

# Compensación Reactiva en Sistemas Eléctricos Industriales con Presencia de Armónicos

**Ing. Carlos L. Frutos C.**  
Universidad Nacional del Este  
Ciudad del Este – Paraguay  
carlosluisfrutos@yahoo.com

**Resumen:** Las distorsiones armónicas en las redes eléctricas vienen aumentando con el crecimiento de las cargas no lineales. En este contexto existe riesgo de resonancia cuando la reactancia del banco de capacitores utilizado para corrección de factor de potencia se iguala con la reactancia de la red de alimentación. Al producirse este fenómeno las corrientes y tensiones armónicas aumentan de valor pudiendo alterar el normal funcionamiento de cargas sensibles y, en casos extremos, pudiendo dañar el banco de capacitores. Para evitar la posibilidad de que se produzca el fenómeno de resonancia se propone la corrección de factor de potencia por medio de un dispositivo basado en un convertidor CA/CA en sustitución al banco de capacitores. Este dispositivo introduce una tensión, variable en amplitud y desfase, en serie con la carga. Fue verificado mediante simulación que dicha tensión consigue colocar la corriente de carga en fase con la tensión suministrada por la red de alimentación y así tener factor de potencia cercano a 1. También fue construido un prototipo para validar los resultados obtenidos por simulación y verificar la viabilidad técnica de esta propuesta teórica.

**Palabras clave:** armónicos, resonancia, factor de potencia, banco de capacitores, compensación reactiva serie.

**Abstract:** Harmonic distortions occur with increasing magnitude with the substitution of linear loads by other intermittent energy consumers. In this context there is a risk of resonance when the reactance of capacitor banks used for power factor correction is equal to the reactance of the power supply. When this phenomenon occurs harmonic currents and voltages increase in value and may disrupt the normal operation of sensitive loads and in extreme cases can damage the capacitor bank. To avoid the possibility that the resonance phenomenon occurs, the power factor correction is proposed by means of an AC / AC converter-based device replacing the capacitors bank. This device introduces a voltage, variable in amplitude and phase shift, in series with the load. It was verified by computer simulation that this voltage gets to place the load current in phase with the voltage supplied by the mains and thus have power factor close to 1. It was also built a prototype to validate the simulation results and verify the technical feasibility of this theoretical proposal.

**Keywords:** harmonics, resonance, power factor, capacitors bank, series reactive compensation.

## 1. Introducción

Una carga no lineal es aquella que drena una corriente no senoidal cuando es alimentada por una fuente de tensión senoidal. Es un dispositivo eléctrico que en estado estable de operación tiene una impedancia que varía durante el ciclo de la forma de onda de entrada. [1]. Las cargas no lineales conectadas a sistemas de energía eléctrica incluyen convertidores estáticos de potencia, dispositivos de descarga de arco, dispositivos magnéticos saturados y, en menor grado, las máquinas giratorias.

Los convertidores estáticos de energía eléctrica son las mayores cargas no lineales y se utilizan en la industria para una variedad de propósitos, tales como fuentes de alimentación, variadores de velocidad y sistemas de alimentación ininterrumpida.

Las cargas no lineales cambian la naturaleza senoidal de la corriente de alimentación, lo que resulta en el flujo de corrientes armónicas que pueden causar interferencias en circuitos de comunicación y otros tipos de equipos. Estas corrientes armónicas también conducen a la operación inadecuada de la protección y a mayores pérdidas y sobrecalentamiento en numerosos

dispositivos electromagnéticos como motores y transformadores.

Dado que el número de cargas que producen armónicos viene aumentando con los años, se ha vuelto cada vez más necesario hacer adaptaciones en las instalaciones para hacer frente a sus influencias, incluyendo las instalaciones de bancos de capacitores. Cuando son utilizados capacitores para mejorar el factor de potencia, pueden producirse condiciones resonantes en un dado armónico, dando lugar a altos niveles de tensión armónica y distorsión de la corriente, transformándose en una preocupación de rutina [2].

Siempre que un banco de capacitores es añadido a una red o se cambia el tamaño de uno existente, los planificadores del sistema deben verificar si la instalación propuesta puede resonar con el sistema, y si hay una resonancia entonces el problema es grave, pues los capacitores no podrán sobrevivir mucho tiempo en tales ambientes [3].

Sin embargo, no todas las condiciones de resonancia causarán contratiempos, siendo necesario analizar adecuadamente la aplicación de bancos de capacitores en sistemas de potencia con altas corrientes armónicas para determinar la gravedad de la resonancia.

En ese contexto, el objetivo de este trabajo es presentar la propuesta de corrección de factor de potencia en instalaciones eléctricas industriales por medio de un convertidor CA/CA conectado en serie con la carga y que inyecte una tensión de 50 Hz variable en amplitud y desfase con respecto a la tensión de la red. De esa manera se busca no utilizar bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia y así evitar que se produzca el fenómeno de resonancia. Al no existir la posibilidad de amplificación de armónicos no hará falta la aplicación de dispositivos para la atenuación de los mismos. Por tanto, se propone la convivencia con los armónicos, teniendo como condición de que las cargas no lineales instaladas no deben producir corrientes armónicas de valores superiores a los límites establecidos por las normas correspondientes.

El convertidor CA/CA propuesto está inspirado en el dispositivo denominado Static Synchronous Series Compensator (SSSC) que es utilizado en líneas de transmisión como compensador serie de reactivos.

La propuesta teórica se valida por medio de simulación en computador utilizando el programa CircuitMaker y además con pruebas en un prototipo de 1 kVA de potencia de salida.

## 2. Armónicos en sistemas de distribución de energía

Una de las preocupaciones más recientes en la operación de los sistemas de distribución de energía eléctrica es el aumento de las cargas no lineales. Este tipo de cargas puede introducir contaminación armónica, deformar tensiones y corrientes senoidales, producir resonancias, incrementar las pérdidas del sistema y reducir la vida útil de los equipos eléctricos. Los armónicos son uno de los mayores problemas que afectan la calidad de la energía, lo cual requiere un cuidadoso análisis de su generación y de los daños que pueden ocasionar [4].

### 2.1. Cargas lineales y no lineales

En las cargas lineales la aplicación de una tensión senoidal resulta en el flujo de una corriente senoidal, que equivale a decir que tienen una impedancia que no varía durante la aplicación de la tensión senoidal. En un dispositivo no lineal la aplicación de una tensión senoidal no resulta en el flujo de una corriente senoidal y puede inclusive ser discontinua [4].

Se estima que en los próximos 10 años más de la mitad de las cargas conectadas en las redes de distribución serán no lineales. Esto genera preocupación respecto a los efectos en el funcionamiento de equipos eléctricos, pues también es creciente el número de cargas sensibles a la baja calidad de la energía eléctrica [4].

