

# Seguridad eléctrica eficiente mediante UPS en sistemas hospitalarios

Adda Ureña Solís

Departamento de Mantenimiento | Hospital Nacional  
aurena@hospitalnacional.com

Tipo de artículo: original

Fecha de recepción: 11 de julio de 2013

Fecha de aceptación: 14 de noviembre de 2013

**Resumen:** *la confiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico que alimenta a un hospital son características imprescindibles, ya que se utilizan equipos altamente sensibles y con un grado de precisión elevado, por lo que este punto juega un papel vital en este sector. Para asegurar la calidad de energía requerida, es necesario contar con una alimentación que pueda garantizar la continuidad eléctrica absoluta y que sea capaz de hacerle frente a cualquier falla o perturbación que pueda presentarse.*

*En este trabajo se ponen en evidencia los problemas fundamentales que justifican el diseño e instalación de un Sistema de Respaldo de Energía (UPS) eficiente, tomando en cuenta sus actuales y futuras necesidades.*

**Palabras claves:** *eficiencia eléctrica, confiabilidad eléctrica, continuidad eléctrica, seguridad eléctrica, inversor, UPS.*

**Title:** *Efficient Electrical Safety by Means of UPS in Hospital Systems.*

**Abstract:** *the reliability and efficiency of the electrical system that feeds a hospital are essential characteristics, since highly sensitive equipment with a high degree of accuracy are used, so this point plays a vital role in this sector. To ensure the required quality of energy, it is necessary to have a power supply that can guarantee absolute continuity and is able to cope with any fault or disturbance that may arise.*

*In this work, we show the fundamental problems that justify the design and installation of an efficient energy backup system (UPS), taking into account their current and future needs.*

**Keywords:** *electrical continuity, electrical efficiency, electrical reliability, electrical safety, inverter, UPS.*

## 1. Introducción

Normalmente, los hospitales cuentan, en su mayoría, con cargas no lineales, debido a que los equipos utilizan una configuración de diodos esafásicos en la entrada, que generan una corriente distorsionada, tanto en régimen estable como en condiciones de falla [1]. Para lograr en todo momento la continuidad de la forma de onda de la tensión con las características requeridas por la carga y con el mínimo

posible de THDv tanto en el lado de la carga como en la entrada del transformador de alimentación, se pueden usar diferentes dispositivos: uno de los más eficientes es el UPS. La mayoría de los sistemas UPS son diseñados con convertidores de entrada tipo esafásicos, pero estos ocasionan un contenido armónico más elevado comparado con un convertidor dodecafásico (ver expresión (1)). El esquema clásico de un UPS con convertidor dodecafásico se muestra en la Figura 1.

Como se observa en la figura, la entrada del UPS es a través de un transformador trifásico, donde los secundarios están conectados en delta y estrella para lograr que las salidas del transformador estén desfasadas 30° entre ellos. Por lo que, arreglando el valor de la tensión para que en las dos salidas haya el mismo valor, se alimentan los dos convertidores de manera tal que cada uno hace seis conmutaciones en cada período de la tensión de red, es decir, cada 16.66 ms. Se consigue un desfase de 30° desde la entrada del transformador de alimentación, de manera que son vistos como un solo convertidor dodecafásico [2]. Este efecto permite una reducción de armónicos, ya sea en el lado de corriente alterna como en el de corriente directa [2],[3], o sea, hacia las baterías.

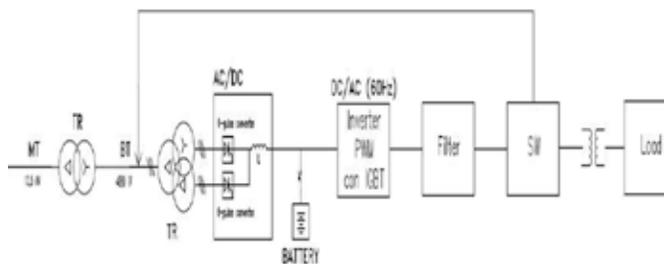


Figura 1. Esquema clásico de un UPS con convertidor dodecafásico.

El contenido de armónicos de corriente generado en un convertidor que trabaja en condiciones ideales, es decir, alimentado con potencia de cortocircuito infinita, se define con la siguiente ecuación:

$$n = kp \pm 1 \text{ con } I_n = I/n \quad (1)$$

donde  $n$  es el orden del armónico,  $k$  es un número entero (1, 2, 3, ...),  $p$  es el número de pulsos de cada período de la tensión e  $I_n$  es la amplitud del armónico de orden  $n$ .

