generación de señales de CA", IEEE Trans. Circuitos Syst. Yo, Reg. Papeles, vol. 51, no. 8, pp. 1539 - 1551, agosto de 2004.
- [2] SAAVEDRA, Julián; FIRACAITVE, Jonathan y TRUJILLO, Cesar. Development board based on the TMS320F28335 DSP for applications of power electronics. Tecciencia [online]. 2015, vol.10, n.18 [citado 2017-12-14], pp.36-44. Disponible en: <[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-36672015000100007&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-36672015000100007&lng=es&nrm=iso)>.ISSN 1909-3667. <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2015.18.6>

- [3] F. Blaabjerg, C. Zhe y S. B. jaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, n° 5, pp. 1184-1194, 2004.
- [4] RAMIREZ-MURILLO, Harrynson et al. LMI Control Design of a Non-Inverting Buck-Boost Converter: a Current Regulation Approach. *Tecciencia* [online]. 2017, vol.12, n.22 [citado 2017-12-14], pp.79-85. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-36672017000100079&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-36672017000100079&lng=es&nrm=iso). ISSN 1909-3667. <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2017.22.9>.
- [5] H. Anocibar "Ondas" *Electrónica Analógica*, Dpto. De Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, UNaM, 02 Ondas 2018.
- [6] V. Kurtz "FUENTE DE ALIMENTACIÓN" *Electrónica y Dispositivos*, Dpto. de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, UNaM, 03 EyD 2018.
- [7] R. F. de Camargo, "Contribuição ao Estudo de Filtros Ativos de Potência," *Dissertação de Mestrado, PPGEE, Universidade Federal de Santa Maria*, Julho de 2002.
- [8] D. C. Martins, I. Barbi "Eletrônica de Potência - Conversôres CC-CC Básicos Nao Isolados" 2ª edição, 2006, CDU: 621.614.22.
- [9] R. F. de Camargo, "Técnicas para Correção do Fator de Potência", *Maestría en Ingeniería Electrónica*, Dpto. de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, UNaM, 2014.
- [10] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519-1992, 1993.
- [11] V. V. S. P. Kumar and B. G. Fernandes, "Active power decoupling topology with fault tolerant ability for a single phase grid connected inverter," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, 2015, pp. 003423-003428. doi: 10.1109/IECON.2015.7392629. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7392629&isnumber=7392066>
- [12] IEC-INTERNATIONAL STANDARD Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase) IEC - 61000-3-2, 2005.
- [13] "Manual para Correção do Fator de Potência", WEG, [www.weg.net](http://www.weg.net)
- [14] "Harmônicas nas instalações elétricas, Causas, efeitos e soluções", Procobre, Instituto Brasileiro do cobre.
- [15] W. A. Akagi "Instantaneous Power theory and Applications to Power conditioning". ISBN: 978-0-470-10761-4.
- [16] J. Arrillaga, N.R. Watson, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, Ltd, Second Edition, 2003
- [17] J. F. Hibbard, M. Z. Lowenstein "Meeting IEEE 519-1992 Harmonic Limits Using Harmonic Guard". Trans-Coil, Inc. [www.transcoil.com](http://www.transcoil.com)
- [18] Arrow Electronics. <https://www.arrow.com>
- [19] R. W. Erickson, D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Second edition. eBook ISBN: 0-306-48048-4. Print ©2001 Kluwer Academic/Plenum Publishers
- [20] L. Schuch, "Electrónica de Potência", *Maestría en Ingeniería Electrónica*, Dpto. de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, UNaM, 2014.
- [21] S. A. Saremi Hasari, A. Salemnia and M. Hamzeh, "High-efficiency voltage source converter with low switching power losses for application in islanded microgrids," in *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 10, pp. 1295-1304, 8 16 2017. doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0226. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8048597&isnumber=8048583>

- [22] A. M. S. S. Andrade, L. Schuch and M. Martins, "Analysis and Design of High-Efficiency Hybrid High Step-Up DC-DC Converter for Distributed PV Generation Systems," in *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. doi:10.1109/TIE.2018.2840496  
http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8370773&isnumber=4387790
- [23] V. Kurtz, "Capacitores" Dispositivos Electrónicos, Dpto. de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, UNaM, 02 DE 2018.
- [24] R. Munikoti, P. Dhar, "Low-voltage failures in multilayer ceramic capacitors: a new accelerated stress screen", Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on, Dec. 1988
- [25] J. Yan *et al.*, "The investigation and improvement of the lifetime of high voltage ceramic capacitor under repetitive frequency operation," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 4, pp. 2014-2024, 2017. doi: 10.1109/TDEI.2017.006275.  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8032570&isnumber=8032560>
- [26] V. V. S. Pradeep Kumar and B. G. Fernandes, "Switching strategy for improving the lifetime of dc-link capacitor in a fault-tolerant active power decoupling topology," in *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 52-61, 1 12 2018. doi: 10.1049/iet-pel.2017.0202.  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8272206&isnumber=8272122>
- [27] J. A. Olsson, G. A. Xander *et al.*, "ESTUDIO DE FALLAS EN FUENTES DE ALIMENTACIÓN CONMUTADAS DEBIDO AL ESTRÉS DE LOS CAPACITORES ELECTROLÍTICOS", Jornadas Científicas Tecnológicas - 45 Aniversario de la UNAM, resumen, mayo 2018.  
URL: <https://jornadas.sistemas.unam.edu.ar>
- [28] J. L. Stevens, J. S. Shaffer and J. T. Vandenharn, "The service life of large aluminum electrolytic capacitors: effects of construction and application," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 1441-1446, Sep/Oct 2002. doi: 10.1109/TIA.2002.802922
- [29] M. G. Olsson, "Electrónica Matias", Avelleneda 1171, Oberá, Misiones, Argentina. 2014 – 2018.
- [30] J. A. Olsson, G. A. Xander *et al.* "Convertidor Boost como pre regulador de Factor de Potencia", Maestría en Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería. 2014.
- [31] Nichicon, URL: [http://www.nichicon-us.com/english/products/alm\\_mini/index.html](http://www.nichicon-us.com/english/products/alm_mini/index.html)