Aunque la expansión en el uso de la electrónica de potencia conduce a una mayor productividad, esto es fuente de ruido eléctrico y armónicos, y al mismo tiempo estos equipos son menos tolerantes a la baja calidad de la energía eléctrica. Algunos ejemplos de cargas no lineales con creciente participación en los sistemas eléctricos son: hornos de arco, molinos

eléctricos, fuentes llaveadas, tracción eléctrica, cargadores de baterías y equipos informáticos [4].

### 2.2. Generación de armónicos de corriente en convertidores estáticos de potencia

Una de las principales fuentes de armónicos en los sistemas de distribución son los convertidores de potencia, rectificadores, inversores y controladores de velocidad de motores eléctricos [4].

Un tipo de convertidor de potencia utilizado en redes industriales se muestra en la figura 1. Es un convertidor CA/CC tipo puente monofásico cuyos semiconductores son diodos de potencia [5].

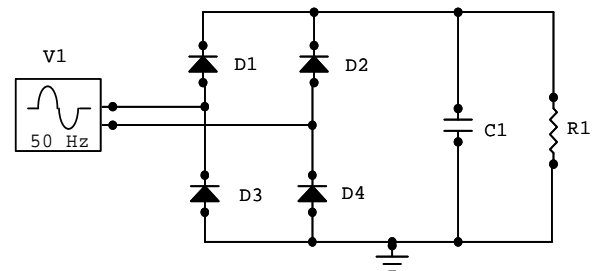


Fig. 1. Convertidor CA/CC.

En el ciclo positivo de  $v_1(t)$ , y cuando la tensión de la fuente es superior a la tensión sobre el capacitor C1, los diodos D1 y D4 conducen y se comportan como llaves cerradas. En el ciclo negativo de  $v_1(t)$ , y cuando la tensión de la fuente es superior a la tensión sobre el capacitor C1, los diodos D2 y D3 son los que conducen [5].

La forma de onda de corriente drenada de la fuente se muestra en la figura 2, verificándose que es de tipo periódica no senoidal.

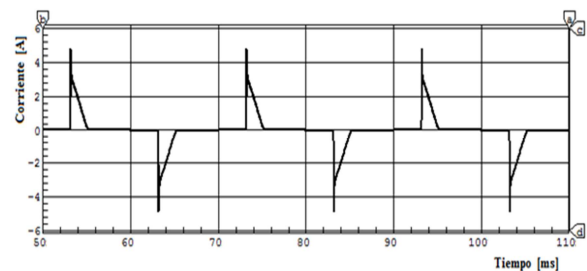


Fig. 2. Forma de onda de la corriente drenada de la fuente de alimentación por el convertidor CA/CC de la figura 1 [5].

De acuerdo con la Serie de Fourier, toda forma de onda periódica no senoidal puede descomponerse en  $n$  ondas senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental, las cuales se denominan armónicos. El espectro de armónicos de la forma de onda de corriente de la figura 2 tiene la forma que se muestra en la figura 3. Se visualizan la componente fundamental de 50 Hz y armónicos de frecuencia impar (150, 250, ... Hz) hasta el armónico de orden  $n = 11$ .

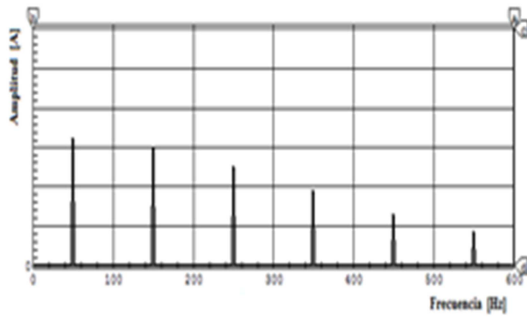


Fig. 3. Forma característica del espectro de armónicos de la corriente drenada de la fuente de alimentación por el convertidor CA/CC de la figura 1.

Estos armónicos de corriente son equivalentes a tener fuentes de corriente en paralelo con la fuente de alimentación [6], conforme muestra la figura 4.

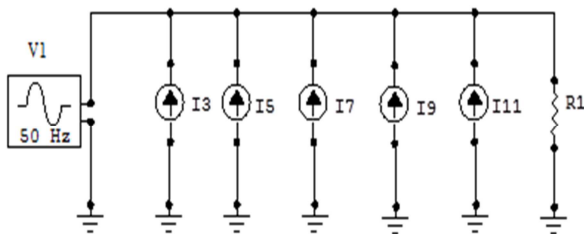


Fig. 4. Los armónicos de corriente de la figura 3 como fuentes de corriente en paralelo con la fuente de alimentación [6].

Los armónicos de corriente circulan por la fuente de alimentación, provocan caídas de tensión sobre la inductancia de la fuente y crean armónicos de tensión de la misma frecuencia que los respectivos armónicos de corriente [7].

Si  $L_1$  representa la inductancia de la fuente de alimentación de la figura 4, la caída de tensión que provoca cada corriente armónica está dada por la ecuación (1) [7].

$$v_{1n}(t) = 2\pi f_n L_1 I_n \quad \text{con } n = 3, 5, 7, 9 \text{ y } 11 \quad (1)$$

Estas caídas de tensión provocan la aparición de tensiones armónicas de las mismas frecuencias que las corrientes armónicas.

### 2.3. Normas relativas a la generación de armónicos de corriente

Al tratar el problema de la generación de armónicos en redes de distribución se debe tener presente que existen normas internacionales que limitan los valores de los mismos, de forma a evitar perturbaciones.

Como ejemplo puede ser citada la norma IEC 6100-3-2:2014 [8], que establece los límites de corrientes armónicas que pueden producir diversos tipos de cargas no lineales.

En la Tabla 1 se indican los valores para cargas trifásicas equilibradas.

Tabla 1. Límites de emisión de armónicos de corriente para cargas trifásicas equilibradas con corrientes  $\leq 16$  A por fase [8].

Armónicos impares Orden armónico $n$	Máxima corriente armónica admisible (A)	Armónicos pares Orden armónico $n$	Máxima corriente armónica admisible (A)
3	2,30	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,30
9	0,40	$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$
11	0,33		
13	0,21		
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$		

La norma complementaria es la IEC 6100-3-12:2011 que establece los límites de corrientes armónicas que pueden producir diversos tipos de cargas no lineales que drenan entre 16 y 75 A por fase.

Otra norma utilizada internacionalmente para limitar la emisión de armónicos de corriente por cargas no lineales es la IEEE 519:2014 [2].

### 3. Corrección del factor de potencia

La mayor parte de las cargas inductivas utilizadas en las redes de distribución industriales se alimentan en corriente alterna. Siendo  $v(t)$  e  $i(t)$  la tensión y la corriente suministradas por fase a dichas cargas, definidas como:

$$v(t) = \sqrt{2} V_{ef} \text{sen}(2\pi ft) + \alpha \quad (2)$$

$$i(t) = \sqrt{2} I_{ef} \text{sen}(2\pi ft) + \beta \quad (3)$$

Las potencias aparente, activa y reactiva consumidas por las mismas son [18]:

$$S = V_{ef} \cdot I_{ef} \quad (4)$$

$$P = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \phi \quad (5)$$

$$Q = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \text{sen} \phi \quad (6)$$

siendo  $\phi = (\alpha - \beta)$  el ángulo de desfase entre  $v(t)$  e  $i(t)$ .