En este caso, si los dos convertidores trabajan de manera correcta, la 5ª y la 7ª armónica (las más elevadas en módulo) desaparecen [3] y la primera armónica en el lado de corriente alterna (a.c.) será la armónica 11ª, la cual se puede reducir en gran medida si se introduce un filtro shunt con una buena eficiencia, logrando también reducir, aunque, en menor medida la armónica 13ª [4] y las sucesivas.

En el lado de corriente directa el convertidor dodecafásico alimenta siempre y controladamente las baterías con un rizo reducido en relación a un convertidor esafásico. La siguiente etapa es un filtro de primer orden (inductor) cuya función es reducir aún más el rizo, aumentando por esta razón la vida útil de las baterías que son un elemento importante para garantizar la autonomía que el UPS pueda brindar a los equipos puesto que realizan las siguientes funciones:

- Eliminan el pequeño residuo del rizo en el lado de corriente directa mejorando la calidad del PWM (*Pulse Width Modulation*) del inversor.
- En función de la cantidad de Amper-hora total, fijan la autonomía necesaria para la carga que alimenta en condiciones de ausencia de energía eléctrica.

La autonomía del UPS tiene que ser suficiente, como mínimo para el tiempo necesario de la operación quirúrgica más larga que se puede afrontar en el hospital. Debido a ello, los tiempos requeridos de autonomía pueden ser considerables; por eso todas las posibilidades deben ser tomadas en cuenta para maximizar la garantía de continuidad absoluta de energía. En condiciones de ausencia de alimentación prolongada, debe existir la posibilidad de cargar la entrada del UPS a través de una planta eléctrica externa, de forma que se garantice una entrada de energía que conlleve a mantener la condición de autonomía para abastecer con seguridad el servicio requerido. Naturalmente, la autonomía de las baterías es proporcional a la carga real del UPS, entonces es mayor cuanto menor es la carga. El Departamento de Mantenimiento del hospital debe contar con un plan de acción en caso de ausencia de energía eléctrica en la entrada, tal como:

**Paso 1 (Maximización de la autonomía):** proceder a desconectar coordinadamente, en forma automática o manual, con un criterio técnico basado en la necesidad médica, las cargas bajo UPS que no sean vitales en este período de tiempo, para aumentar la autonomía establecida de la máquina.

**Paso 2:** en caso de extenderse la ausencia de energía, realizar una interconexión a una planta externa, de forma que el sistema pueda seguir funcionando normalmente con un flujo de entrada continuo.

## 2. Inversor

Tal como hemos visto anteriormente, la eliminación del rizo en el lado de corriente directa permite al inversor trabajar en condiciones óptimas. Este tiene que trabajar con una portadora a frecuencia bastante elevada como en la figuras 2 y 3. Así que la primera armónica de tensión, que se encuentra antes del filtro de salida, es de valor muy elevado [5], por ello este filtrado es indispensable para garantizar una salida óptima hacia la carga, es decir, con THDv insignificante.

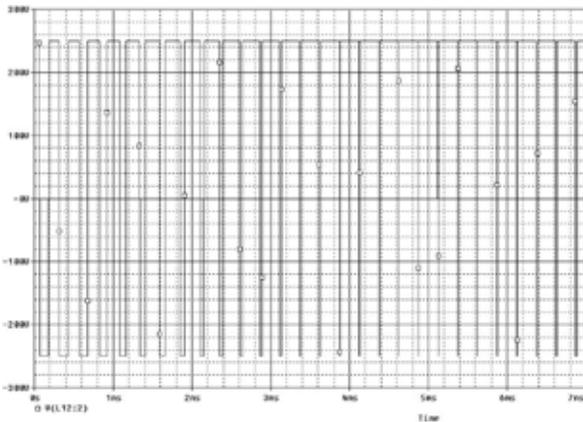


Figura 2. Simulación de la portadora y modulante de un inversor que trabaja en PWM.

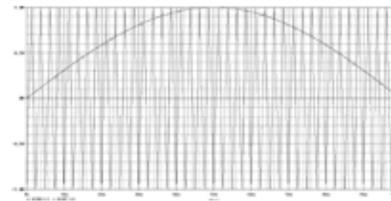


Figura 3. Forma de onda del inversor del UPS modulada con portadora sinusoidal, como aparece en la figura 2.

Arreglando el ciclo de trabajo de la portadora en función de la variabilidad del valor eficaz del voltaje de salida, el voltaje será estable en la carga.