La potencia reactiva es necesaria para crear los campos magnéticos que requieren los motores eléctricos y transformadores para su funcionamiento, pero no se traduce en potencia utilizable [5].

Se define como factor de potencia de una carga lineal a la relación:

$$FP = P/S = (V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \phi) / (V_{ef} \cdot I_{ef}) = \cos \phi \quad (7)$$

La potencia reactiva implica en  $\cos \phi < 1$ , lo que se traduce en pérdidas y disminución de la capacidad de transporte de potencia activa de transformadores y sistemas de distribución. Así, las empresas de distribución de energía les cobran a sus clientes industriales por la utilización de potencia reactiva, penalizando aquellos que presentan bajo factor de potencia en el punto de medición [5].

El proceso de introducir elementos reactivos para llevar al factor de potencia lo más cercano a la unidad se denomina corrección de factor de potencia. Dado que la mayoría de las cargas son inductivas, el proceso involucra normalmente la introducción de elementos con características terminales capacitivas [9].

La corrección del factor de potencia por medio de capacitores se define como la carga capacitiva para compensar la demanda de energía reactiva en atraso [1]. El costo de la corrección del factor de potencia debe ser compensado por el costo de la energía reactiva que deja de ser consumida. La empresa ANDE de Paraguay exige a sus clientes industriales un factor de potencia medio del mes igual o superior a 0,92. Entre 0,8 y 0,92 aplica un cobro proporcional a la diferencia entre 0,92 y el factor de potencia medido, y para valores menores a 0,8 la penalización es la suspensión del suministro [10].

### 5. El problema de resonancia armónica

Sin la utilización de bancos de capacitores en paralelo con las cargas no lineales la resonancia armónica puede ser prácticamente ignorada en un sistema industrial. Sin embargo, varios bancos de capacitores pueden existir en un sistema de distribución y esto puede dar lugar a múltiples frecuencias de resonancia.

En un circuito resonante paralelo la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva están en paralelo con una fuente de corriente armónica. A las frecuencias donde las reactancias inductiva y capacitiva son iguales, ocurre la resonancia armónica y la impedancia resultante puede ser muy alta, dependiendo de la configuración del sistema y de las cargas.

En la figura 5 se tiene el equivalente de Thevenin del circuito de un sistema de potencia en el punto de conexión del banco de capacitores.  $E_{th}$  y  $Z_{th}$  son los equivalentes de Thevenin de la tensión y la impedancia del sistema, donde el valor de  $Z_{th}$  es obtenido por medio de una medición por barrido de frecuencia. La resonancia paralela ocurre cuando la reactancia  $X_C$  se iguala con  $Z_{th}$ . Esto puede ser expresado de la siguiente manera [7]:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{th}C} - \frac{R_{th}^2}{4L_{th}^2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{th}C}} \quad (8)$$

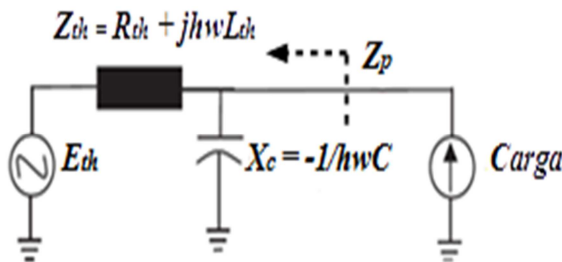


Fig. 5. Equivalente de Thevenin de un sistema de potencia con banco de capacitores [7].

A la frecuencia de resonancia, la impedancia aparente de la combinación paralela de la inductancia equivalente y la capacitancia, vista desde la fuente de corriente armónica (carga no lineal) adquiere valores muy elevados [7].

$$Z_{p,res} = \frac{-j/nwC(jnwL_{th}+R_{th})}{R_{th}} = \frac{(nwL_{th})^2}{R_{th}} \quad (9)$$

donde  $n$  es el orden del armónico.

Como en los sistemas de transmisión  $R_{th} \ll wL_{th}$ ,  $Z_{p,res}$  tendrá un valor muy elevado a la frecuencia de resonancia.

En la ecuación (9) se verifica que para la resonancia paralela, una pequeña corriente armónica puede causar una gran distorsión de la tensión.

$$V_{res}^{barra} = Z_{p,res} \cdot I_{carga}^n \quad (10)$$

Estas corrientes y sobretensiones armónicas pueden causar serias perturbaciones en los equipos conectados a la red, como sobrecalentamiento de conductores y equipos, generación de torques armónicos y oscilaciones en máquinas rotativas, operación indebida de dispositivos de protección, reducción de potencia de equipos eléctricos, daños a los bancos de capacitores por efecto de la sobrecarga, los cuales pueden precipitar la falla y salida de operación de equipos del sistema, entre otras [4]. Por lo tanto, la resonancia armónica en un sistema de potencia no puede ser tolerada y debe ser evitada.

### 7. Propuesta de compensación reactiva serie de factor de potencia en sistemas industriales

La propuesta de este trabajo es utilizar un convertidor de tensión CA/CA en serie con la carga como compensador de factor de potencia de cargas tipo resistivo-inductivo en instalaciones industriales, de manera a no utilizar banco de capacitores y así evitar el fenómeno de resonancia paralela con la inductancia de la red. Esta propuesta es ilustrada por medio de circuitos monofásicos y diagramas vectoriales, conforme será descrito a seguir.

En la Figura 6 se tiene un circuito con una fuente senoidal pura y una carga tipo R-L, por tanto, con factor de potencia menor que 1 y en la figura 7 se tiene el respectivo diagrama vectorial. En el circuito se tienen:

$$v_1(t) = \hat{V}_1 \cdot \text{sen}(wt) \quad (11)$$

$$v_L(t) = \hat{V}_L \cdot \text{sen}(wt + \theta_1) \quad (12)$$

donde  $\theta_1$  es el desfase entre  $v_1(t)$  y  $v_L(t)$  y  $\omega=2\pi f$ , con  $f = 50$  Hz.



Fig. 6. Circuito con carga tipo R-L

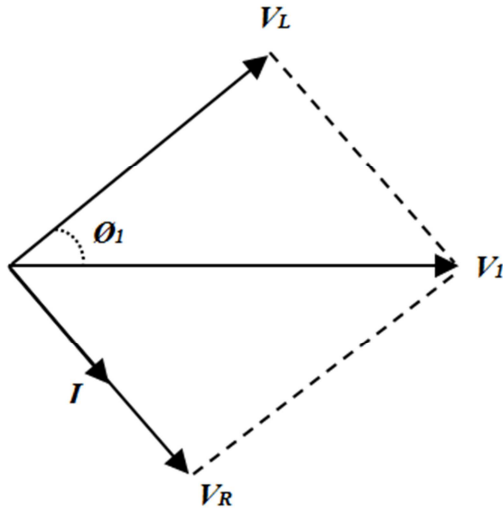


Fig. 7. Diagrama vectorial del circuito de la figura 6

Utilizando el principio de funcionamiento del dispositivo denominado compensador estático síncrono serie, utilizado en líneas de transmisión para control de reactivos, se introduce en el circuito de la figura 6, en serie con la carga conforme figura 8, una fuente de tensión CA a la que se denomina  $V_C$ , de la misma frecuencia y amplitud que la caída de tensión producida por el inductor de la carga, pero desfasada  $180^\circ$ . Con eso se logra el efecto mostrado en la figura 9, donde la corriente  $I$  se coloca en fase con la tensión de alimentación  $V_1$ .