Es oportuno recordar que un inversor a PWM con el cociente  $m_f$ , entre la frecuencia de la portadora y de la modulante  $m_f = f_p/f_1$ , el contenido armónico es del tipo [5]:  $m_f \pm 2 = 31.8\%$ ,  $m_f \pm 4 = 1.85\%$ ,  $2m_f \pm 1 = 18.1\%$ ,  $2m_f \pm 3 = 21.2\%$ ,  $2m_f \pm 5 = 3.3\%$ , etc.

Si la frecuencia de la portadora es 3Khz, la primera armónica de voltaje que se encuentra en el ancho de banda es 2.88Khz.

## 3. UPS modificado

La implementación del UPS utilizado es un poco diferente por las características y necesidades propias del hospital analizado. El esquema diseñado se muestra en la siguiente figura:

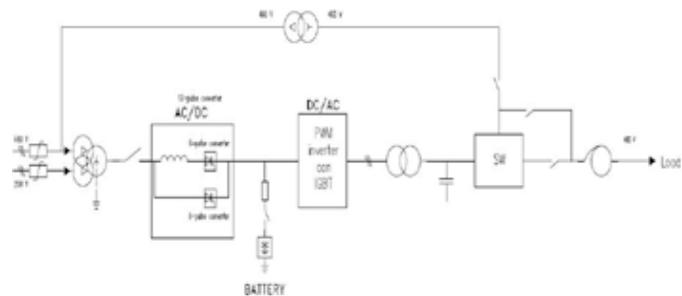


Figura 4. Esquema real con posibilidad de dos alimentaciones para poder garantizar la utilización de plantas externas.

La diferencia más importante con el esquema clásico es que el transformador tiene solo un secundario y dos primarios, lo que permite utilizar, para la alimentación de entrada, dos posibles voltajes, o sea 208 Veff y 480 Veff. Se optó por esta solución para tener una mayor garantía que, en caso de una ausencia de energía por un tiempo prolongado, la unidad puede ser alimentada desde un Grupo Electrógeno que estuviera disponible a cualquiera de los valores de tensión, condición que aumenta la posibilidad de continuidad de alimentación de entrada del UPS, pero se debe tomar en cuenta la compatibilidad de la relación entre la potencia aparente de la misma planta con la potencia aparente del UPS como se describe en [6]. Sin embargo, es de fundamental importancia limitar el THDV entre rangos aceptables ( $THDV \leq 8\%$ ), cuando se alimenta el UPS con una Planta Eléctrica. Si se alimenta el UPS con un transformador los daños generados por una THDV

pueden ser evidentes en un tiempo más o menos largo, pero con una alimentación de planta eléctrica se podría ver una inestabilidad de la regulación del voltaje y el generador podría apagarse [6].

En el esquema de la Figura 4 el desfase de 30° se consigue con el inductor que se encuentra antes de uno de los dos convertidores y el voltaje se arregla con el transformador instalado delante del segundo convertidor. Es importante decir que por razones de las cargas eléctricas fue necesario sobredimensionar los IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) del inversor, de forma que trabajan bien por más de 60 seg. al 150% de su potencia nominal.

Esto es a consecuencia de que en las máquinas para imágenes, el pico de corriente puede ser también de 10 a 15 veces el valor de la corriente de régimen por tiempos comprendidos entre 5 o 6ms [Tabla 1].

Tabla 1. Factores de carga de diferentes equipos.

	Continuous Power Demand (KVa)	Max momentary current (Amp.)	
Angiógrafo	20	228	0.90
Tomógrafo	30	125	0.85
Resonancia Magnética	18	88	0.90
Fluoroscopio	4.6	151	0.73

También en esta condición operativa el voltaje del UPS no tiene que distorsionar y por esto se ha utilizado un auto transformador de salida con una Vcc muy baja (≈1%). La inductancia para filtrar la forma de onda de la Fig. 3 es la reactancia equivalente del transformador que se encuentra antes de los Interruptores (SW); ésta, junto con los capacitores, constituyen un filtro LC que ve una carga con PF≈1, entonces es casi resistiva.