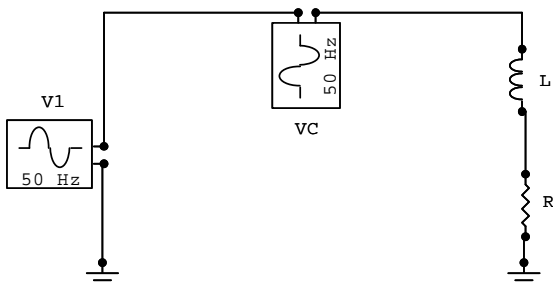


Fig. 8. Circuito con fuente CA en serie con la carga para la corrección del factor de potencia

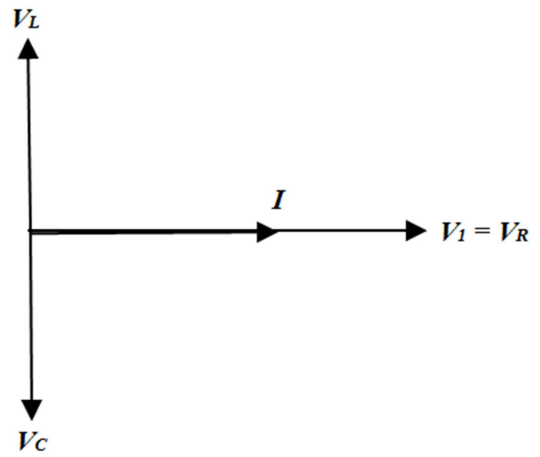


Fig. 9. Diagrama vectorial del circuito de la figura 8

En esta condición se cumple:

$$v_L(t) = \widehat{V}_L \cdot \text{sen}(wt + \frac{\pi}{2}) \quad (13)$$

$$v_C(t) = \widehat{V}_C \cdot \text{sen}(wt - \frac{\pi}{2}) \quad (14)$$

donde las amplitudes de  $v_L(t)$  y  $v_C(t)$  son iguales.

Con la tensión  $v_C(t)$  se compensa la caída de tensión en el inductor de la carga y se logra que la corriente esté en fase con la tensión de alimentación, haciendo que el factor de potencia presentado a la fuente sea igual a 1. También la caída de tensión  $v_R(t)$  sobre el resistor de la carga se iguala a la tensión de alimentación  $v_1(t)$ . No obstante, la amplitud de la tensión sobre la carga R-L aumenta para  $\overline{V}_1 + \overline{V}_C$ , conforme mostrado en la figura 10.

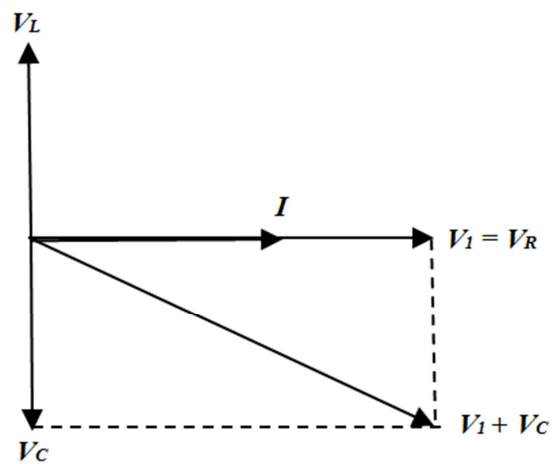


Fig. 10. Diagrama vectorial del circuito de la figura 8 con  $(\overline{V}_1 + \overline{V}_C)$ .

El aumento de la tensión sobre la carga R-L es un problema que debe ser tratado. Se necesita una tensión adicional de amplitud  $|\vec{V}_2| = [ |(\vec{V}_1 + \vec{V}_C)| - |\vec{V}_1| ]$  en contrafase con el vector  $(\vec{V}_1 + \vec{V}_C)$  para que la tensión sobre la carga R-L vuelva a tener la misma amplitud que  $v_1(t)$ . Esto equivale a introducir otra fuente de tensión  $v_2(t)$  en serie con las fuentes  $v_1(t)$  y  $v_C(t)$  conforme se muestra en la figura 11 y 12.

Se verifica que la corriente  $I$  disminuye de valor y la caída de tensión sobre el resistor  $R$  es menor que la tensión de alimentación  $V_1$ .

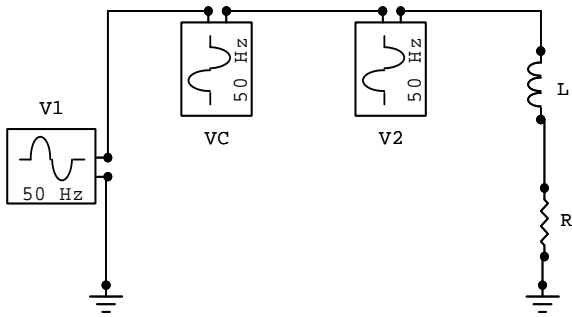


Figura 11. Adición de la fuente V2.

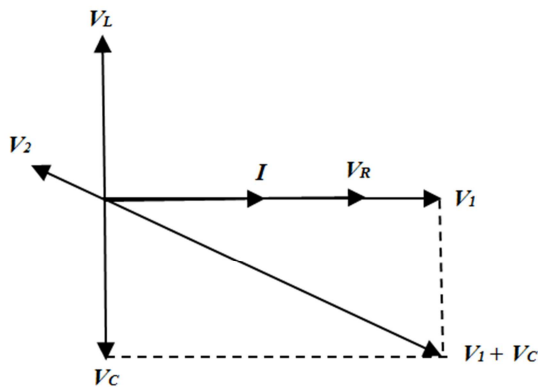


Fig. 12. Diagrama vectorial del circuito de la figura 11

Sumando las tensiones de las fuentes de tensión  $v_C(t)$  y  $v_2(t)$  se tiene la tensión  $v_3(t)$  conforme mostrado en las figuras 13 y 14.

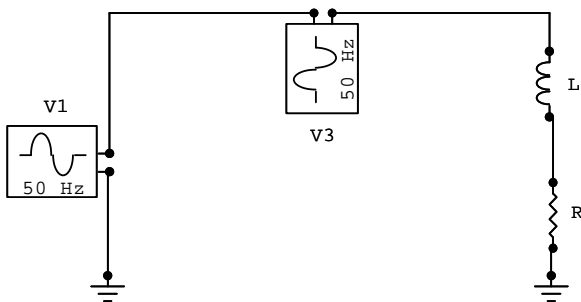


Fig. 13. Fuente V3 en serie con la carga

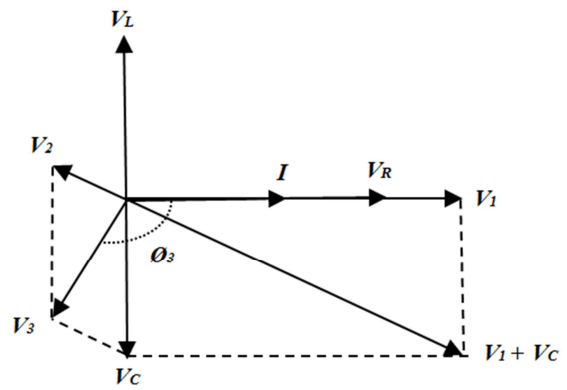


Fig. 14. Diagrama vectorial del circuito de la figura 13

Entonces  $v_3(t)$  es la tensión que se debe introducir para que la corriente esté en fase con  $v_1(t)$  y que la amplitud de la tensión sobre la carga R-L sea igual a la de la tensión de alimentación  $v_1(t)$ .

$$v_3(t) = \hat{V}_3 \cdot \text{seno}(2\pi 50t - \theta_3) \quad (15)$$

siendo  $\theta_3$  es el desfase entre  $v_1(t)$  y  $v_3(t)$ .

El análisis vectorial realizado se basa en parte en el análisis vectorial del dispositivo denominado SSSC contenido en la referencia [11]. La adición de la fuente V2 fue deducida en base a la necesidad de mantener sobre la carga una tensión de amplitud similar a la de la fuente de alimentación del circuito.

## 8. Simulación en computador basada en método iterativo de aproximaciones sucesivas

El método de aproximaciones sucesivas es un método iterativo que permite aproximar la solución de una ecuación. Se parte de una estimación inicial de la solución y se construye una sucesión de aproximaciones de forma recurrente [12]. La filosofía de este método es utilizada en la siguiente simulación para validar la propuesta teórica presentada en el apartado anterior.

Tomando como referencia el circuito de la figura 13 se debe resolver la ecuación (15) donde las variables son  $\hat{V}_3$  y  $\theta_3$  y se buscan: a) Amplitud de la tensión  $v_{RL}(t)$  sobre la carga igual a la amplitud de la tensión de la fuente de entrada  $v_1(t)$ , y b) Corriente  $i(t)$  en fase con la tensión de la fuente de entrada  $v_1(t)$  para que el factor de potencia del circuito sea igual a 1.

Por medio del programa de simulación de circuitos eléctricos CircuitMaker, fueron asignados valores iniciales a  $\hat{V}_3$  y  $\theta_3$ , los cuales fueron siendo alterados sucesivamente (aumento y disminución) en 1% del valor inicial. A cada alteración se visualizaban las formas de onda simuladas, buscando la tensión  $v_3(t)$  que consiguiera compensar la reactancia inductiva de la carga y así conseguir que la corriente que circule por la fuente de alimentación esté en fase con  $v_1(t)$ , lo que equivale a un factor de potencia igual a 1, y al mismo tiempo mantener la tensión sobre la carga R-L en la misma amplitud de la tensión de alimentación  $v_1(t)$ .

La carga tiene una tensión nominal con la cual debe trabajar, que la fuente le suministraba antes de realizar la compensación. Después de la compensación la carga necesita mantener ese nivel de tensión y el conjunto fuente + compensador lo tiene que suministrar. Los valores de  $v_1(t)$ , R y L utilizados fueron:

$$v_1(t) = 100 \text{ seno } (2\pi 50t) \text{ [V]} \quad (16)$$

R = 400 [ $\Omega$ ]  
L = 1 [H]

La tensión  $v_3(t)$  que produce los dos resultados esperados es:

$$v_3(t) = 85 \text{ seno } (2\pi 50t - 2,041)$$

donde 2,041 radianes = 6,5 ms.

Las formas de onda resultantes se muestran en la figura 15.

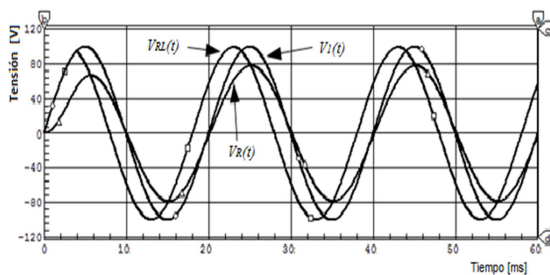


Fig. 15. Formas de ondas del circuito de la figura 13.

En este gráfico se verifica que la tensión  $v_{RL}(t)$  sobre la carga R-L tiene la misma amplitud que la tensión  $v_1(t)$  de alimentación del circuito, y la tensión sobre el resistor  $V_R(t)$ , que representa la forma de onda de la corriente  $i(t)$ , está en fase con la tensión  $v_1(t)$  de alimentación del circuito. De esta forma se verifica que se obtuvieron los dos resultados buscados, validando lo que se propuso como objetivo teórico del trabajo.

## 9. Validación técnica de la propuesta

Para comprobar la viabilidad técnica de la propuesta teórica fue construido un prototipo de 1kVA de potencia de salida, cuyo circuito esquemático es mostrado en la figura 16 y una foto del mismo es mostrada en la figura 17.

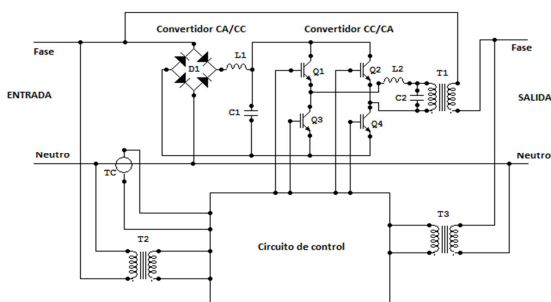


Fig. 16. Circuito esquemático del prototipo construido

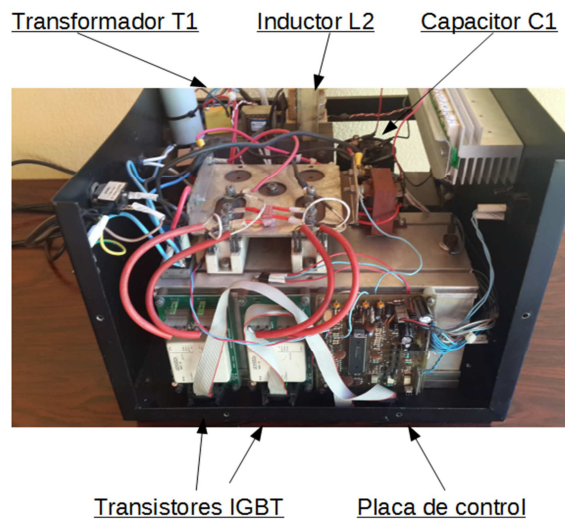


Fig. 17. Fotografía del prototipo.