#### 4. Filtro de salida del UPS

La función de transferencia de este filtro está dada por:

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + (\omega LG)^2}} \quad (2)$$

en donde  $\omega_0$  es la frecuencia natural de LC y G la conductancia equivalente de la carga. En función de la portante elevada y de la resistencia equivalente de la carga, el módulo de la función de transferencia se puede reducir, con buena aproximación, de la siguiente manera:

$$|H| \cong \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 = \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \quad (3)$$

Se establece un valor para |H| en un primer momento muy pequeño (lo que equivale a  $\omega_0$  baja), en el ancho de banda que se quiere reducir, o sea, empezando de  $(mf - 2)$ ; entonces si es conocida

L (debida a la potencia de cortocircuito del autotransformador) y el valor de |H|, se puede conocer también la capacidad del filtro. Si la frecuencia de la portante es  $f = 3\text{KHz}$  ( $50^\circ\text{arm.}$ ), si por ejemplo se hace  $f_0 = 8^\circ\text{armónica}$ , resulta  $|H| \approx 0.03$ , o sea, la primera armónica del inversor es reducida desde el 31.8% al 0.8%; tal y como se muestra en el gráfico de la Figura 5.

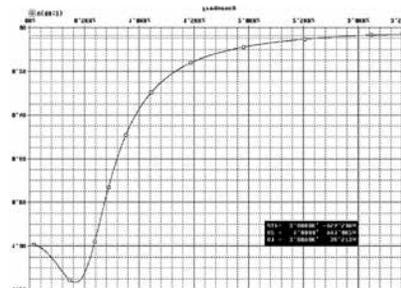


Figura 5. Función de transferencia del filtro de salida del inversor.

En la Figura 6 se puede ver la forma de onda a la salida del inversor, la cual será todavía filtrada por la inductancia de la línea hasta la carga (≈65μH); en esta situación operativa el THDv resulta ≤1%

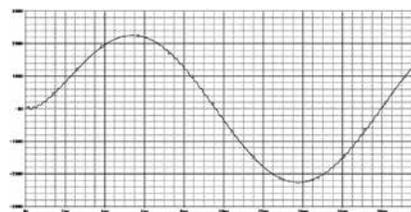


Figura 6. Forma de onda sinusoidal después del filtro a la salida de UPS.

#### 5. Filtro del lado de la alimentación

Para calcular los datos necesarios y evaluar la eficiencia del filtro shunt hacia el transformador de alimentación tenemos que:

- a. El voltaje de cortocircuito del transformador de 300KVA que alimenta el UPS ( $V_{ccTR} \%$ ) se toma como un 5%, entonces la potencia de cortocircuito del transformador que alimenta el UPS es:

$$S_{ccTR} = 300\text{KVA} \times 20 = 6 \text{ MVA}$$

- b. La media tensión (MT) tiene una corriente de cortocircuito de 5,710A con  $V_{eff} = 13.2 \text{ KV}$ , entonces su potencia de cortocircuito  $S_{ccMT} = 130 \text{ MVA}$ . Conocido este valor se puede aplicar la siguiente ecuación (4) para calcular la impedancia  $Z_{eq}$  vista de la entrada de la UPS a la entrada de la red:

$$Z_{eq} = Z_{TR} + Z_{redMT} = Z_{TR} \left(1 + \frac{Z_{redMT}}{Z_{TR}}\right) \quad (4)$$

La impedancia de cortocircuito es inversamente proporcional a la potencia de cortocircuito, o sea  $S_{cc} = V^2/Z_{eq}$ .

Entonces podemos decir que la impedancia equivalente vista del lado de baja tensión (BT) es:

$$Z_{eq} = Z_{TR} \left( 1 + \frac{S_{ocTR}}{S_{cared}} \right) = Z_{TR}(1.046) \approx Z_{TR}$$

Esto significa que la impedancia vista desde la entrada de el UPS es aproximadamente el valor de la impedancia del transformador. Por lo tanto, ZTR vale:

$$Z_{TR} = \frac{V^2}{S_{ocTR}} = \frac{480^2}{6 \times 10^6} = 3.84 \times 10^{-2} \Omega$$

Este valor se emplea para evaluar su eficiencia y demostrar cómo se reduce el contenido de armónicos de voltaje (THDv) en la red.

El filtro se puede desarrollar haciendo la relación cerca de la primera armónica de corriente que se encuentra generada del convertidor dodecafásico, es decir, la 11° armónica y verificar que hay una reducción también de las componentes armónicas sucesivas (arm. 13°, 23°, 25°...).

El filtro shunt tiene que hacer dos funciones:

- la compensación constante fija del reactivo inductivo de la fundamental de corriente debido a la regulación del convertidor dodecafásico;
- reducir el contenido armónico de corriente y, por ende, del voltaje lado BT. A través de mediciones se evaluó en 45 KVA la potencia reactiva capacitiva para una compensación a un FP (factor de potencia) más o menos de 0.98; esto significa 15 KVA cada fase. El valor de la capacidad se calcula según el esquema de la Figura 1 con la expresión (6).