La lógica de control del prototipo está basada en el método de aproximaciones sucesivas de resolución de ecuaciones [12]. El circuito de control recibe los valores de las mediciones de la tensión y corriente de entrada y de la tensión de salida, y en base a esos datos genera los pulsos para controlar el convertidor CC/CA del prototipo mostrado en la figura 16.

El circuito de pruebas utilizado se muestra en la figura 18, formado por una carga tipo R-L, con un inductor fijo y un resistor variable, alimentada por la fuente de tensión  $V_1$ , a la cual es sumada la tensión de corrección a través del secundario del transformador T1. También se muestra el medidor de factor de potencia.

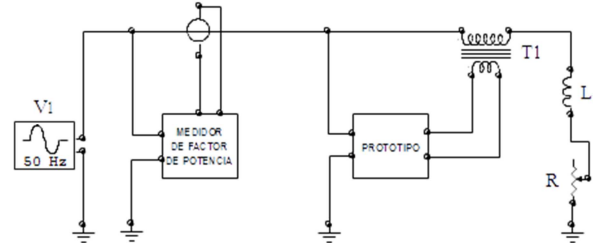


Fig. 18. Circuito de pruebas del prototipo.

Los valores de la fuente de alimentación y de la carga son:

$V_1$ : Fuente de alimentación en 220 Vef / 50Hz.

R: Resistor variable de 1 a 500 ohms / 1,5 A.

L: Inductor de 473 mH / 3 A.

Con valor fijo del inductor  $L$ , fue variado en forma continua el valor de  $R$  de forma a obtener valores de factor de potencia de la carga de 0,5 hasta 0,9.

Se registraron el factor de potencia corregido en la entrada del circuito de pruebas y las tensiones, corrientes, potencias activa y aparente de entrada y de salida para valores de factor de potencia de la carga de 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 y 0,9.

En las figuras 19 y 20 se presentan los registros de las mediciones para factor de potencia de la carga igual a 0,5; el cual es la condición más desfavorable de los cinco valores probados, pues se debe corregir la mayor componente reactiva de la carga. En la figura 19 se

registran las formas de onda de la tensión y la corriente en la carga y se resalta el registro del factor de potencia igual a 0,5.

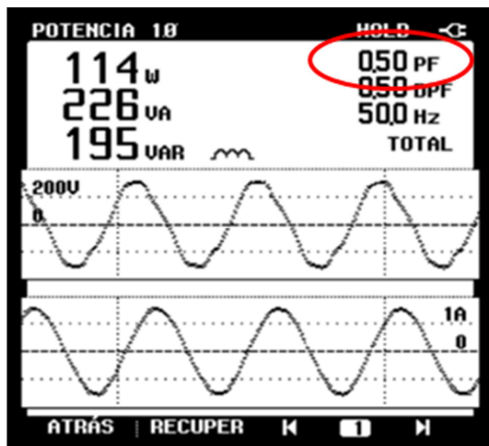


Fig. 19. Registros de magnitudes en la carga

En la figura 20 se muestran las formas de onda de la tensión y la corriente de entrada del prototipo y se resalta el factor de potencia corregido igual a 0,99.

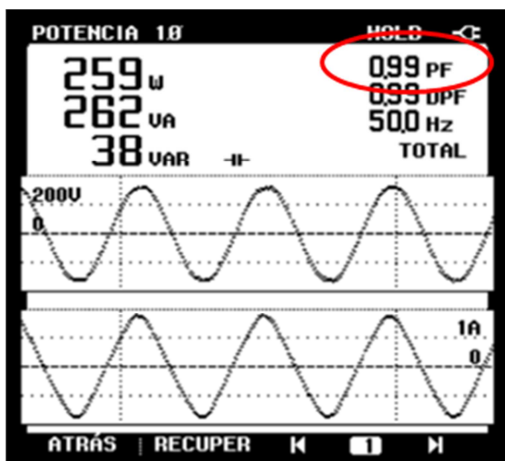


Fig. 20. Registros de magnitudes en la entrada del prototipo

Comparando las figuras 19 y 20 se verifica que el factor de potencia de la carga de valor 0,5 es corregido a 0,99 en la entrada del circuito de pruebas, con lo cual se comprueba el desempeño satisfactorio del prototipo para carga lineal con dicho factor de potencia. También se observa que la carga consume 114 W y a la entrada del prototipo se mide 259 W, siendo la diferencia el consumo propio del corrector.

El consumo propio corresponde a la potencia eléctrica de entrada que se transforma en calor en los diversos componentes del equipo, principalmente en los cuatro semiconductores de potencia IGBTs denominados Q1, Q2, Q3 y Q4 en el circuito de la figura 16.

Se observa además que la potencia reactiva en la entrada del corrector es de 38 VAR en razón de que el factor de potencia no es exactamente la unidad.

El prototipo es de 1 kVA de potencia aparente de salida, y conforme figura 19 a la salida del prototipo se tiene 226 VA por lo que se lo utiliza en este caso al

22,6% de su potencia nominal. Considerando las potencias activas de entrada y de salida este equipo tiene un rendimiento del 44%. No obstante, lo que se busca en este trabajo inicial es mostrar que la propuesta teórica de corrección serie del factor de potencia es técnicamente posible, siendo necesario realizar exhaustivos estudios para, posteriormente, determinar las condiciones necesarias para su utilización práctica.

En la tabla 2 se presentan los valores medidos de las magnitudes de los parámetros de salida del prototipo, en función del factor de potencia de la carga de 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 y 0,9.

Tabla 2: Magnitudes de salida del prototipo

FP de la carga	R de la carga [Ω]	L de la carga [mH]	Tensión de salida [V]	Corriente de salida [A]	Potencia activa de salida [W]	Potencia reactiva de salida [VAr]	Potencia aparente de salida [VA]
0,5	93	473	216,2	1,107	114	195	226
0,6	118	473	215,4	1,029	125	166	208
0,7	162	473	215,8	0,895	130	134	186
0,8	242	473	216,8	0,749	136	96	158
0,9	430	473	No se estabilizan los valores medidos				

En esta tabla se indican los valores en que se ajustó el resistor variable  $R$  para obtener los valores de factor de potencia de la carga de 0,5 a 0,9. El valor del inductor  $L$  permaneció invariable en 473 mH. Se verifica que la tensión de salida permaneció en  $216 \pm 1$  V. El valor ajustado en el algoritmo de control es de  $220 \pm 1$  V, siendo la diferencia por cuenta de las caídas de tensión en el inductor  $L2$  del filtro de salida y en el transformador de salida  $T1$ .

Para el factor de potencia de la carga de 0,5 se tiene el menor valor de  $R$  y, por lo tanto, el mayor valor de la corriente de salida y de las potencias activa, reactiva y aparente.