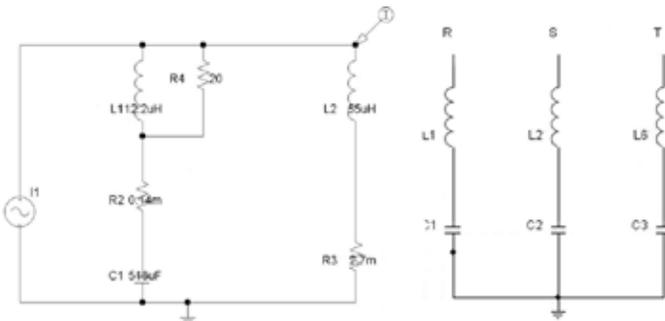


Figura 7. Esquema del filtro conectado a estrella y sin resistencia serie equivalente. En realidad, en bajo voltaje, los condensadores serán conectados en delta.

Si la potencia reactiva capacitiva es de 45 KVA con voltaje 480 V, entonces:

$$(6) \quad \frac{n^2}{n^2 - 1} V^2 \omega C = 45000 \quad \text{o sea } C = 518 \times 10^{-6} \text{ F}$$

en donde  $n$  es el orden de multiplicidad armónica y  $n^2/(n^2 - 1)$  evalúa la sobre-elevación del voltaje en los condensadores del filtro shunt.

El valor de la inductancia se puede calcular con la expresión:

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \quad L = \frac{1}{\omega^2 C} = 122.2 \mu\text{H}$$

para la componente armónica 11° [6].

Se debe también calcular el valor de la resistencia en serie del inductor que sirve para evaluar su calentamiento (pérdida de potencia activa) y la eficiencia del filtro. Por esto, se necesita un inductor que tenga una pequeña resistencia a la frecuencia de la armónica que se debe reducir, o sea, en este caso la componente 11°. En general, para estos inductores contruidos en material magnético, el factor de calidad  $Q = (n\omega L)/(ReqL)$  tiene un orden de magnitud de 30, entonces se puede decir que la ReqL del filtro es 13mΩ por  $n = 11^\circ$  arm.

Ahora los datos se conocen y se puede hacer una simulación para ver su comportamiento y su eficiencia. El esquema utilizado es aquel de la Fig. 8 en donde el paralelo con el inductor L1 aparece una resistencia cuya función es reducir una posible resonancia en paralelo.

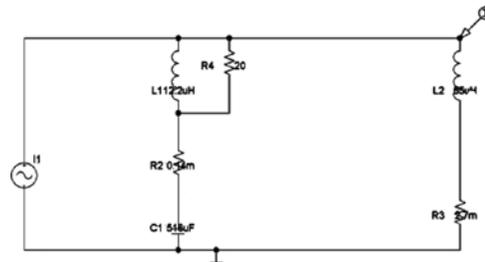


Figura 8. Esquema monofásico utilizado para evaluar la eficiencia del filtro.

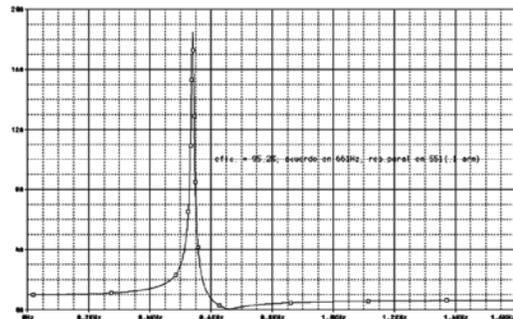


Figura 9. Gráfico en el dominio de la frecuencia.

En la Figura 9 se observa la respuesta en la frecuencia del filtro, con una eficiencia del 95% a la 11° arm. y de 60% a la 13° arm.; también se reducen los armónicos superiores a la 13° arm. La resonancia paralelo se encuentra en  $n = 9.1$ . También se puede observar que se reducen un poco ( $\approx 30\%$ ) las componentes armónicas 23 y 24.