En la tabla 3 se presentan los valores medidos de las magnitudes de entrada del prototipo en función del factor de potencia de la carga variando de 0,5 a 0,9. Se verifica que el prototipo consigue corregirlo para valores iguales o superiores a 0,93. El mínimo valor esperado es de 0,92, siendo esto exigido por la empresa distribuidora de electricidad ANDE del Paraguay [9].

Tabla 3: Magnitudes de entrada del prototipo

FP de la carga	Factor de potencia corregido	Tensión de entrada [V]	Corriente de entrada [A]	Potencia activa de entrada [W]	Potencia reactiva de entrada [VAr]	Potencia aparente de entrada [VA]
0,5	0,99	228,3	1,154	259	38	262
0,6	0,99	228,3	1,068	241	34	243
0,7	0,99	228,3	0,967	215	30	217
0,8	0,98	228,3	0,838	188	37	192
0,9	Oscila de 0,93 a 0,98	228,3	No se estabilizan los valores medidos			

Para valor de factor de potencia de la carga igual a 0,9 el equipo no consigue estabilizarse en un valor de factor de potencia corregido y oscila entre 0,93 y 0,98 en razón de que los valores que debe calcular el programa de control están en el orden de los errores de las mediciones de los transformadores de tensión y de corriente utilizados por el circuito de control, lo cual



hace que no pueda converger a un valor específico de factor de potencia corregido.

Los valores de las potencias activas de entrada son similares a las de las potencias aparentes de entrada por cuenta de que el factor de potencia corregido es cercano a 1.

En el gráfico de la figura 21 se comparan las potencias activas de entrada y de salida del prototipo en función del factor de potencia de la carga.

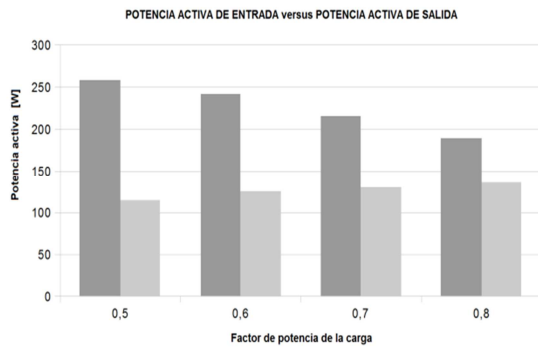


Figura 21. Potencia activa de entrada (gris oscuro) versus Potencia activa de salida (gris claro)

La diferencia entre la potencia activa de entrada y de salida corresponde al consumo propio del prototipo. Se verifica que a mayor valor del factor de potencia de la carga, mejora la relación entre potencia de salida y consumo propio del equipo, es decir el rendimiento del equipo es mayor. Para menores valores de factor de potencia de la carga es mayor el valor de potencia reactiva a compensar y por eso el consumo de potencia activa del equipo también es mayor.

Lo mas relevante que muestran los resultados es que la filosofía de compensación funciona conforme lo esperado.

Se resalta que variando el factor de potencia de la carga de 0,5 a 0,9 en aproximadamente 30 segundos el prototipo consigue corregir el factor de potencia a lo largo de toda la secuencia.

### 10. Pruebas con carga no lineal

Para verificar el desempeño del prototipo con presencia de armónicos de corriente, producidos por cargas no lineales, se instaló en paralelo con la carga R-L un resistor en serie con un diodo conforme mostrado en la figura 22.

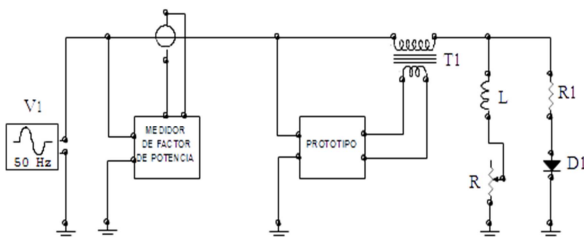


Fig. 22. Circuito de pruebas del prototipo con carga no lineal

Para la carga R-L con factor de potencia 0,5, la carga no lineal R1-D1 drena 0,672A eficaces, conforme indicado con la flecha en la figura 23, lo que representa 45 % de la carga combinada (lineal y no lineal) de 1,492 A eficaces, siendo la forma de onda indicada por la flecha en la figura 24

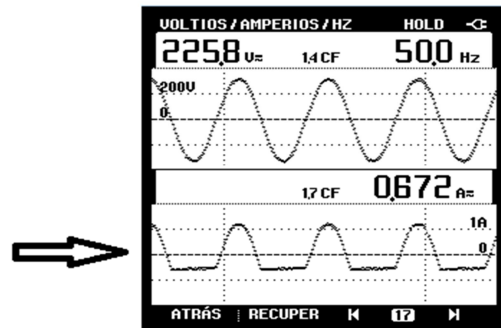


Fig. 23. Corriente a través de la carga D1-R1.

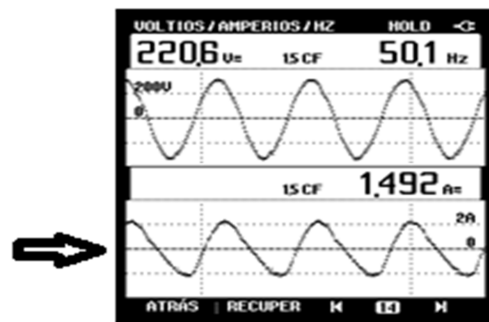


Figura 24. Corriente drenada por la carga total. El espectro de armónicos de la corriente de carga total se muestra en la figura 25.

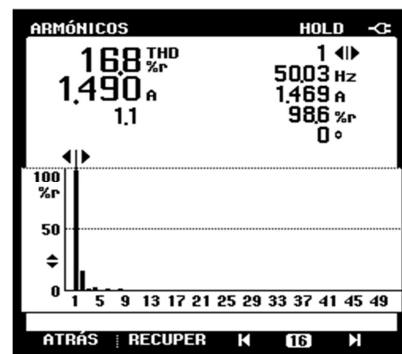


Figura 25. Espectro de armónicos de la corriente total drenada por la carga

En la figura 25 puede ser observado que el segundo armónico de 100 Hz es el orden del 20% de la componente fundamental de 50 Hz y está dentro del valor límite establecido por la Norma IEC 6100-3-2:2014 [8], como consta en la tabla 1. Para la misma condición también se resalta en la figura 26 la medición del factor de potencia total de la carga de 0,76 y en la figura 27 el valor del factor de potencia corregido de 0,98 en la entrada del prototipo.

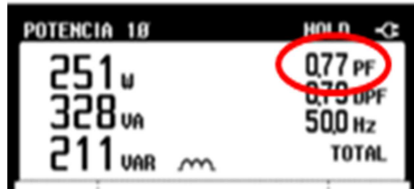


Figura 26. Factor de potencia total de la carga



Figura 27. Factor de potencia corregido en la entrada del prototipo.

En la figura 27 se comprueba que con factor de potencia de la carga no lineal igual a 0,76 el prototipo consigue corregirlo al valor de 0,98, lo cual muestra que el equipo tiene desempeño adecuado con carga no lineal que produce armónicos de 100 Hz. En la figura 28 se presenta el espectro de armónicos de la corriente de entrada del prototipo.

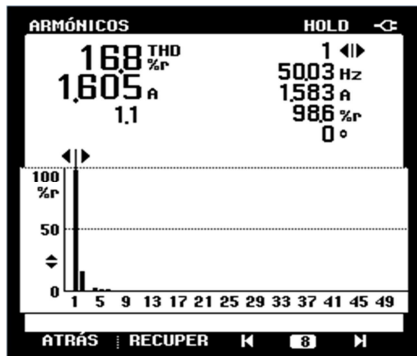


Figura 28. Espectro de armónicos de la corriente de entrada.

En la figura 28 se verifica que el espectro de armónicos de la corriente de entrada es igual al espectro de armónicos de la corriente en la carga, presentado en la figura 25, por lo que se comprueba que el prototipo no filtra los armónicos producidos por la carga, sino que los reproduce en la corriente de entrada. Durante las pruebas se varió en forma continua el valor del factor de potencia de la carga lineal R-L de 0,5 hasta 0,8 y se registraron los valores de factor de potencia total de la carga y factor de potencia corregido en la entrada del prototipo para los valores de 0,5, 0,6, 0,7 y 0,8. Para factor de potencia de la carga R-L igual a 0,9 no fueron realizadas las pruebas y las mediciones por el riesgo de que el equipo pueda dañarse, pues con carga puramente lineal el prototipo no consiguió estabilizarse en un valor de potencia corregido conforme indicado en las tablas 2 y 3.

Tabla 4: Resultados con carga no lineal

FP de la carga R-L	Factor de potencia de la carga total R-L y R1-D1	Factor de potencia corregido
0,5	0,76	0,98
0,6	0,82	0,98
0,7	0,88	0,98
0,8	0,92	0,98

En la tabla 4 se verifica que con carga no lineal que produce armónicos de 100 Hz, y con factor de potencia de la carga total variando de 0,76 a 0,92 el prototipo consigue corregir a 0,98, lo cual se considera satisfactorio por estar por encima del valor de 0,92 que es el mínimo valor exigido por la empresa distribuidora de electricidad ANDE del Paraguay [10].

## 11. Conclusiones y recomendaciones

Fue realizado un estudio de la generación de armónicos de corriente por parte de cargas denominadas no lineales instaladas en redes de distribución industriales. Se puso énfasis en el fenómeno de resonancia paralela que puede ocurrir con los bancos de capacitores utilizados para corrección de factor de potencia de las cargas y la inductancia de la red de distribución, y los efectos dañinos que pueden producir sobre los equipos, como las producidas por sobretensiones de niveles no tolerables por los equipos conectados a dicha red. La principal contribución de este trabajo es presentar una opción para la corrección del factor de potencia en sistemas eléctricos industriales con presencia de armónicos, con respecto a los filtros activos de potencia paralelos y a los bancos de capacitores complementados con filtros pasivos sintonizados en las frecuencias de los armónicos más relevantes. Por medio de modelos matemáticos fue presentada la propuesta de compensación serie del factor de potencia de cargas tipo resistivo-inductivo por medio de una fuente de tensión variable en amplitud y desfase, en serie con la carga y fue validada por medio de simulaciones en computador. Además, fue demostrada la viabilidad técnica de la propuesta por medio de un prototipo cuyas pruebas tuvieron resultados satisfactorios por haber conseguido valores de factor de potencia corregido del orden de 0,99 para cargas lineales tipo resistiva-inductiva y 0,98 para cargas con presencia de armónicos de 100 Hz. Dicho prototipo fue fabricado a partir de un equipo UPS donde se introdujeron modificaciones en el circuito de potencia, en el circuito de control y en el programa del microcontrolador. Con este equipo se busca evitar la posibilidad de amplificación de armónicos presentes en una red de distribución con presencia de armónicos, por efecto del fenómeno de la resonancia paralela entre la reactancia inductiva de la red y la reactancia capacitiva del banco utilizado para corrección de factor de potencia. Para optimizar el uso de este equipo se propone utilizarlo exclusivamente con cargas no lineales,

corrigiendo el factor de potencia de las cargas lineales con capacitores en paralelo. Es relevante indicar que los equipos con comportamiento de cargas no lineales adquiridas por las industrias deben cumplir con las limitaciones de emisión de corrientes armónicas impuestas por las normas internacionales correspondientes. Esto debe estar claramente establecido en las especificaciones técnicas utilizadas para la adquisición de los mismos.

Como investigación futura se propone la verificación de la viabilidad económica de la compensación de factor de potencia presentada en este trabajo teniendo en cuenta el costo del proyecto, de los componentes, de la fabricación y del consumo propio del equipo.

Además, se propone probar el prototipo aumentando los componentes armónicos para verificar los límites a que puede llegar la compensación. En estos límites hay riesgo de daños al prototipo pues en caso de que el circuito de control genere pulsos inadecuados se puede producir la conducción de los semiconductores de manera que se ponga en cortocircuito la etapa de potencia del convertidor CC/CA.

Otra línea de investigación propuesta es verificar la viabilidad técnica de un prototipo que introduciendo una tensión CA en serie con la carga consiga desfazar la corriente  $180^\circ$  respecto a la tensión de alimentación. Con esto un medidor de energía conectado a la entrada del prototipo no debería medir consumo de potencia activa ni reactiva. Este equipo sería similar al construido para este trabajo. Lo que debería ser modificado sería principalmente el programa de control.

## 12. Referencias

- [1] IEEE standards definition database – <http://dictionary.ieee.org> – 2015.
- [2] Norma IEEE 519. Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. 2014.
- [3] J. C. Attachie y C. K. Amuzuvi. “Investigating harmonic resonance and capacitor bank switching at a power distribution substation using a fixed capacitor bank”. Research journal in engineering and applied sciences. 2013.
- [4] J. C. Das. “Power system harmonics and passive filter designs”. IEEE Press. 2015.
- [5] N. Mohan, T. M. Underland y W. P. Robbins. “Electrónica de Potencia”. Mc Graw Hill. 2009.
- [6] J. Arrillaga y N. R. Watson. “Power system harmonics”. John Wiley & Sons. 2003.
- [7] N. Eghtedarpour and M. A. Karimi. “Harmonic resonance in power systems. A documented case”. IEEE. 2014.
- [8] Norma IEC 6100-3-4. Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A. 2014.
- [9] R. Boylestad. “Introducción al análisis de circuitos”. Prentice Hall. 2004.
- [10] Pliego de tarifas de la ANDE. [www.ande.gov.py](http://www.ande.gov.py) – 2015.
- [11] A. A. Nimje, C. K. Panigrahi y A. K. Mohanty. “Enhanced power transfer capability by using SSSC” Journal of Mechanical Engineering Research. 2011.
- [12] J. C. B. Acevedo. “Matemáticas avanzadas y estadística para ciencias e ingenierías”. Universidad de Sevilla. 2006.