La potencia de la resistencia paralelo al inductor R4 tiene que ser evaluada en el punto de frecuencia donde tiene la máxima amplificación de corriente (frecuencia de resonancia paralelo), entonces es suficiente dar al generador de corriente el valor real de la corriente de 11° arm generada desde el UPS (32.2 Aeff a la potencia nominal) para verificar que, en condiciones de resonancia paralelo, la caída en el inductor es de 300V, equivalente a una potencia sobre el resistor de 3 KW; pero

en condiciones de régimen y fuera de cualquier resonancia, la potencia es menor de 1 W, entonces en condiciones normales de operación, no hay una disipación significativa de energía. Se podría también asumir que a frecuencia mas baja la resonancia paralelo se encontraría a un valor de frecuencia con mayor seguridad. Pero como se puede ver en la Figura 10, se pierde un poco en eficiencia.

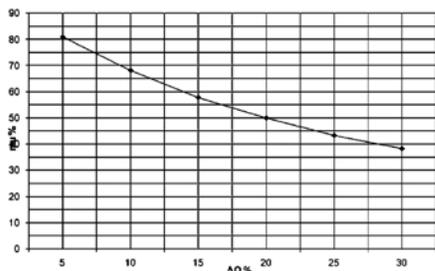


Figura 10. Pérdida de eficiencia del filtro cuando disminuye la frecuencia de resonancia.

Por otro lado, la Norma Std 519 (USA) define los límites de corriente de distorsión (Max THDi) en función de ISC/IL, siendo ISC la corriente de cortocircuito en el PCC (Punto de Conexión Común), e IL la corriente nominal.

Por los datos que tenemos, resulta:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} \cong 60$$

y por este valor del TDD (Total Demand Distorsión) aceptable es  $\leq 12\%$ . Entonces, se evaluarán los valores más elevados de corrientes armónicas que se inyectan en la red en la condición operativa de UPS. Recordando la reducción del  $11^\circ$  y  $13^\circ$  arm debido al filtro shunt y tomando como hipótesis de que las corrientes armónicas son calculadas bajo la premisa que el ángulo de sobre posición de los tiristores (overlap) es igual a cero (condición ideal correspondiente a una potencia de cortocircuito infinita).

Los valores calculados son:  $11^\circ$  arm. = 0.55 A,  $13^\circ$  arm. = 3.7 A,  $23^\circ$  arm. = 5.2 A,  $25^\circ$  arm. = 4.8 A. Aplicando la siguiente fórmula:

$$I_{TDD} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum I_n^2}}{I_L} = 6.5\% < 12\%$$

se demuestra que la distorsión total de corriente resulta un poco más de la mitad del valor permitido y el THDv  $\leq 1\%$  como se ha dicho antes. Medidas experimentales confirman este dato.

## Conclusiones

La seguridad en los sistemas eléctricos hospitalarios es de fundamental importancia para el diagnóstico médico por imágenes, asegurando la mejor calidad posible de alimentación eléctrica, para evitar los problemas típicos de las redes de baja y media tensión (transitorios, flicker, armónicos, caída total del voltaje). Ya sea por uso en operaciones de cirugía muy sensitivas, se asegura también la continuidad absoluta por el tiempo necesario para dichos procedimientos médicos.

En este artículo se han descrito las características necesarias para un UPS dedicado a esta utilización, poniendo en evidencia los parámetros del sistema UPS-trasformador de forma que se pueda optimizar la salida de la máquina y la compatibilidad UPS vs alimentación eléctrica.

## Agradecimiento

Este documento ha sido concebido con el propósito de mantener una bibliografía especializada técnica para el Hospital Nacional, institución hospitalaria pionera en el uso del sistema eficiente de respaldo UPS en Panamá para protección eléctrica de equipos altamente sensibles y de diagnósticos, a la que agradecemos profundamente la colaboración en todo momento para el desarrollo de este documento.

Igualmente, al Ingeniero Mauro Loggini, experto Profesor de la Universidad Bologna y Ferrara por su valiosa asesoría técnica en temas de eficiencia energética y protección eficiente de sistemas eléctricos.

## Referencias

- [1] "IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters" IEEE 519.
- [2] Albert Kloss, BBC "A Basic Guide to Power Electronics" John Wiley & Sons 1984.
- [3] J.Arrillaga, L.I.Eguiluz, "Armonicos en Sistemas de Potencia" Universidad de Cantabria Electra de Viesgo, 1994.
- [4] D.E.Steeper, R.P. Stratford, "Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems using Thyristor Converters" IEEE Trans.I.A., vol IA-12 No..3, 1976.
- [5] Ned Mohan, Tore M.Undeland, William P.Robbins "Power Electronics: Converters, applications and Design" John Wiley & Sons 1989.
- [6] Chloride Silectron Consulting "La progettazione dell'alimentazione elettrica con gruppi statici di continuità", seconda edizione 12 febbraio 2002.